

**Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Український державний хіміко-технологічний університет»**

**МАТЕРІАЛИ
I Всеукраїнської науково-технічної конференції
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА
ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ
I ЧАСТИНА**

**МАТЕРИАЛЫ
I Всеукраинской научно-технической конференции
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И
ОПТИМИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ
I ЧАСТЬ**

**MATERIALS
Ist all-Ukrainian scientific-technical conference
COMPUTER MODELING AND OPTIMIZATION OF
COMPLEX SYSTEMS
I PART**

3-5 листопада 2015 року

м. Дніпропетровськ

ББК

Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2015): матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 3-5 листопада 2015 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет»: в 2-х ч. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – Ч. 1. – 268 с.

ISBN

У збірнику наведено тези доповідей першої всеукраїнської науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». Матеріали збірника охоплюють питання перспективних напрямків математичного моделювання; моделей та методів оптимізації; інтелектуальних комп'ютерних систем; інформаційних технологій в автоматизації, електроніці та вимірювальній техніці; інформаційних управляючих систем в економіці.

Збірник розраховано на працівників, викладачів, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів.

Збірник друкується за рішенням Вченої ради ДВНЗ УДХТУ протокол №7 від 24 вересня 2015 р.

Збірник друкується за рішенням програмного комітету конференції Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2015)

Державний вищий навчальний заклад
«Український державний хіміко-технологічний університет»,
кафедра Інформаційних систем
тел. 0562 – 47-38-77
Web-сайт кафедри: <http://xt.dp.ua>
E-mail: kmocc_kis@ukr.net

ОРГКОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

Голова:

Півоваров О.А. ректор ДВНЗ УДХТУ, д.т.н., професор

Заступник голови:

Зеленцов Д.Г. д.т.н, професор

Кисельова О.М. член-кореспондент НАН України, д.ф.-м.н., професор

Члени організаційного комітету:

Голеус В.І. д.т.н., професор

Харченко О.В. д.х.н., професор

Коротка Л.І. к.т.н., доцент

Науменко Н.Ю. к.т.н., доцент

Програмний комітет:

Алексєєв М.О. д.т.н., професор (Дніпропетровськ)

Баєв С.В. д.т.н., професор (Дніпропетровськ)

Гнатушенко В.В. д.т.н., професор (Дніпропетровськ)

Голоднов О.І. д.т.н., професор (Київ)

Гук Н.А. д.ф.-м.н., професор (Дніпропетровськ)

Кошкін К.В. д.т.н., професор (Миколаїв)

Михальов О.І. д.т.н., професор (Дніпропетровськ)

Ляшенко В.П. д.т.н., професор (Кременчук)

Приставка П.О. д.т.н., професор (Київ)

Скалозуб В.В. д.т.н., професор (Дніпропетровськ)

Федорович О.Є. д.т.н., професор (Харків)

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ 1

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

<u>Krasilenko V.G., Nikolsky A.I., Lazarev A.A., Nikitovich D.V.</u> SIMULATING OPTICAL PATTERN RECOGNITION ALGORITHMS FOR OBJECT TRACKING BASED ON NONLINEAR MODELS AND SUBTRACTION OF FRAMES	11
<u>Rusakova T., Biliaiev M.</u> MATHEMATICAL MODELING OF AIR POLLUTION ON THE STREETS OF CITY	17
<u>Skalozub V.</u> THE METHOD OF TAKAGI-SUGENO FOR NONLINEAR MODEL COMPROMISE OF RULES M.	20
<u>Алпатов Ф.М.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ СОЗДАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ	22
<u>Андриянова М.В., Черваков О.В., Головенко В.А., Гуревина Н.Л.</u> ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЧИСТКИ СИРОПОВ В КРАХМАЛОПАТОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	25
<u>Бабенко Ю.В.</u> ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АКУМУЛЮЮЧОГО БУНКЕРА СИСТЕМ ПІДЗЕМНОГО КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ	27
<u>Бахрушин В.С.</u> ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ОСВІТНІХ ВИМІРЮВАНЬ	28
<u>Баюл К.В., Худяков А.Ю., Ващенко С.В.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ УПЛОТНЕНИЯ И УПРУГИМ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕМ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ БРИКЕТИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ	31
<u>Беляев Н.Н., Карпо А.А.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМОРАЖИВАНИЯ ГРУЗОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНАХ	37
<u>Беляев Н.Н., Беляева В.В., Берлов А.В.</u> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В СЛУЧАЕ АВАРИИ ПРИ ТРАНПОРТИРОВКЕ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА	38
<u>Беляев Н.Н., Кириченко П.С., Якубовская З.Н.</u> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ	39
<u>Беляев Н.Н., Мунтян Л.Я.</u> ЭКСПЕРЕСС ПРОГНОЗ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИЯХ НА ТРАНСПОРТЕ И ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙТРАЛИЗАТОРА	40
<u>Беляев Н.Н., Нечитайло Н.П.</u> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКУПОРИВАНИЯ ПОРЫ	

МЕМБРАНЫ ПРИ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ НА БАЗЕ ДВУХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ МАССОПЕРЕНОСА	41
<u>Беляев Н.Н., Цыганкова С.Г.</u> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ	42
<u>Борзов С.О.</u> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМВІДНОСИН НА БАЗІ ТЕОРІЇ РЯДІВ ПРИ ДИСТАНЦІЙНОМУ НАВЧАННІ	43
<u>Василенко І.А., Куманьов С.О., Півоваров О.А., Скиба М.І.</u> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	44
<u>Василенко О.В.</u> СУЧАСНІ ПІДХОДИ У МОДЕЛЮВАННІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ	46
<u>Власов О.И., Каиров А.С.</u> ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК	48
<u>Гапеев С.Н., Сосна Д.О.</u> ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЯВЛЕНИЯ ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ	50
<u>Гармаш С.М., Чернецький Є.В.</u> МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВРОЖАЙНОСТІ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР ВІД ЗАСТОСУВАННЯ ДОБРИВА	55
<u>С. Гринишак, Н. А. Лысенко</u> МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ В СЕЙСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА А.	56
<u>Грод І.М., Шевчик Л.О.</u> МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ КОЛИВАННЯ БІОМАСИ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ПОПУЛЯЦІЇ ВИНОГРАДНОГО СЛИМАКА (<i>Helix pomatia</i>) У СКЛАДІ ЛІСОВОГО БІОЦЕНОЗУ	60
<u>Доренський О.П.</u> ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО- УПРАВЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ НА ЛОГІЧНОМУ РІВНІ	63
<u>Дьомічев К.Е., Стеблянко П.О.</u> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНО - ПЛАСТИЧНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ТІЛ З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОГО ХАРАКТЕРУ ДЕФОРМУВАННЯ	66
<u>Жульковский О.А., Жульковская И.И.</u> О ПОДХОДАХ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	68
<u>Иванец Н.В.</u> ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СЕЧЕНИЙ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ	69
<u>Іванків К.С.</u> ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МІГРАЦІЇ БЛИЗЬКОСПОРІДНЕНИХ ВИДІВ	70

<u>Зеленцов Д.Г.</u>	ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ	74
<u>Івiцький І.І., Сокольський О.Л., Мікульонюк І.О.</u>	КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ РОЗПЛАВУ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ANSYS POLYFLOW	79
<u>Каиров В.А., Шевченко В.П.</u>	СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОНСТРУКТИВНО НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, ОСЛАБЛЕННЫХ КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ	81
<u>Катан В.А.</u>	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ЗАДАЧ ГИДРОМЕХАНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСОБСТВЕННЫХ ИНТЕГРАЛОВ В СМЫСЛЕ КОНЕЧНОЙ ЧАСТИ ПО АДАМАРУ	83
<u>Клим В.Ю.</u>	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗОГРЕВА ОДНОМЕРНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	84
<u>Коломієць О.В., Сухий К.М., Беляновська О.А.</u>	ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПАРОВОЇ СУМІШІ НА ККД ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЯТОРА	85
<u>Косаревич Р.Я., Русин Б.П.</u>	СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ РОСТУ МАКСИМАЛЬНОЇ ГЛИБИНИ ПІТІНГА З ВРАХУВАННЯМ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ	88
<u>Красніков К.С.</u>	МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБРОБКИ СТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ ДРОТОМ ПІД ЧАС ПРОДУВАННЯ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ НА АГРЕГАТІ КІВШ-ПІЧ	92
<u>Кудін О.В., Чопоров С.В.</u>	ДЕФОРМУВАННЯ ТРИШАРОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО ТИСКУ	97
<u>Л.В. Кузьміна, М.П. Мацюк</u>	ГЕОМЕТРИЧНІ ВІДОБРАЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРУ НА ПЛОЩИНІ	102
<u>Кузьев И.М., Лободенко А.Е.</u>	МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ И.М. Кузьев, А.Е. Лободенко	106
<u>Кузьев И.М., Попов Е.И.</u>	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В КОНУСНЫХ КАНАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ	111
<u>Куриляк В.В.</u>	МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ СУДНОВОГО ВАЛОПРОВОДУ	115
<u>Латанская Л.А.</u>	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКТИВНО-НЕОДНОРОДНЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ	119
<u>Лысенко Н.А.</u>	ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ И ДИНАМИКА СМЕНЫ КЛИМАТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕКУРРЕНТНОГО АНАЛИЗА	120

<u>Міхєєнко В.М.</u>	ВИКОРИСТАННЯ КВАНТОВО-ХІМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ	121
<u>Марченко В. Т., Сазина Н. П., Стюткіна-Дороніна С. В.</u>	ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ И ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	124
<u>Митина Н.Б., Зубарева И.М., Ткаля О.И.</u>	МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ β-КАРОТИНА У BLAKESLEA TRISPORA В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ	125
<u>Надрьгайло Т.Ж.</u>	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕМ СЛИТКЕ	126
<u>Насонова С.С.</u>	РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ НАФТОПРОДУКТІВ	129
<u>Начовний І.І., Кузяєв І.М., Начовний Ів.І.</u>	РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕЧІЇ ГАЗУ КРИЗЬ ТОРЦЕВІ СТИКИ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ПРУЖНОМУ КОНТАКТІ МІКРОНЕРІВНОСТЕЙ	131
<u>Нежурин В.И., Куваев В.Ю., Каряка М.Ю.</u>	ОБОЩЕННАЯ ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ОБЪЕМЕ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ФЕРРОСПЛАВНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ	134
<u>Новикова Л.В.</u>	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРРОЗИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ	137
<u>Олевский В.И., Олевская Ю.Б.</u>	МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧЕК НУЛЕВОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ	140
<u>Півторак Д.О.</u>	ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ В ФОТОАПАРАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ	146
<u>Півторак Д.А.</u>	ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ У ФОТОАПАРАТАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ	148
<u>В.А. Подольская, А.И. Федорович</u>	КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНТРОПИЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ДЕФЕКТОСКОПИИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ	149
<u>Приходько С.Б., Луценко А.А.</u>	РАЗРАБОТКА НЕЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВ НЕАТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК	152
<u>Савчук А.П., Фоков А.А., Хорошилов С.В.</u>	МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПО КОНТУРУ ОБЪЕКТА	155

<u>Самохвалов С.Є.</u> РІВНЯННЯ МАКРОСЕГРЕГАЦІЇ В НЕРІВНОВАЖНІЙ ТЕОРІЇ БАГАТОФАЗНОЇ ЗОНИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СТАЛІ	160
<u>Семенюта Д.В.</u> ТОПОЛОГІЧНО НЕЕКВІВАЛЕНТНІ СИСТЕМИ З ПРАВОЮ РАЦІОНАЛЬНОЮ ЧАСТИНОЮ	164
<u>Сербулова І.В.</u> МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ОБ'ЄМНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА ЗА ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ТРУБ	166
<u>С'янов О.М., Косухіна О.С.</u> ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕН	168
<u>Торська Р.В., Русин Б.П., Керод Т.І., Андрушкевич У.Ю.</u> МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ПІТІНГІВ НА ПОВЕРХНІ СТАЛІ 08X18N10T ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМІРКОВИХ АВТОМАТІВ	171
<u>Черкасов А.А.</u> КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННЫХ ПЛАСТИН	175
<u>Черняк Н.А., Марасанов В.В.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХНАПРЯЖЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ	176
<u>Шатохіна Ю.В., Іванова І.М., Клінцов Л.М.</u> ВИКОРИСТАННЯ ПОКАЗНИКА ХСК СТІЧНИХ ВОД ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СТАНЦІЇ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ	181
<u>Ющенко О.В., Юрко Д.С.</u> МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ САМООРГАНІЗАЦІЇ ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ	183
СЕКЦІЯ 2 <i>МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ</i>	186
<u>Ахмадов Р.Х., Карпенко Б.В.</u> ЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИЗАВОДСКИМИ ПЕРЕВОЗКАМИ	187
<u>Гаврилук Ю.В.</u> ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРКАЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ МОРФОЛОГІЧНОЇ БУДОВИ	192
<u>Головко В.А., Яшук Н.И., Хазим Я.</u> РАСЧЕТ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ БИНЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ	193
<u>Елизева А.В.</u> ЛОГИСТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАКУПКАМИ РЕСУРСОВ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ	195
<u>Горячая А.В.</u> ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ КОМФИ НА ОСНОВЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ КОГНИТИВНЫХ КАРТ	196

<u>Смець О.О., Барболіна Т.М.</u> КОМБІНАТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ НА РОЗМІЩЕННЯХ ЗІ СТОХАСТИЧНОЮ НЕВИЗНАЧЕНІСТЮ: ВЛАСТИВОСТІ ЛІНІЙНИХ ЗАДАЧ	198
<u>Іванова А.П., Труфанова О.И., Феськова Л.В., Чумак А.Н.</u> АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОСНТРУКЦИЙ	202
<u>Коробко І.В., Коваленко В.А.</u> КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТУРБІННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	208
<u>Косолап А.И.</u> ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ	209
<u>Косолап А.И., Перетяцько А.С.</u> КВАДРАТИЧНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ В СЕТИ	213
<u>Косолап А.И., Романчук А.С.</u> МАКСИМИЗАЦИЯ НОРМЫ ВЕКТОРА НА МНОГОГРАННИКЕ	218
<u>Коструб Р.В.</u> ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ЩОДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДИСКРЕТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОРОДУЮЧИХ ШАРНІРНО-СТЕРЖНЕВИХ СИСТЕМ	221
<u>Красношлик Н.О.</u> ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТАЕВРИСТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ГЛОБАЛЬНОЇ МІНІМІЗАЦІЇ ФУНКЦІЙ	225
<u>Ляпошенко О.О., Павленко І.В., Настенко О.В., Дем'яненко М.М., Старинський О.С.</u> ОПТИМІЗАЦІЙНЕ ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО СЕПАРАЦІЙНОГО НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ	227
<u>Малиенко А.В.</u> ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫПОЛНЕНИЕМ ПЛАНОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОБЫЧИ УГЛЯ ШАХТЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КУМУЛЯТИВНЫХ СУММ	232
<u>Михайлова Т.Ф.</u> МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ПОТОЧНОГО РЕМОНТУ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ	235
<u>Михеенко Д.Ю.</u> ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КРОНШТЕЙНА В САД-СИСТЕМЕ SOLID WORKS	236
<u>Музыка Л.В., Прядко А.В.</u> ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА	240
<u>Приходько С.Б., Князь Н.В.</u> ПОБУДОВА НЕЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ ТРИВАЛОСТІ ВИКОНАННЯ ПРОЕКТІВ ПІДГОТОВКИ ЖІНОК-БОКСЕРІВ ДО ЗМАГАНЬ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЖОНСОНА	244
<u>Рак А.М.</u> ОЦІНКА ВПЛИВУ СПОТВОРЕНЬ КІНЕМАТИЧНОЇ СТРУКТУРИ ПОТОКУ НА ТОЧНІСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН ГІДРОДИНАМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА	247

<u>Ус С.А., Павлов М.С.</u> ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДА ОРМ У ЗАДАЧІ РОЗМІЩЕННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ	251
<u>Федорович О.Е., Лещенко Ю.А.</u> ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ПРЕДПРИЯТИЯ	253
<u>Федорович О.Е., Прончаков Ю.Л., Писклова Т.С.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПОРАТИВНЫХ ОФИСОВ РАЗВИВАЮЩИХСЯ КОМПАНИЙ	254
<u>Федорович О.Е., Прохоров А.В., Западня К.О.</u> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЛОГИСТИКЕ ДОБЫЧИ, ТРАНСПОРТИРОВКИ, ПЕРЕРАБОТКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ	255
<u>Хайдуров В.В.</u> ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ФУР'Є ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗКУ БАГАТОВИМІРНИХ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ	256
<u>Швачка А.И.</u> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БАЗОВЫХ РЕЖИМОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВАНИИ КОМПРОМИССНЫХ РЕШЕНИЙ В МОДЕЛИ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ	261

СЕКЦІЯ 1
ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ МАТЕМАТИЧНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ

- математичне моделювання об'єктів і процесів;
- математичні методи в біотехнології та інженерії;
- імітаційне моделювання.

SIMULATING OPTICAL PATTERN RECOGNITION ALGORITHMS FOR OBJECT TRACKING BASED ON NONLINEAR MODELS AND SUBTRACTION OF FRAMES

V.G. Krasilenko¹, A.I. Nikolsky², A.A. Lazarev³, D.V. Nikitovich⁴

^{1,4}Vinnitsa Social Economy Institute, Vinnitsa
^{2,3}Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa

Abstract. We have proposed and discussed optical pattern recognition algorithms for object tracking based on nonlinear equivalence models and subtraction of frames. Experimental results of suggested algorithms in Mathcad and LabVIEW are shown. Application of equivalent functions and difference of frames gives good results for recognition and tracking moving objects.

Keywords: optical pattern recognition algorithm, object tracking, nonlinear equivalence model, subtraction of frames, space-invariant recognition, Mathcad, Labview.

Introduction. For many applications applied in the creation of biometric systems, identification systems, extreme-correlation guidance neural cyber machine vision systems and other necessary solve the problem of object recognition in images and scenes support problem-identifying moving objects. There are many known methods and means 1, 2 to address these problems. The basis of most known methods and algorithms is to compare two different images of the same object, or its fragment, or two images, one of which is a benchmark or its transformed image and the second image is a set of images that belong to different classes and only some of them belong to the class that represented the standard. Discriminated measure of the mutual alignment reference fragment with the current image, the coordinate offset is often a mutual two-dimensional correlation function. In paper3 it was shown that to improve accuracy and probability indicators with strong correlation obstacle-damaged image, it is desirable to use methods of combining images based on mutual equivalently two-dimensional spatial functions, nonlinear transformations of adaptive-correlation weighting. At the same time, an acute problem of recognition is not only static, but also moving objects, their maintenance, i.e. tracking. In addition, in real systems is the need to recognize in such adverse situations where a moving object obstructing the obstacles which reduces the share of standard, on which the recognition is performed. The purpose of this section is a series of model experiments in model environment Mathcad verification methods for detection of moving objects with sufficient probability and accuracy.

Model experiments in Mathcad. To test the accuracy of coordinate reference standard in recognizing moving objects by simulation we used the previous video file splitting into individual frames and mutual combination of two methods for the selection frame to current staff. One group of methods included processing the current frame of image and the support position of these fragments. The second group included the formation of difference frames and further processing and combining the current frame difference with the selection of these shots difference. In addition, for both the first method consisted in finding equivalent functions between the selected fragment to study with the object of attention and the current image by processing halftone images. The second method is different from the first that the resulting equivalent function is calculated by weighing all eight successive discharges functions from bit-maps of images which were processed in each frame. In both cases additionally used equivalently adaptive non-linear weighting strengthened discriminates used measure, and allow better highlight extremes (peaks) two-dimensional spatial functions. The experiments showed that the best of these options is available by combining equivalent difference comparing the current frame with selected position from these difference-fragments, representing objects of attention. Figure 1 shows the simulation results. For both groups, the second method of processing successive-slice combination gives the best results and for moving objects, that disappear when their movement by barriers second group recognition on the basis of the formation of the current frame images of inter-frame difference images (sees Fig. 1, second right images in the top row).

Experimental research of tracking algorithm of moving objects. Especially the process of verification and investigation of algorithms for allocation and tracking of moving objects, which are recorded by cameras, there is a need of fixing, recording, playback and processing of a large number of frames (images). In addition, the dimension of the processed images have a significant and processing inline frames forming descriptors, compares them with the help of criteria functions, a decision of a

moving object of interest or part thereof, with the subsequent issuance of markers and designators, must be made continuously and in real time .

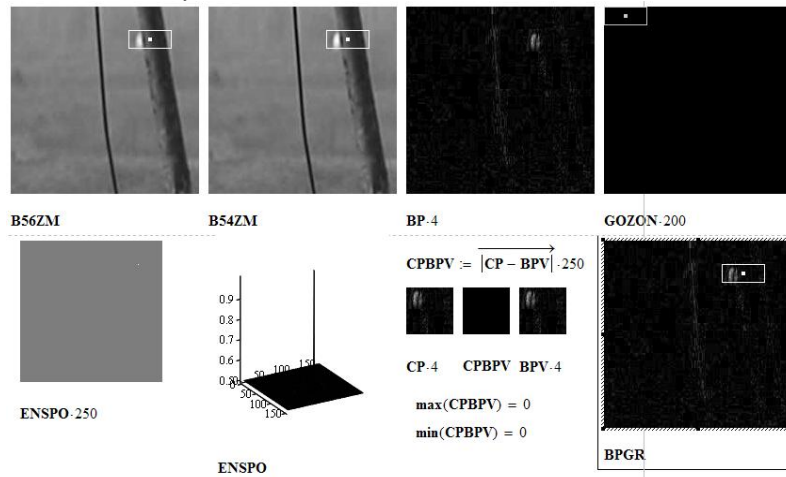


Figure 1 - Model experiments in Mathcad

Therefore, the choice of tools for research, we settled on Labview, as the most powerful integrated with the hardware platform and development environment created in the graphical programming language «G» company National Instruments (USA). Harnessing the power of Labview and its basic applications and modules makes it relatively quickly design the required system of recognition and support, to quickly change the behavior, structure and model of the system or process, write, read and analyze video file (AVI) frames, which significantly simplifies the process of verification of developed systems -specific features and statistics. At the same time for in-depth mathematical formalism and describe some of the important stage process, for example, such as the construction of two-dimensional functions of criteria we use Mathcad, which as the results of our previous studies, there is a powerful tool. We have developed a number of possible projects detection and tracking of moving objects (DTMO). Subject to the restrictions consider DTMO one embodiment shown in Figure 2 shows a block diagram of a project, and fragments 1b shows the basic design. The system introduced by the node read AVI-files to generate both the original video stream and video stream of difference frames with the possibility of setting a different delay time (in frames) between the deductible frames. Knot formation pattern from the selected frame and the node template comparison with selected fragments of the current frame chosen standard, but, as will be shown below, also require improvement. Results of the first experiment in support of a moving car for scenes with overlapping objects obstacles is shown in Figure 3a shows one of the frames from which was isolated and formed pattern, see Figure 3b. Some frames with dedicated red markers (frame) and the designator shown in Figure 3c. This test uses frames of the original file without pre-processing, the size of RGB-image frames - 281×126 resolution 8bit pattern 44×24 , and for comparison with the current template frame mode is used «Grayscale», so use a special type of converters, and image formats. To determine the quality of support was estimated number of frames with markers in a video, which was recorded as the video output of the project and who was using the application Vision Acquisition transformed into a set of 256 frames. Number of frames, in which a moving object (MO), was placed fully, equal to 135. Therefore, the proportion of frames in which the object is not specified, was $(135-88) / 135$, which corresponds to approximately 35%. And this in the case, where large relative to MO barrier to not.

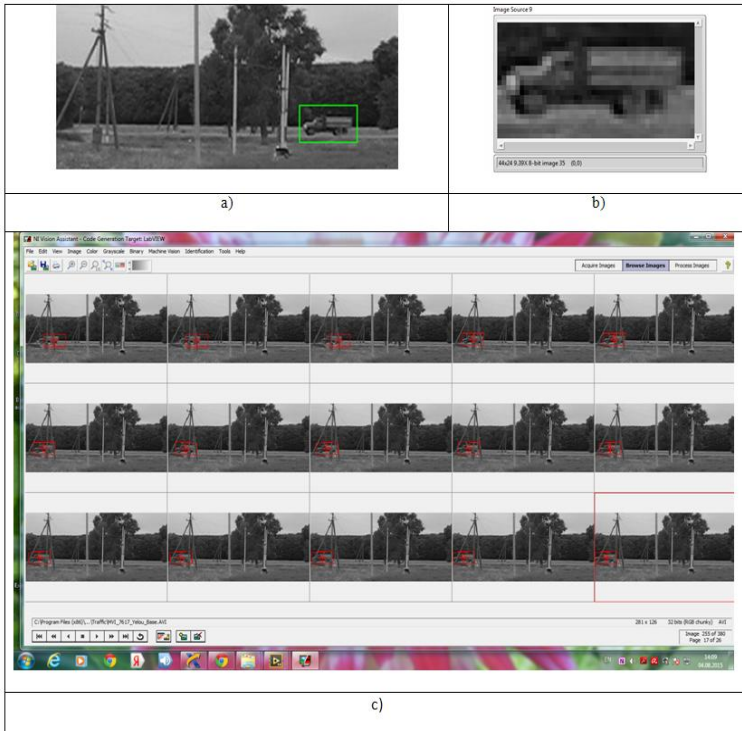


Figure 3 - Modeling results: a) -- One of the original frames; b) - Template; c) - Set of frames with markers and pointers of a moving object

Fourth, our experiment was to check the quality of the project in which we used a dynamic template and the results of which are shown. This experiment showed that such an approach has its advantages and disadvantages, but significant gain compared with the previous experiment does not (error rate was 15%). Further studies are needed.

Conclusions. Experiments in Mathcad have shown that the best option is the use of bit-map image processing and non-linear equivalence functions to align positioned comparing fragments of the difference current frame with the reference difference fragment representing the object of attention. The proposed tracking method implemented in the Labview- project, which allowed them to effectively carry out the simulation. Five different experiments with video-file showed, that application of equivalently image functions and difference frames gives good results combining recognition and consideration of moving objects in video and allows using image momentum features, set point and target designation follow this object.

References.

1. Vladimir G. Krasilenko, Alexander I. Nikolsky, Alexandr V. Zaitsev, Victor M. Voloshin, "Optical pattern recognition algorithms on neural-logic equivalent models and demonstration of their prospects and possible implementations", in Optical Pattern Recognition XII, David P. Casasent; Tien-Hsin Chao, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 4387 (SPIE, Bellingham, WA 2001), pp.247-260.

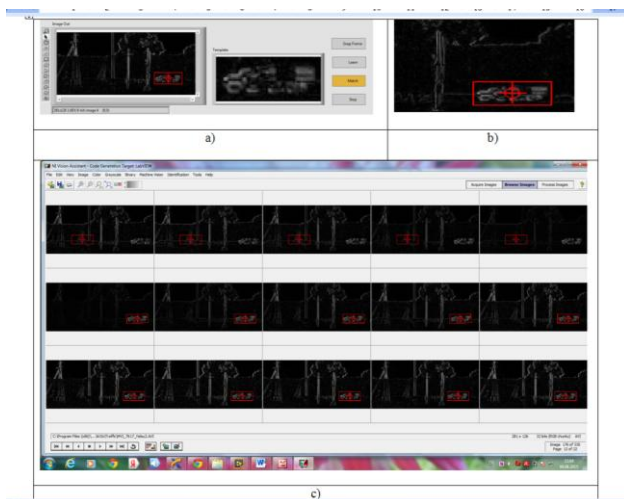


Figure 4. a) - Difference frame with selected object (left) and a pattern (right); b) - The enlarged area of selected object (difference); c) - Frames with selected object and with loss of the object.

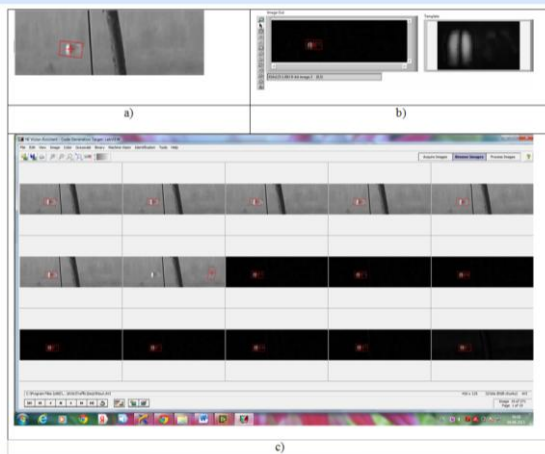


Figure 5. Modeling results: a) -- One of the original frames; b) - One difference from the frame array; c – A set of frames (the original seven and the remaining difference)

2. Vladimir G. Krasilenko, Alexandr I. Nikolsky, Yuriy A.Bozniak. Recognition Algorithms of Images of Multi-Character Identification Objects Based in Nonlinear Equivalent Metrics and Analysis of Experimental Dat Using Designed Software: The Eleventh All-Ukrainian International Conference, October 15-19, 2012. – P. 107-110.

3. Vladimir.G. Krasilenko, Modelling and comparative analysis of correlation and mutual alignment equivalence functions, /V.G.Krasilenko, Y.A. Boznyak, G.N. Berozov. Science and learning process: scientific and methodical. Proceedings Scientific Conference of the Faculty of Economics and VSEI Entrepreneurship University "Ukraine". - Vinnitsa: Vinnitsa Social Economy Institute of University "Ukraine", 2009. - P. 68-70.

MATHEMATICAL MODELING OF AIR POLLUTION ON THE STREETS OF CITY

T. Rusakova¹, M. Biliaiev²

¹ Dnipropetrovsk National University O.Gonchara, Dnipropetrovsk

² Dnipropetrovsk National University of Railway Transport
academician V.Lazaryana, Dnipropetrovsk

Formulation of the problem. Now a big interest exists in the problem of prediction of pollution the level on the streets of city. In this situation, there are two important tasks. The first task – is air pollution from traffic, stationary sources on the streets (emissions from small boiler houses, tubes from restaurants, cafes, etc.). The second task – is a prediction of air pollution on the streets when there are accidental emissions (fires at gas stations, accidental spills, etc.). There is the problem of creation the effective mathematical models that can fast calculate the degree of air pollution on the streets of city for different class of tasks. In this work we consider the scheme «street canyon».

Analysis existing solutions. At present the several classes of mathematical models are used for solution these tasks. The analytical models – the model Gaussian [1, 6] and the numerical models [1, 5, 7, 9]. Analytical models can calculate of concentration for stationary emissions and for accidental situations. These models have the big lack. They do not take the influence of buildings on the streets at the process formation of zone dispersion. The numerical models are based on Navier-Stokes equations take up much the computer time (several days). Therefore, they are not used for series calculations [8]. These numerical models are big problem of the modeling turbulence. Existing models of turbulence [8] give the poor results when modeling the flow around buildings. In Ukraine the normative methodology [2] used for calculate of air pollution but it does not take the influence of buildings on the transfer pollution in atmosphere.

The aim of work is the development of numerical models to estimate the level of air pollution from traffic emissions in the «street canyons» of city, which not takes much computer time for the routine calculations.

The mathematical model. The process of calculation of pollutant transfer on the streets taking into account the buildings is dividing into two steps. At the first step, the task solves for definition the speed wind field around the buildings. The model separated flows inviscid fluid [5] is used for the solution this task. In this case, the basic are the equation of transfer the vorticity (1) and Poisson equation for calculation of stream function (2) [5]

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

where $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ – vorticity; ψ – stream function; $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$, $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$.

The separation flow is taking place at corner points the buildings. When the flow is separating and the vortices are forming, then task arise for calculating their intensity. For solution this task is using the method which was discussed in work [5].

For these hydrodynamics equations are put the next boundary conditions. So, for Poisson equation on the surface obstacle is put a boundary condition "nonflow" [5]: $\psi=0$.

On the entrance border the air flow to a calculation domain is put his profile speed $u=f(y)$ and values of stream function ψ and of vorticity ω : $\psi|_{\text{inlet}}=\psi(y)$, $\omega|_{\text{inlet}}=\omega(y)$.

On the upper border of the calculation domain is put a condition "nonflow": $\psi=\text{const}$.

On the exit border the air flow out of the calculation domain are put the "soft" boundary conditions necessary for close the difference equations [5].

The solution of this hydrodynamic task is considered by method of fixed solution in the time. For that, at starting time $t=0$ for vorticity is put the starting condition of type: $\omega|_{t=0}=0$ or $\omega|_{t=0}=\omega_0(x,y)$.

After solution the equations (1) and (2) and the calculation of speed the wind flow beginning the solution of task about the transfer pollution on the streets (the second step). For modeling this process is using equation transfer pollution in atmosphere [3, 5].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

where C – concentration of pollutant; u, v – components of vector the speed wind; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – the coefficient of turbulent diffusion; Q – intensity of ejection pollutant; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$ – delta function of Dirak; x_i, y_i – coordinates of the emission source; σ – the coefficient taking the chemical decomposition pollutant; t – time.

The formulation of boundary conditions for this equation was considered in works [3, 5].

For the formation of view the calculation domain, of position the buildings, their form is used the method marking of the calculation domain [5]. The calculation is realized on rectangular difference grid.

The method of solution. For numerical integration the hydrodynamic equations are used the implicit difference schemes. So, for integration of transfer vorticity equation is applied the alternately-triangular difference scheme [4, 5].

The value of vorticity at every calculation step is considered as the formula «running account». The value of stream function is calculated with help of difference scheme the total approximation [4]. The numeric integration of equation transfer pollution is performed by an implicit difference splitting scheme [5] as of the method «running account».

The practical realization of model. The developed numerical model was used to calculate the concentration in the street for the scheme «street canyon» Fig. 1.

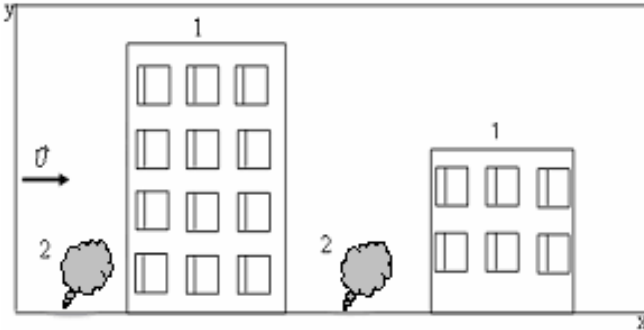


Fig. 1. Scheme of the calculation domain: 1 – buildings, 2 – place an accidental emission

Considered two scenarios. First scenario: the first building lower in height than the second (the first height of 6 m, length 16 m, height of the second 10 m, length 12 m). Second scenario: the first building above the second (height of the first 12 m, length 16 m, height of the second 6 m, length 12 m).

On the street there are two sources of NO_x emission intensity $Q=10\text{g}/(\text{m}\cdot\text{s})$; the first was located directly next to the first building, and the second – between the two buildings. The calculation was carried out with the following initial data: wind speed of 5 m/s; atmospheric diffusion coefficients $\mu_x=\mu_y=3\text{ m}^2/\text{s}$; dimensions of the computational domain: length 125 m, height 30 m. The initial background concentration NO_2 in the computational domain is zero. The results of the calculation are shown in Fig. 2 – 3.

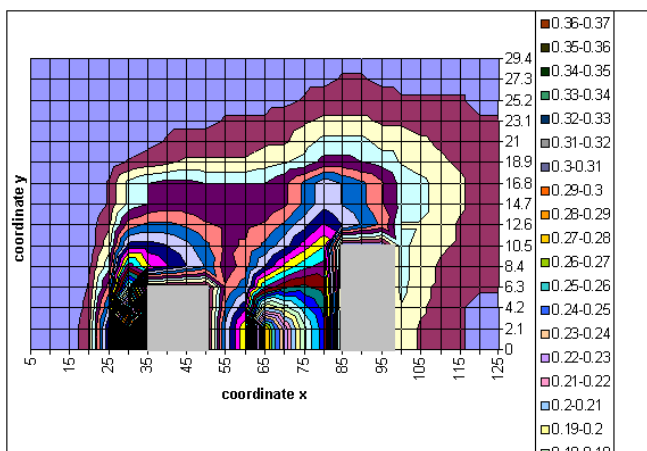


Fig. 2. Zone concentration [mg/m^3] air pollution at time $t=10$ s (first scenario)

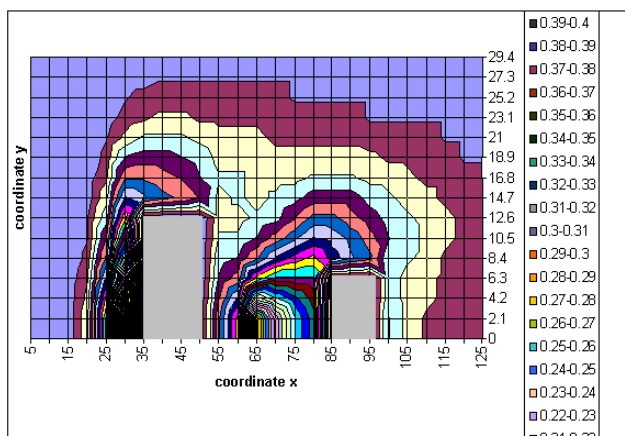


Fig. 3. Zone concentration [mg/m^3] air pollution at time $t=10$ s (second scenario)

Conclusions. Review the effectiveness of CFD model for the prediction of atmospheric pollution on the streets. The proposed model allows us to calculate the hydrodynamic of the wind stream in the flow around buildings and calculate dynamics of the pollution distribution in the «streets canyons» of city. A distinctive feature of the model is the consideration of the effect of hydrodynamics buildings and rapidity of her realization on the computer.

REFERENCES

1. Бруязкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязкий. – К. : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
2. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – К. : Наук. думка, 2001. – 33 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1982. – 320 с.
4. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М.: Наука, 1983. – 616 с.

5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Hanna, S. Air Quality Modeling Over Short Distances // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modeling: 16 May-3 June 1994. №SMR/760-2 – P. 712 – 743.
7. Biliaiev, M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / М. М. Biliaiev, М. М. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2012. Vol. 4. – P. 87 – 91.
8. Murakami, S. Comparison of “k-ε” model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model / S. Murakami, A. Mochida, H. Yoshihiko // 8th Intern. Conf. on Wind Engineering. – Western Ontario, 1991. – № 12. – P. 3.
9. Tedeschi, G. Study of vertical transport of marine aerosol using an unsteady 2D model / G. Tedeschi // Conference Abstracts of 31st NATO. SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and it's Application. – 2010. № 4.9. – P. 78 – 84.

**THE METHOD OF TAKAGI-SUGENO FOR NONLINEAR MODEL
COMPROMISE OF RULES
M. V. Skalozub**

National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan,
Dnepropetrovsk

This article represents the researching results of the problems of mathematical modeling and complex multicriterial control of economical, technological, informational, and other transport processes in cases where there are several different types of uncertainty in the characteristic estimations. So we have multiple uncertainties of the model parameters: randomness, imprecision, vagueness, interval estimation of the values and their combination [1]. In the most situations [2, 3] modeling and management are based on uncertainty homogeneous models or by switching to them. The development of the models and management procedures that are used correctly all available data from multiple sources, or in a different form, expands methods of system analysis and optimization of the complex control systems. In [4] developed the method and fuzzy statistical management procedures (FSM), which provide the unified framework in the classical model of fuzzy control [2] as a priori fuzzy and also accumulated statistical information. Also there are performed the improvement of the FSM methods and resources for the inhomogeneous and multiple fuzzy conditions.

The mathematical model formation is proposed to calculate as the geometric mean of the normalized patterns of the individual components:

$$d(x) = \left[d_{D_1^N}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2^N}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n^N}(\bar{x}_n) \right]^{1/n}. \quad (1)$$

The model consists of the uncertainties of different types – the confidence index ($d(x)$).

Further the confidence index is used in the output procedures, like the degree of affiliation in the processing of fuzzy variables [2, 4].

As a method of selecting the control, summarizing the results of the individual rules and the axioms built on the "relative concession" compromise [3], instead of a linear model of the "absolute assignment" compromise, as is used in the classical scheme of Takagi-Sugeno control (T-S) [2], in the module of repeatedly indeterminate T-S control is used a set of the rules:

$$R^{(1)} : IF(x_1 \text{ is } D_1^1 \text{ AND } x_2 \text{ is } D_2^1 \dots \text{ AND } x_n \text{ is } D_n^1), \text{ THEN } y_1 = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$R^{(N)} : IF(x_1 \text{ is } D_1^N \text{ AND } x_2 \text{ is } D_2^N \dots \text{ AND } x_n \text{ is } D_n^N), \text{ THEN } y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

where $R^{(k)}$ – separate rule; D_i – generalized form of the uncertain sets (fuzzy statistical [4] or multicomponent), which are different for the rules. The right side of the rule shows the function THEN for the input "signal" X_j . For management on the basis of (2) it is necessary to calculate the estimation for the value X_j and to calculate the "weight" of the each rule.

The rules of Takagi-Sugeno control module with axiomatic nonlinear multicomponent management are of the form (1), (2) where D_s – the generalized model under uncertainty. According to the scheme of T-S control unit calculates the "degree of rule compliance" — Mamdani, Larsen methods:

$$W^1 = \begin{cases} \min\{d_{D_1}(\bar{x}_1), d_{D_2}(\bar{x}_2), \dots, d_{D_n}(\bar{x}_n)\} \\ u \cdot v \\ d_{D_1}(\bar{x}_1) \cdot d_{D_2}(\bar{x}_2) \cdot \dots \cdot d_{D_n}(\bar{x}_n) = \prod_j d_{D_j}(\bar{x}_j) \end{cases} . \quad (3)$$

Then the functions $\bar{y}_1 = f^{(1)}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ are calculated by the estimated signals. Let us consider the question of generating an output signal of T-S control unit, which is performed according to [2]:

$$\bar{y} = \sum_{k=1}^N w^k \bar{y}_k / \sum_{k=1}^N w^k . \quad (4)$$

The control (4) summarizes the results of the individual rules based on the principle of absolute assignment [3]. The compromise (4) is suitable for the linear systems, and its restriction is the absence of a priori information about the relationship between the results of individual rules (2) in the solution (4).

Let us consider another multiplicative model of compromise rules (2), corresponding to the principle of relative concessions, which provides control with the formation of axiomatically defined set of solution properties according to (2) [3]. Then modified repeatedly generated indefinitely (1) Takagi-Sugeno management is formed. The activity assessment according to the rules (1), (3), (4) and the multiplicative model of aggregation of the rules' conclusions (2) are used. For formation of the model structure to determine the value of compromise T-S control it is necessary to find a generalized functional on the basis of the account of the particular values (2) $Y_j(k)$, $j=1,2,\dots,m$. During formulating a "fair" compromise model $\{Y_j(k)\}_m$ it has been taken into account the following properties of the control: symmetry (equality Y_j), the deviation of group estimates, the value of the each $Y_j : Y_j^*(k_j)$. Such a compromise of values $Y_j(k)$, $j=1,2,\dots,m$ determined by the relative concessions model [3], considering the parameter

$$\lambda_j = (Y_j^*(k_j) - Y_j^c(k_c)) / \max\{Y_j^*, Y_j^c\}, \quad (5)$$

as a compromise value and calculated as the product of a generalized function of the form:

$$\prod_{i=1}^b \lambda_i = \prod_{i=1}^m Y_i^c(k_c) \Rightarrow \max_{k_c} , \quad (6)$$

the values of which further are maximized in the problems of optimal control choice.

In (5), (6) the value Y_j is indicated the function value according to (2), (3), k_c – the number of iteration of the compromise model (5) for Takagi-Sugeno control $k_c = 1$. In accordance to (5), (6) we obtain the modified method of Takagi-Sugeno control:

$$Y = \sum_i \omega_i \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n Y_i^{\omega_i}} , \quad (7)$$

where n – the number of active output rules; y_i – output functions resulting from the findings by the rule i ; ω_i – the degree of uncertainty of the rule 'i' (2). By normalized the degrees of uncertainty according to $\omega_i / \sum \omega_i$ the model (1) is simplified, taking the form (6). Note that the control model (6) and (7) implement fuzzy nonlinear approximation (multicomponent uncertain - (1)) values.

New MATLAB modified units were created and applied for the proposed methods, modeling and control procedures with regards to the conditions of multiple parameter uncertainty transport systems.

References

1. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования / Б. Лю; Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. – 416 с.
2. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. –452с.
3. Емельянов С.В., Борисов В.И., Малевич А.А. Модели и методы векторной оптимизации // В сб. Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. - М. Изд. ВИНТИ, т. 5, 1983. - С. 386 – 448.
4. Скалозуб В.В. Метод и информационные технологии нечетко-статистического управления. Системні технології, 1' (50), 2008. С. 120 – 127. skalozub.m@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ СОЗДАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Ф.М. Алпатов

Национальный технический университет Украины«КПИ», Киев

Существуют различные оценки принципиальной возможности решения энергетической проблемы с помощью источников возобновляемой энергии, в том числе энергии Солнца. Обоснованная оценка этой проблемы принадлежит академику П.Л. Капице [1,2]. Все энергетические процессы сводятся к трансформации одного вида энергии в другой. Трансформация энергии обычно происходит в некотором объеме, в который через поверхность поступает один вид энергии, а выходит другой. Математически плотность потока энергии описывается вектором Умова-Пойнтинга.

$$\mathbf{U} = \mathbf{v}\mathbf{F} \quad (1)$$

где \mathbf{v} - скорость распространения процесса, \mathbf{F} – объемная плотность энергии.

Плотность энергии, поступающей в объем, ограничена скоростью \mathbf{v} , которая определяется свойствами проводящей среды. Анализ показывает, что ограничение плотности потока энергии вынуждает отказаться от применения весьма эффективных способов преобразования энергии в энергетике больших мощностей. Тем не менее интерес к использованию источников возобновляемой энергии возрастает, в том числе к преобразованию энергии солнечного излучения.

Компьютерное моделирование процессов преобразования солнечной энергии в электрическую и тепловую является удобным инструментом при выборе проектных параметров технологических процессов и соответствующего оборудования при разработке источника возобновляемой энергии на основе преобразования энергии излучения Солнца. Актуальность таких разработок возрастает в связи с нарастающими проблемами энергообеспечения населения нашей планеты. Существует устойчивая во времени тенденция снижения стоимости нетрадиционных возобновляемых источников энергии, обусловленная научными достижениями в совершенствовании методов их использования, и тенденция повышения стоимости традиционных ископаемых источников энергии, вызванная их истощением и усложнением технологии добычи. В первую очередь это относится к преобразованию солнечной энергии в электрическую или тепловую. Солнечная радиация является практически неисчерпаемым источником энергии. Земли достигает лишь незначительная часть излучаемой Солнцем энергии. Около 95% солнечной энергии имеет вид коротковолнового излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 2,4 мкм.

Солнце имеет диаметр 1392 тыс. км. Его масса равна 2·1030 кг. Химический состав Солнца: 81,76% водорода, 18,14% гелия и 0,1% азота. Средняя плотность вещества Солнца равна 1400 кг/м³, а в его центре она достигает 76000 кг/м³. Мощность потока солнечного излучения составляет 4·10²³ кВт. Температура фотосферы на поверхности Солнца – около 5900 К. Верхней границы атмосферы Земли за год достигает количество солнечной энергии, равное 5,6·10²⁴ Дж.

Атмосфера Земли отражает 35% этой энергии ($1,9 \cdot 10^{24}$ Дж). Остальная энергия расходуется на нагрев земной поверхности (около $2,4 \cdot 10^{24}$ Дж), испарительно-осадочный цикл (около $1,3 \cdot 10^{24}$ Дж), образование волн в морях и океанах, воздушных и океанских течений и ветра (около $1,2 \cdot 10^{22}$ Дж). Мощность потока солнечного излучения у верхней границы атмосферы Земли равна $1,78 \cdot 10^{17}$ Вт, а на поверхности Земли $1,2 \cdot 10^{17}$ Вт.

Плотность потока солнечной энергии у верхней границы атмосферы через поверхность, расположенную нормально к направлению солнечных лучей, равна 1353 Вт/м². Эта величина называется солнечной постоянной. Среднее количество энергии, поступающей за 1 час на 1 м² этой поверхности, равно 4871 кДж. Движение Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите приводит к изменению расстояния между Землей и Солнцем. В течение года оно изменяется в пределах 150 млн. км. Вследствие этого количество солнечной энергии, поступающей на 1 м² нормальной поверхности, изменяется в течение года менее чем на 7%. Количество солнечной энергии, поступающей на Землю в течение года, составляет $1,05 \cdot 10^{18}$ кВт·ч. На поверхность суши приходится только 20% этой энергии, то есть $2 \cdot 10^{17}$ кВт·ч. Часть энергии проявляется в виде ветра: $1,58 \cdot 10^{16}$ кВт·ч в год. Без ущерба для природы можно использовать до 1,5% всей попадающей на Землю солнечной энергии, то есть около $1,62 \cdot 10^{16}$ кВт·ч в год. Это эквивалентно $2 \cdot 10^{12}$ т условного топлива.

Распределение потока солнечной радиации на поверхности земного шара крайне неравномерно. Количество солнечной энергии, поступающей за год на 1 м² поверхности Земли, изменяется, в зависимости от географической зоны, приблизительно от 3000 МДж/м² до 8000 МДж/м². Среднегодовое количество солнечной энергии, поступающей за 1 день на 1 м² поверхности Земли, в зависимости от географической зоны, колеблется от $7,2$ МДж/м² до $21,4$ МДж/м² [3]. Пиковая плотность потока солнечной энергии достигает 1 кВт/м². Солнечное излучение у верхней границы земной атмосферы приблизительно соответствует излучению абсолютно чёрного тела с температурой 5900 К. Спектр излучения включает в себя ультрафиолетовое излучение с длиной волны от $0,2$ до $0,4$ мкм, видимый свет с длиной волны от $0,4$ до $0,78$ мкм и инфракрасное излучение с более длинными волнами. Максимум интенсивности солнечного излучения приходится на длину волны $0,5$ мкм. В процессе прохождения солнечных лучей сквозь атмосферу Земли часть солнечного излучения рассеивается и поглощается молекулами озона, воздуха, водяного пара и частицами пыли. В результате прямое солнечное излучение ослабляется и появляется диффузное, рассеянное излучение. Часть энергии, поглощенной и рассеянной в атмосфере, излучается в космическое пространство. Основной поток солнечной энергии достигает поверхности Земли в виде рассеянного, диффузного излучения. Доля диффузного излучения в общем потоке поступающей солнечной радиации зависит от географических и климатологических факторов и изменяется в течение года.

Преобразование энергии в фотоэлектрических преобразователях происходит за счет фотовольтаического эффекта, имеющего место в неоднородных полупроводниковых структурах при воздействии на них солнечного излучения. Кремниевые солнечные элементы – нелинейные устройства. Их действие нельзя описать линейной зависимостью типа закона Ома. Для этой цели используются вольтамперные характеристики. Эффективность преобразования зависит от температуры. При нагреве элемента на один градус выше 25°C вырабатываемое им напряжение снижается на $0,002$ В. При интенсивном солнечном освещении элементы нагреваются до $60-70^\circ\text{C}$, при этом напряжение на каждом из них падает на $0,07-0,09$ В. Это основная причина снижения коэффициента полезного действия солнечных элементов, который колеблется в пределах $10-16$ %. Общепринятые стандартные условия для паспортизации элементов следующие:

- освещенность 1000 Вт/м²;
- температура 25°C ;
- спектр АМ 1,5 (солнечный спектр на широте 45°).

Технические и связанные с ними экономические характеристики фотоэлектрической станции в основном определяются солнечными батареями: материалами, из которых они изготовлены и технологией изготовления. В себестоимости фотоэлектрической станции доля себестоимости батарей достигает 60% и более. Основные структурные компоненты солнечной батареи – солнечные элементы. По двум признакам – материалу и технологии изготовления – они делятся на кремниевые (объемные, тонкопленочные) солнечные элементы и солнечные элементы

на основе соединений A_2B_2 , $CdS/CdTe$, A_3B_5 и др. В зависимости от вида структуры применяемого материала солнечные элементы подразделяют на кристаллические, поликристаллические и аморфные. Наибольшее применение в настоящее время получили солнечные элементы на основе монокристаллического кремния. Это обусловлено наличием хорошо отработанной технологии получения кремния и выращивания $p-n$ переходов, высоким коэффициентом полезного действия, повышенной стабильностью и надежностью. Основные характеристики преобразователей описываются аналитическими зависимостями. Величина установившейся фото ЭДС при освещении перехода излучением постоянной интенсивности описывается уравнением вольтамперной характеристики [4]:

$$U = (kT/q) \ln(1 + (I_p - I) / I_s) \quad (2)$$

где I_p – фототок, I_s – ток насыщения.

Фототок описывается равенством

$$I_p = SN_0Q, \quad (3)$$

где S – площадь фотоэлемента, N_0 – количество созданных светом электронно-дырочных пар, $Q < 1$ – коэффициент, показывающий, какая доля этих пар собирается $p-n$ переходом.

Уравнение вольтамперной характеристики справедливо при освещении фотоэлемента светом произвольного спектрального состава. Изменение спектра отражается изменением значения фототока. Максимальная мощность, снимаемая с 1 см^2 фотоэлектрического преобразователя равна

$$P = I_p U, \quad (4)$$

или

$$P = \chi I_c U_{xx}, \quad (5)$$

где χ – коэффициент формы вольтамперной характеристики, I_c – ток короткого замыкания, U_{xx} – напряжение холостого хода.

Коэффициент полезного действия элементов на основе $c\text{-Si}$ достигает 26%. Коммерческие образцы солнечных элементов на основе $c\text{-Si}$ имеют эффективность 14-17%, а на поликристаллической основе – 12-14%. В сфере тонкопленочных солнечных элементов наибольшее развитие получили технологии аморфного кремния; $CdS/CdTe$; CIS ($CuInSe_2$). Аморфный гидрогенизированный кремний ($a\text{-Si:H}$) – один из основных материалов солнечной энергетики[5]. Солнечные батареи из $a\text{-Si:H}$ обладают рядом преимуществ: большим значением напряжения холостого хода, возможностью нанесения на большие площади, возможностью использования в качестве подложек различных материалов (стекла, нержавеющей стали, полиамида), низкой стоимостью. Наивысшая эффективность солнечных элементов на основе $a\text{-Si:H}$ (13%) получена на элементе с тройным $p-i-n$. Основные задачи в области технологии $a\text{-Si:H}$ – это повышение стабильности параметров при создании многопереходных солнечных элементов и повышение их эффективности, табл. 1 [6].

Выпускаются солнечные батареи на основе $CdS/CdTe$, имеющие коэффициент полезного действия, равный 8% и обладающие высокой стабильностью. Эффективность отдельных экспериментальных образцов достигает 15-16%.

Таблица 1. Технико-экономические характеристики солнечных элементов

Материал	1995		2000		2010	
	Эффективность	Цена	Эффективность	Цена	Эффективность	Цена
Монокристаллический кремний	15	2,40	18	2,00	22	1,50
Поликристаллический кремний	14	2,25	16	1,95	20	1,45
Аморфный кремний	7 - 9	2,00	10	1,20	14	0,75

Заключение. Возобновляемые источники энергии являются актуальным и перспективным направлением исследования. Активно развиваются преобразователи солнечной энергии, в направлении повышения эффективности преобразования энергии излучения Солнца и снижения удельной стоимости. Актуальным является использование комбинированных источников, например, тепловых аккумуляторов, тепловых труб и солнечные батареи. Основной проблемой, которая сдерживает развитие солнечной энергетики, является низкая плотность энергии излучения Солнца. Один из путей преодоления этой проблемы использование концентраторов солнечной энергии.

Список литературных источников

1. Капица П.Л. Глобальные проблемы и энергия. Лекция, прочитанная в Стокгольмском университете. // П.Л. Капица. /Теория, эксперимент, практика. Статьи, выступления. – М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит., 1981. – С. 430-445.

2. Капица П.Л. Энергия и физика. Доклад на научной сессии, посвященной 250-летию Академии Наук СССР. // П.Л. Капица. Теория, эксперимент, практика. Статьи, выступления. – М.: Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит., 1981. – С. 97-109..

3. Марк Томас. Развитие возобновляемой энергетики в Европейском Союзе. http://intersolar.ru/home_r.shtml

4. Карабинов С.М Основные направления развития технологической базы фотовольтаических энергетических систем

http://www.transgasindustry.com/ren_e_s/solar_e2/solar1.shtml

5. Yang J., Banerjee A., Lord K., Guha S. Correlation of Component Cells with High Efficiency Amorphous Silicon Alloy Triple-Junction Solar Cells and Modules. - Proc. of the 2nd World Conferenc and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion.

6. Macock. International Photovoltaic Markets, Development and Trends Forecast to 2010. - 1st WCPEC, Hawaii, 1994.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОЧИСТКИ СИРОПОВ В КРАХМАЛОПАТОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

М.В. Андриянов, О.В. Черваков, В.А. Головенко, Н.Л. Гуревина

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

В настоящее время при производстве глюкозных или глюкозо-фруктозных сиропов существует проблема их цветности. Особенно это важно в тех случаях, когда сироп в дальнейшем используется для получения различных видов пищевых продуктов, где предъявляются высокие требования к цветности.

Так, на некоторых предприятиях очистка и последующее обесцвечивание сиропов осуществляется при помощи перлитового адсорбента и активированного угля. Однако такая обработка не достаточно эффективна. После термостатирования сиропа, обработанного вышеуказанным способом, цветность его значительно увеличивается.

Ранее нами было показано, возможность эффективного обесцвечивания сиропов глюкозы при использовании ионообменных смол отечественного производства [1]. В ходе работы было установлено, что наилучший эффект обесцвечивания достигается при использовании комбинированной системы катионит: анионит отечественного производства КСМ-2:АНС (соотношение 1:1). Однако рН сиропа глюкозы в процессе обесцвечивания постепенно уменьшается ниже значения, допустимого требованиями ДСТУ.

В связи с этим целью данной работы было установление оптимального значения рН и цветности путем подбора оптимального соотношения катионит: анионит, варьируя температурой процесса обесцвечивания и скоростью фильтрации. Для этого было осуществлено планирование эксперимента методом полного трехфакторного эксперимента.

В качестве основных факторов были выбраны:

X_1 – количество см³ катионита к 1 см³ анионита;

X_2 – температура процесса, °С;

X_3 – скорость фильтрации, мл/мин.

Варьирование данных факторов обуславливает основные процессы, характерные для технологии ионообменного обесцвечивания сиропов. Пределы изменения исследуемых факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Пределы изменения факторов

Уровень планирования	Пределы изменения		
	X_1	X_2 , °С	X_3 , мл/мин
Основной уровень	0,85	70	4
Интервал варьирования	0,15	10	2
Верхний уровень	1,0	80	6
Нижний уровень	0,7	60	2

Выбор пределов изменения факторов основан на требованиях ДСТУ действующих предприятий крахмалопаточной промышленности, а также по предварительной серии экспериментов.

В качестве критериев оценки влияния исследуемых факторов выбраны основные характеристики сиропов:

Y_1 – цветность сиропа глюкозы, ед. опт. пл.;

Y_2 – рН сиропа глюкозы.

Программа исследования была заложена в матрицу планирования:

Таблица 2 - Матрица планирования и результаты эксперимента

Кодированные значения факторов			Натуральные значения факторов			Y_1		Y_2	
X_1	X_2	X_3	X_1	X_2	X_3	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 1	Опыт 2
-1	-1	-1	0,7	60	2	0,0012	0,0013	5,19	5,17
+1	-1	-1	1,0	60	2	0,0048	0,0049	4,37	4,38
-1	+1	-1	0,7	80	2	0,0025	0,0023	5,22	5,23
+1	+1	-1	1,0	80	2	0,008	0,0083	4,49	4,5
-1	-1	+1	0,7	60	6	0,0018	0,0017	5,18	5,16
+1	-1	+1	1,0	60	6	0,0054	0,0058	4,35	4,33
-1	+1	+1	0,7	80	6	0,0025	0,0028	5,24	5,25
+1	+1	+1	1,0	80	6	0,0081	0,0082	4,55	4,52

При обработке результатов экспериментов проверка однородности дисперсии осуществлялась по критерию Кохрена, значимость коэффициентов уравнения регрессии – по критерию Стьюдента, адекватность уравнений – критерию Фишера.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены уравнения регрессии, адекватно описывающие влияние исследуемых факторов на процесс обесцвечивания сиропов:

$$Y_1 = 0,00435 + 0,00234 \cdot X_1 + 0,00099 \cdot X_2 + 0,00019 \cdot X_3 + 0,00048 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,00013 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$Y_2 = 4,82 - 0,38 \cdot X_1 + 0,055 \cdot X_2$$

Анализ уравнений регрессии позволил выделить факторы, влияющие на процесс обесцвечивания сиропов. Так, на цветность сиропов и рН среды наибольшее влияние оказывает количество катионита в комбинированной системе катионит: анионит и температура процесса. Скорость фильтрации в исследуемом диапазоне влияет на цветность сиропов, и не влияет на их показатель рН.

Таким образом, для описания технологических характеристик обесцвечивания сиропов глюкозы при использовании ионообменных смол отечественного производства КСМ-2:АНС можно использовать рассчитанные уравнения регрессии.

Список литературных источников

1. The use of ion-exchange resins for foodstuff water solutions purification / Andrianova M.V., Chervakov O.V., Zontov A.V. // Ukrainian-Polish scientific conference «Membrane and Sorption Processes and Technologies» (1-3 December 2014). – Kyiv: National university of Kyiv-Mohyla Academy, 2014. – С.92-93.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АКУМУЛЮЮЧОГО БУНКЕРА СИСТЕМ ПІДЗЕМНОГО КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ

Ю.В. Бабенко

Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ

Акумуляючі бункери набули широкого поширення в системах підземного конвеєрного транспорту (СПКТ) вугільних шахт, оскільки призначені для забезпечення незалежної роботи суміжних технологічних ланок транспорту в періоди їх аварійних відмов у роботі або зупинок з тієї чи іншої причини, а також для зменшення впливу простоїв конвеєрних ліній на роботу очисних і підготовчих заобів [1]. Застосування акумуляючих бункерів в СПКТ дозволяє значно підвищити пропускну здатність і надійність їх роботи.

Навність математичних моделей [2 – 4] не завжди дає змогу адекватно провести тестування роботи складних об'єктів. Тому в роботі запропоновано розробити імітаційну модель акумуляючого бункера, яка дозволить провести необхідні тестування, які маже неможливо відтворити в реальному житті через їхню багатовартісність.

В пакеті побудови імітаційних моделей Anylogic була створена імітаційна модель акумуляючого бункера, зображена на рисунку 1.

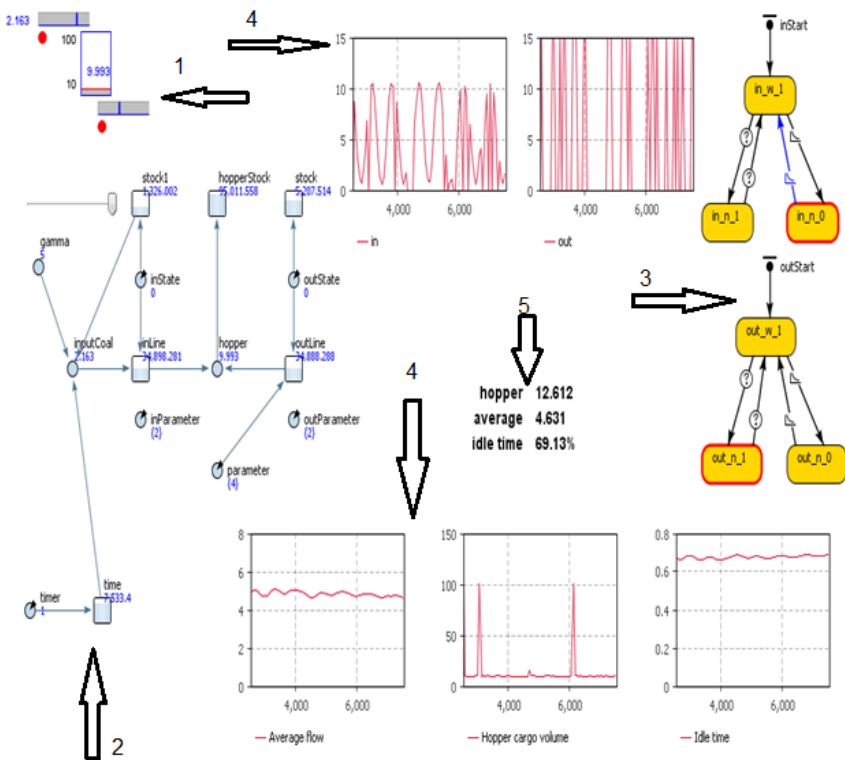


Рисунок 1 – Імітаційна модель акумуляючого бункера

Дана імітаційна модель складається з наступних змістовних блоків: 1) графічного зображення акумуляючого бункера, 2) графу зв'язків, 3) графу станів, 4) графіків, які показують

середнє значення вантажопотоку, об'єм вантажу в бункері, час простою бункера, вхідний та вихідний вантажопотоки, 5) текстової інформації про поточне значення вантажу в бункері, об'єм транспортованого вантажу, а також час простою.

На основі цієї імітаційної моделі було проведено тестування її роботи при різних параметрах: варіювався вхідний вантажопотік та швидкість живильника.

За результатами роботи імітаційної моделі можна зробити наступні висновки:

1. Зі збільшенням швидкості живильника, середній об'єм вантажу в бункері суттєво знижується. Це пов'язано з тим, що вантаж не встигає накопичуватися в бункері, бо швидкість вхідного вантажопотоку значно менша за швидкість живильника. Проте варто відзначити, що для випадку коли швидкість живильника максимальна, кількість вантажу в бункері знаходиться майже на мінімально допустимому рівні, тобто бункер майже порожній.

2. Зі збільшенням швидкості живильника час простою збільшується, бо вхідний вантажопотік не встигає наповнювати бункер достатньою кількістю вантажу, яка б перевищувала мінімально допустимий рівень вантажу в бункері.

3. На значення середнього вихідного вантажопотоку зміна швидкості живильника майже не вплинула.

Список літературних джерел

1. Черкесов Г. Н. Надежность технических систем с временной избыточностью / Г. Н. Черкесов. – М.: Советское радио, 1974. – 296 с.
2. Кирия Р.В. Математическая модель функционирования аккумулирующего бункера в режиме поддержания в нем объема груза в заданных пределах / Р.В. Кирия, Т.Ф. Мищенко, Ю.В. Бабенко // Наукові вісті. Сучасні проблеми металургії. №15 (2012). Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. – С. 85-96.
3. Кирия Р.В. Исследование процесса функционирования аккумулирующего бункера / Р.В. Кирия, Ю.В. Бабенко, А.И. Михалёв // Материалы международной научной конференции. «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта». Евпатория, 2013. – С. 159-162.
4. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем / В. Я. Копп. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – 700 с.

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ОСВІТНІХ ВИМІРЮВАНЬ В.С. Бахрушин

Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя

Вступ. До основних завдань освітніх вимірювань належать об'єктивне оцінювання здобувачів освіти, науково-педагогічних працівників, закладів освіти, глобальних та регіональних освітніх систем. Найбільш відомими засобами освітніх вимірювань є педагогічні тести та університетські рейтинги. Для їх розробки і вдосконалення, а також для обробки первинних даних широко використовують сучасні програмні засоби та методи комп'ютерного моделювання.

Моделювання ЗНО. В цій роботі із застосуванням системи R виконане імітаційне моделювання зовнішнього незалежного оцінювання (ЗНО). Побудована модель передбачала генерування вибірок псевдовипадкових чисел, розподіл яких був наближеним до типових результатів реальних тестів ЗНО. На другому етапі виконувалася обробка цих вибірок за методиками ЗНО 2015 та попередніх років, а також за деякими іншими методиками. Одним із головних завдань цього моделювання був пошук методики обробки результатів тестування, яка б надавала можливість використовувати результати ЗНО минулих років при вступі до вищих навчальних закладів без суттєвого порушення порівнянності підсумкових конкурсних балів. Основними причинами незіставності балів ЗНО різних років є неконтрольовані варіації складності тестів та рівня підготовленості абітурієнтів. Для усунення першої з них первинні бали ЗНО нормалізують і перераховують за допомогою рейтингової шкали підсумкових балів. За умови однаковості вибірок абітурієнтів різних років це дає змогу забезпечити порівнянність їх

підсумкових оцінок. Але, якщо між вибірками є істотні відмінності, то така зіставність порушується. Як свідчать результати імітаційного моделювання, стандартне відхилення розкиду підсумкових балів, зумовлене випадковими коливаннями рівня підготовки абітурієнтів, можна істотно зменшити шляхом переходу від рейтингового порогу успішності, який використовувався у минулої роки, до фіксованого порогу, що визначається методами експертного оцінювання. Ще більшого покращення результатів можна досягти при використанні двох фіксованих порогів – порогу успішності та порогу якості, який може бути встановлений на рівні межі між задовільними і хорошими результатами тестування. Результати для деяких типів розподілу вихідних даних наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Стандартні відхилення підсумкових балів, зумовлені варіацією рівня підготовки абітурієнтів

Розподіл	Ступень варіації рівня підготовки абітурієнтів			
	1	2	3	4
Unif, 1r	0,74 – 1,34	1,18 – 1,54	1,71 – 2,32	2,05 – 3,67
Unif, 1	0,43 – 0,46	0,86 – 0,87	1,24 – 1,27	1,66 – 1,69
Unif, 2	0,35 – 0,40	0,67 – 0,70	1,02 – 1,10	1,35 – 1,48
Norm, 1r	0,84 – 0,88	1,18 – 1,30	1,55 – 1,70	1,72 – 1,78
Norm, 1	0,47 – 0,48	0,75 – 0,82	1,04 – 1,11	1,28 – 1,35
Norm, 2	0,35 – 0,40	0,65 – 0,69	0,85 – 0,91	1,01 – 1,12
2Norm, 1r	0,71 – 0,85	1,17 – 1,31	1,49 – 1,69	1,70 – 1,81
2Norm, 1	0,40 – 0,44	0,67 – 0,72	0,94 – 1,02	1,19 – 1,30
2Norm, 2	0,34 – 0,35	0,57 – 0,62	0,78 – 0,84	0,95 – 0,98

У таблиці використано такі позначення. Unif, Norm, 2Norm – типи розподілу: відповідно, рівномірний, нормальний та суміш двох нормальних; 1r, 1, 2 – один ранговий поріг успішності, один фіксований поріг успішності, фіксовані пороги успішності та якості.

На рис 1 наведено приклад відповідності між первинними та підсумковими балами для 100 серій вибірок, що відповідають суміші двох нормальних розподілів.

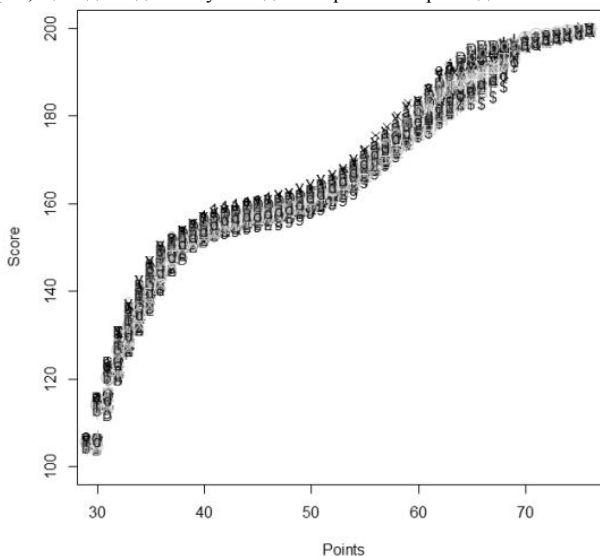


Рисунок 1 – Відповідність між первинними та підсумковими балами для 100 серій вибірок, що відповідають суміші двох нормальних розподілів

Моделювання оцінок, що розраховуються як лінійна згортка окремих показників.

Друга проблема, що розглядалася – це побудова оцінок за допомогою методу лінійної згортки окремих показників. Цей метод використовують, зокрема, для побудови конкурсних балів абітурієнтів при вступі до вищих навчальних закладів, а також при розрахунку найбільш відомих університетських рейтингів. Одним з його недоліків є висока чутливість до вибору вагових коефіцієнтів, а також до похибки визначення значень первинних показників. У роботі отримано оцінки варіації конкурсних балів та рейтингів абітурієнтів, зумовлені варіаціями вагових коефіцієнтів, а також оцінки статистичної похибки рейтингів університетів, пов'язані із статистичними похибками вихідних показників.

Вплив вагових коефіцієнтів ілюструє рис. 2, де зображено різницю між результатами розрахунку рейтингів абітурієнтів за двома формулами, що використовувалися різними українськими університетами при вступі на спеціальність «Системний аналіз». Як вихідні дані було взято показники абітурієнтів 2015 р. у Національному університеті «Київський політехнічний інститут», наведені на сайті vstup.info. Отримані результати свідчать про дуже високий вплив вагових коефіцієнтів на рейтинг, у тому числі і для абітурієнтів що мають високі результати ЗНО. Це підтверджує важливість і актуальність проблеми вибору вагових коефіцієнтів (і у ширшому розумінні – формули розрахунку конкурсного бала) для провідних українських університетів. А також актуальність врахування вагових коефіцієнтів абітурієнтами при визначенні пріоритетів під час подання заявок на вступ до вищих навчальних закладів.

Для моделювання впливу похибок значень вихідних показників на університетські рейтинги використовували випадкові послідовності первинних показників, розподіл яких був близьким до розподілу показників рейтингу ТОП-200 університетів України і містив нормально розподілену випадкову компоненту. На рис. 3 зображено вплив статистичної похибки на розкид підсумкових значень рейтингу для різних стандартних відхилень випадкової компоненти, близьких до оцінок похибок реальних даних у роботі [1], які свідчать про її дуже високий вплив на підсумкові результати.

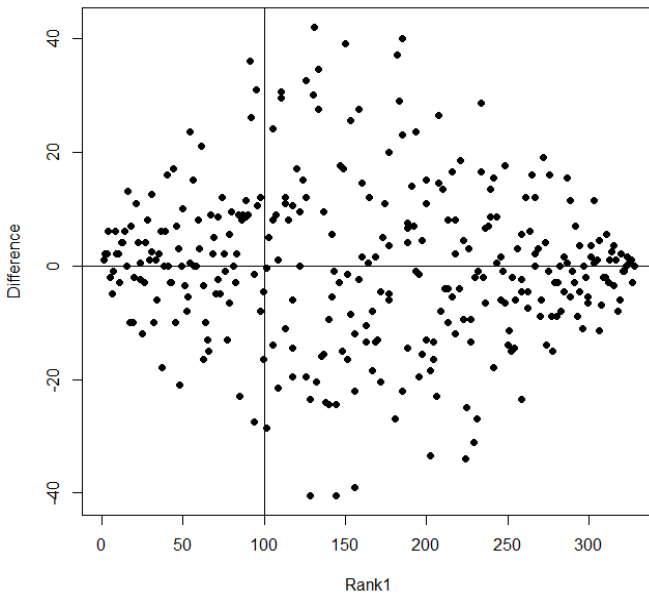


Рисунок 2 - Різниця рейтингів абітурієнтів при розрахунку конкурсного бала за однаковими балами сертифікатів ЗНО з використанням різних вагових коефіцієнтів

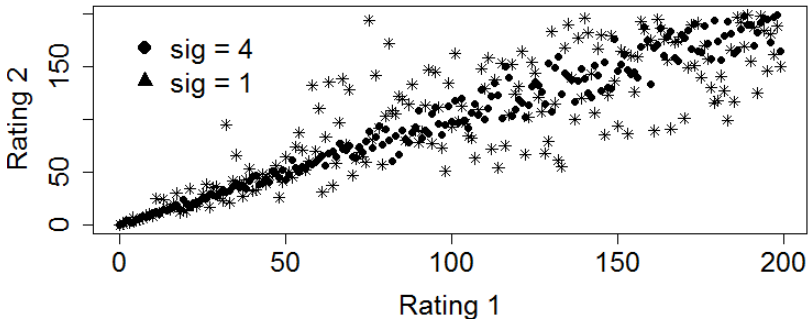


Рисунок 3 - Вплив статистичної похибки на розкид підсумкових значень рейтингу

Висновки. Отримані результати підтверджують доцільність використання імітаційного моделювання при розробці методик освітніх вимірювань. За результатами моделювання можна рекомендувати використання двох фіксованих порогів при визначенні результатів ЗНО, які б відповідали межах між задовільними і незадовільними та задовільними і хорошими результатами. Отримані результати свідчать про необхідність врахування чутливості оцінок, одержуваних методами лінійної згортки, до різних факторів під час проектування методик освітніх вимірювань.

Список літературних джерел

1. Бахрушин В. Статистичний аналіз рейтингів українських університетів / В.С. Бахрушин // Освіта і управління. – 2011. – Т. 11, № 2 – 3. – С. 30 – 37.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ УПЛОТНЕНИЯ И УПРУГИМ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕМ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ БРИКЕТИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

К.В.Баюл, А.Ю.Худяков, С.В.Вашенко

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ), Днепропетровск

Одним из показателей качества брикетов является отсутствие визуально определяемых дефектов в виде трещин и сколов, которые приводят к резкому ухудшению их прочностных свойств или к полной непригодности для дальнейшего применения. Одной из причин возникновения различных типов дефектов – макро- и микротрещин, расслоений, сколов, снижения прочности, плотности и др., возникающих в брикетах на стадии их выхода из формующих элементов валковых прессов, является упругое последствие.

Актуальной задачей имеющей как теоретический интерес, так и практическую ценность, является разработка экспериментально-аналитического метода прогнозирования упругого последствия при использовании формующих элементов различной конфигурации и размеров, оценки его влияния на характеристики брикетов, который позволит определить рациональные параметры формующих элементов, обеспечивающих достижение необходимой плотности брикетов с учетом их упругого расширения. Для решения указанной задачи специалистами ИЧМ сформулирована концепция, состоящая в экспериментально-аналитическом исследовании величины и характера упругого последствия в брикете на основе анализа напряженно-деформированного состояния на разных стадиях уплотнения, построения полей напряжения и соответствующих эпюр распределения упругого расширения и характеристик уплотнения для различных конфигураций формующих элементов.

Первым этапом на пути реализации принятой концепции являются экспериментальные исследования и получение массива данных для установления связей между характеристиками уплотнения шихт и упругим последствием.

Для проведения исследований использованы мелкофракционные материалы (фр. -3мм), которые относятся к трем группам созданной в ИЧМ систематизации [1]. Эти материалы (табл.1) характеризуются различной степенью чувствительности к внешним уплотняющим силовым воздействиям, что позволяет считать полученные результаты исследований справедливыми для широкого круга материалов.

Для проведения экспериментов по установлению параметров уплотнения исследуемых материалов использовались: гидравлический пресс ЦД-10 усилием прессования до 10тс, прессформа с диаметром матричного канала $30 \pm 0,1$ мм и пуансоны с плоскими торцами.

Прессование брикетов из принятых шихт осуществлялось в диапазоне давлений прессования p_i от 10 до 100МПа с шагом Δp 10МПа. Диапазон давлений прессования от 0 до 10МПа при проведении экспериментов не принимался во внимание, так как он соответствует начальной стадии уплотнения шихты с преобладанием структурных деформаций, включающих перераспределение частиц. На данной стадии шихта еще не сформирована в полноценный брикет и представляет собой предуплотненное рыхлое тело, измерение геометрических параметров которого является затруднительным, дает большую погрешность и с практической точки зрения не представляет значительного интереса.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых материалов

Характеристики материала	Материал		
	Торф	Каолин	Марганцевый концентрат
Влажность W , %	14,25	1,05	15,9
Насыпная плотность, $\rho_{нас}$, г/см ³	0,397	0,912	1,090
Твердость частиц по шкале Мооса	≈ 2	2...2,5	$\approx 3...5$
Истинная (пикнометрическая) плотность ρ_{pikn} , г/см ³	1,0...1,2 (0,15...0,5 твердый скелет)	2,35...2,42	3,0...3,5
Угол внешнего трения φ , °	44,0	33,0	40,83
Коэффициент внешнего трения f_1	0,96	0,64	0,87
Угол естественного откоса φ_0 , °	23,56	35,42	35,0
Коэффициент внутреннего трения f_2	0,44	0,71	0,70

Для обеспечения точности экспериментальных данных для каждой точки по давлению p_i прессование повторялось не менее семи раз. Наименьшие и наибольшие значения зафиксированных показателей не учитывались при обработке экспериментальных данных, в расчет принимались пять для каждой точки p_i , и вычислялись их усредненные значения. Таким образом, был сформирован массив экспериментальных данных на базе 150 экспериментальных образцов (10 точек по давлению \times 5 повторов каждой точки по давлению \times 3 вида материалов). Для обеспечения сопоставимости полученных экспериментальных данных для всех исследуемых материалов и заданных точек давления прессования был принят одинаковый начальный объем засыпки. Замеры всех линейных размеров брикетов производились с точностью до 0,05мм, а масса навески m_{navi} и брикетов m_{bri} с точностью до 0,05г.

В работе принято допущение, что элементы прессующей оснастки являются абсолютно жесткими, поэтому диаметр $d_{0,i}$ брикета, находящегося под давлением в прессформе, равен диаметру матричного канала.

Значения объема брикета $V_{0,i}$, находящегося в прессформе под действием давления прессования, и $V_{1,i}$ – после снятия давления и извлечения из прессформы вычисляются по формулам:

$$V_{0,i} = \frac{\pi \cdot d_{0,i}^2}{4} \cdot h_{0,i}, \quad (1) \quad V_{1,i} = \frac{\pi \cdot d_{1,i}^2}{4} \cdot h_{1,i}, \quad (2)$$

где, $d_{0,i}$, $h_{0,i}$ - диаметр и высота, брикета, находящегося в прессформе под действием давления прессования; $h_{1,i}$, $d_{1,i}$ - диаметр и высота брикета после снятия давления и извлечения из прессформы.

Для расчета параметров уплотнения по экспериментальным данным использовались следующие выражения:

$$\text{коэффициент уплотнения} \quad K_{y,i} = \frac{\rho_{br,0,i}}{\rho_{nas}} = \frac{V_{nas}}{V_{0,i}} = \frac{m_{br,i} / \rho_{nas}}{(\pi \cdot d_{0,i}^2 / 4) \cdot h_{0,i}}, \quad (3) \quad \text{величина упругого последействия} \quad \delta_{V,i} = \frac{V_{1,i} - V_{0,i}}{V_{0,i}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где, $\rho_{br,0,i}$ - плотность брикета под давлением в прессформе; V_{nas} - объем засыпки.

Плотность брикета $\rho_{br,0,i}$ под давлением в прессформе и $\rho_{br,1,i}$ после извлечения из прессформы

$$\rho_{br,0,i} = \frac{4 \cdot m_{br,i}}{\pi \cdot d_{0,i}^2 \cdot h_{0,i}}, \quad (5) \quad \rho_{br,1,i} = \frac{4 \cdot m_{br,i}}{\pi \cdot d_{1,i}^2 \cdot h_{1,i}}. \quad (6)$$

Полученные в результате проведенных экспериментов данные были сгруппированы в массив, на основе которого построены графические зависимости, аналогичные представленным на рис. 1-3, и выполнена их аппроксимация. В качестве показателя эффективности аппроксимации использовался коэффициент детерминации R^2 . Аппроксимирующие уравнения подбирались таким образом, чтобы согласно соотношениям Чеддока [2], функциональная взаимосвязь была тесной ($R^2=0,7\dots0,9$) или весьма тесной ($R^2=0,9\dots0,99$).

На рис. 1 представлена графическая зависимость, описывающая функциональную взаимосвязь $p = f(K_y)$ для каолина. Уравнения, представленные в таблице 2, будут использоваться для расчета величины и поля распределения напряжений в формируемом брикете. Согласно принятой в работе концепции поля распределения напряжений, рассчитанные и построенные с учетом свойств шихты и конфигурации формирующих элементов, являются основой для определения величины и распределения плотности, разуплотнения и упругого последействия в брикете.

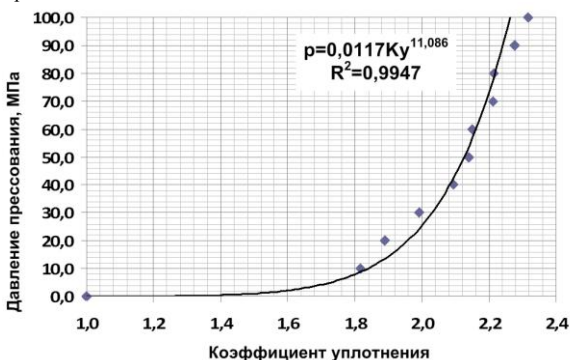


Рисунок 1 – Зависимости коэффициента уплотнения от давления прессования для каолина

Таблица 2 – Результаты аппроксимации экспериментальных данных, описывающих зависимость $p = f(Ky)$

Материал	Уравнение аппроксимации	R ²
Торф	$p = 1,6010 \cdot Ky^{3,274}$	0,98
Каолин	$p = 0,0117 \cdot Ky^{11,086}$	0,99
Марганцевый концентрат	$p = 0,0115 \cdot Ky^{10,158}$	0,99

На рис. 2 как пример на основе данных для каолина представлена графическая зависимость, характеризующая связь между упругим последствием $\delta_{v,i}$ и давлением прессования p_i .

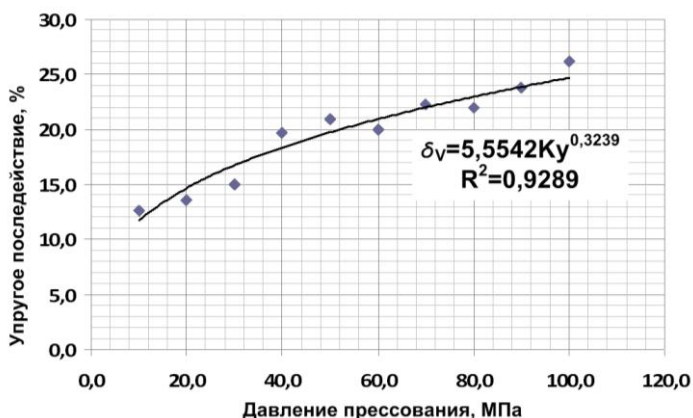


Рисунок 2 – Зависимость упругого последствия от давления прессования для каолина

Таблица 3 – Результаты аппроксимации экспериментальных данных, описывающих зависимость $\delta_v = f(p)$

Материал	Уравнение аппроксимации	R ²
Торф	$\delta_v = -0,0021 \cdot p^2 + 0,2208p + 29,658$	0,72
Каолин	$\delta_v = 5,5542 \cdot p^{0,3239}$	0,93
Марганцевый концентрат	$\delta_v = 5,9776 \cdot p^{0,1833}$	0,82

Важной характеристикой брикета, определяющей его потребительские свойства является плотность. Поэтому целесообразным представляется использование полученных экспериментальных данных для оценки влияния упругого последствия на величину конечной плотности брикетов (после снятия давления прессования).

В соответствии с экспериментальными данными для исследуемых материалов были построены графические зависимости аналогичные представленным на рис.3, отражающие связи $\rho_{br,0} = f(p)$, (кривая 1) и $\rho_{br,1} = f(p)$ (кривая 2). Кривые уплотнения (рис. 3), построенные в координатах «давление прессования - плотность» дают возможность оценить влияние упругих (обратимых) и пластических (необратимых) деформаций на конечную плотность брикета.

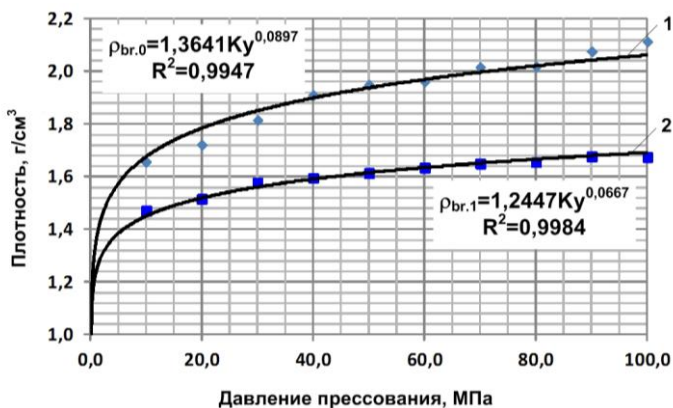


Рисунок 3 – Зависимости плотности брикетов от давления прессования для каолина: 1 – под давлением прессформе; 2 – после извлечения из прессформы

Таблица 4 – Результаты аппроксимации экспериментальных данных, описывающих зависимость $\rho_{br,0} = f(p)$

Материал	Уравнение аппроксимации	R ²
Торф	$\rho_{br,0} = 0,4051 \cdot p^{0,2663}$	0,99
Каолин	$\rho_{br,0} = 1,3641 \cdot p^{0,0897}$	0,99
Марганцевый концентрат	$\rho_{br,0} = 1,6885 \cdot p^{0,0958}$	0,99

Таблица 5 – Результаты аппроксимации экспериментальных данных, описывающих зависимость $\rho_{br,1} = f(p)$

Материал	Уравнение аппроксимации	R ²
Торф	$\rho_{br,1} = 0,3785 \cdot p^{0,2094}$	0,99
Каолин	$\rho_{br,1} = 1,2447 \cdot p^{0,0667}$	0,99
Марганцевый концентрат	$\rho_{br,1} = 1,5878 \cdot p^{0,0818}$	0,99

Разуплотнение материала после снятия давления прессования

$$\Delta\rho(p) = \rho_{br,0}(p) - \rho_{br,1}(p) \quad (7)$$

может быть представлена графически в виде функциональной зависимости $\Delta\rho = f(p)$ (рис.4).

Представленные в графическом (рис. 1-4) и аналитическом (табл. 2-6) виде зависимости будут использованы при разработке расчетно-аналитического аппарата и метода оценки влияния конфигурации формирующих элементов на развитие упругого последействия в брикетах.

Таблица 6 – Результаты аппроксимации экспериментальных данных, описывающих зависимость $\Delta\rho = f(p)$

Материал	Уравнение аппроксимации	R ²
Торф	$\Delta\rho = 0,1012 \cdot p^{0,2695}$	0,97
Каолин	$\Delta\rho = 0,0654 \cdot p^{0,405}$	0,99
Марганцевый концентрат	$\Delta\rho = 0,0611 \cdot p^{0,379}$	0,99

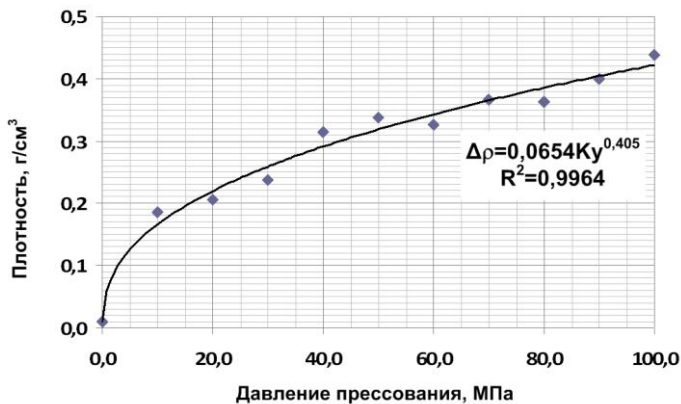


Рисунок 4 – Зависимость разуплотнения брикетов $\Delta\rho_i$ от давления прессования для каолина

В ходе выполненных исследований для материалов, отличающихся по твердости частиц, насыпной плотности, влажности и другим характеристикам экспериментально установлены и описаны графическими и аналитическими зависимостями связи, характеризующие их сопротивление сжатию и развитие упругого последствия. Установленные зависимости между коэффициентом уплотнения и давлением прессования позволяют использовать их при расчете параметров уплотнения и полей распределения напряжений в формируемом брикете.

Как уже говорилось, в процессах брикетирования мелкофракционных шихт в валковых прессах, помимо физико-механических свойств, на напряженно-деформированное состояние шихты и режимы брикетирования оказывает влияние конфигурация прессующего инструмента [3-5]. В дальнейшем планируется проведение исследований исследования по моделированию и оценке влияния типоразмеров формирующих элементов на величину и распределение плотности в брикетах с учетом влияния остаточных упругих деформаций и разработка рекомендации по выбору параметров формирующих элементов, снижающих негативное влияние упругого расширения на качество брикетов.

Список литературных источников

1. Вашенко С. В. Розвиток наукових основ виробництва сировини для металургійної галузі методом брикетування: Автореферат дис. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук: Спец. 05.16.02 - Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів / С. В. Вашенко.-Дніпропетровськ: ІЧМ НАНУ, 2014.-25с.
2. Балинова В.С. Статистика в вопросах и ответах: Учеб. пособие. – М.: ТК. Велби, Издательство Проспект, 2004. – 344С.
3. Носков В. А. Исследование физико-механических свойств мелкофракционных промышленных отходов, определяющих их поведение при брикетировании / В. А. Носков, Б. Н.

Маймур, В. И. Петренко, А. Т. Лебедь // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 1998. – С. 104–107.

4. Носков В. А. Аналитическое исследование распределения уплотнения брикета в формирующих элементах валкового пресса / В. А. Носков, В. И. Петренко // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2000. – № 1. – С. 95–98.

5. Баюл К. В. Аналитическое исследование влияния геометрических параметров формирующих элементов валковых прессов на процесс брикетирования / К. В. Баюл // *Порошковая металлургия* - 2012. - №3/4. – С.38-49.

УДК 519.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗМОРАЖИВАНИЯ ГРУЗОВ В ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНАХ

Н.Н. Беляев, А.А. Карпо

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск

Уголь широко используется на промышленных объектах Украины (коксохимические заводы, ТЭС и т.д.). Однако из-за частых перепадов температур в зимний период времени, возникают проблемы по выгрузке угля у потребителя [1]. Это связано с замораживанием угля в полувагонах.

Нередко дальнепривозные угли поступают на объект в сильно замороженном состоянии, что значительно затрудняет оперативную выгрузку из полувагонов. Зачастую полувагоны после вагонопрокидывателя приходится зачищать «вручную», использовать грейферы и другую технику. Поэтому перед выгрузкой угля из вагонов используются различные технологии по размораживанию сыпучих грузов. Одной из таких технологий является применение элементов с инфракрасным излучением (ИК) (рис. 1).



Рисунок 1- Размещение вагона с углем в цеху углеподготовки:
1 – элементы с инфракрасным излучением для размораживания угля

Однако в настоящее время существует определенный дефицит расчетных методов, с помощью которых можно было бы рассчитать режим размораживания груза. Таким образом, возникает важная задача по созданию таких методов расчета.

В работе рассматривается численная модель для экспресс расчета процесса размораживания сыпучих грузов в железнодорожных вагонах. Модель основывается на применении одномерного уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right),$$

где $a_x = \frac{\lambda_x}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности, λ_x – коэффициент теплопроводности, c – коэффициент теплоемкости, ρ – плотность угля.

Для численного интегрирования уравнение теплопроводности применяется схема А.А. Самарского. Представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных на базе разработанной численной модели.

Список литературных источников

1. Парунакян, В.Э. Исследование процесса размораживания железосодержащего сырья в вагонах с использованием компьютерной технологии “DATAMINING” / В.Э. Парунакян, В.Г. Дженчако // Вестник Приазовского государственного технического университета: Серия: Технические науки- Мариуполь, 2010. – Вып. № 20 – С.267-274.

УДК 519.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В СЛУЧАЕ АВАРИИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА

Н.Н. Беляев¹, В.В. Беляева², А.В. Берлов¹

¹Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск

²Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, Днепропетровск

В работе рассмотрены две математические модели для оценки уровня загрязнения атмосферы в случае горения твердого ракетного топлива межконтинентальной баллистической ракеты РС-22 «Скальпель» [1-3]. Рассматривается сценарий возгорания топлива в железнодорожном вагоне. Прогноз уровня загрязнения выполняется в двух масштабах: в масштабе «urban» (расчет осуществляется на базе трехмерной модели массопереноса) и в масштабе «microscale».

Для моделирования процесса загрязнения атмосферы в масштабе «microscale» разработана численная модель, которая основана на применении уравнений Навье-Стокса [1].

Эти уравнения используются для определения поля скорости ветрового потока вблизи вагонов и зданий. Для расчета рассеивания примеси в этом случае применяется двухмерное уравнение массопереноса.

Для численного интегрирования уравнения массопереноса загрязнителя использовалась неявная попеременно-треугольная разностная схема [4,5].

При построении разностной схемы осуществляется физическое и геометрическое расщепление уравнения переноса на четыре шага. Незвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной схеме – методу бегущего счета.

Разработанная численная модель была использована для расчета зоны поражения при различных метеоусловиях на железнодорожной станции. Построено поле концентрации опасных веществ, которые выбрасываются в атмосферу при горении твердого ракетного топлива.

Также представлены результаты математического моделирования загрязнения атмосферного воздуха в селитебной зоне при движении облака продуктов горения твердого ракетного топлива. Выполнена оценка риска токсичного поражения людей.

Разработанная численная модель может быть использована для экспресс прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха при авариях на химически опасных объектах и транспорте.

Список литературных источников

1. Беляев Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 127 с.

2. Бруязкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязкий. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.

3. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. – К., 2001. – 33 с.

4. Belyaev M. Air Pollution Modelling of Technogenic Catastrophes caused by Terrorist Attacks on Rail Transport of Chemical Substances / M. Belyaev // Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment. NATO Science for Peace and Security Series. – C.: Environmental Security, Springer, 2007. – P. 327 – 336.

5. Biliaiev M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application. – Torino, Italy, 2010. – № P1.7.

УДК 519.6

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Н.Н. Беляев¹, П.С. Кириченко¹, З.Н. Якубовская²

¹Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск

²Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Особенностью Украины является размещение на ее территории большого количества химически опасных объектов. К таким объектам относятся производства, где используются опасные вещества, склады и т.п. Эти объекты являются потенциальными источниками химического загрязнения окружающей среды при возможных чрезвычайных ситуациях [1]. Поэтому возникает важная проблема по оценке размеров и интенсивности зон химического заражения, а также оценке риска поражения людей.

В работе представлены результаты по созданию экспертной системы, ориентированной на оценку риска поражения людей при поступлении в атмосферу опасных веществ. Основными задачами данной экспертной системы являются:

- 1) прогноз динамики загрязнения атмосферы;
- 2) оценка безопасности маршрутов эвакуации;
- 3) оценка эффективности локальных методов защиты людей в зданиях от поражения.

Основой данной экспертной системы является разработка численных моделей [2], объединенных в три блока:

– *первый блок*: расчет аэродинамики – блок, в основу которого положено модель течения идеальной жидкости, позволяющая рассчитать скорость ветрового потока с учетом рельефа местности, застройки;

– *второй блок*: расчет рассеивания опасных веществ в атмосфере (для моделирования переноса опасных веществ используются 2D и 3D уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси);

– *третий блок*: расчет возможного ущерба.

Представляются результаты экспертных оценок, полученные с помощью разработанной системы.

Список литературных источников

1. Беляев Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 127 с.

2. Biliaiev M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application. – Torino, Italy, 2010. – № P1.7.

УДК 519.6

ЭКСПЕРЕСС ПРОГНОЗ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ АВАРИЯХ НА ТРАНСПОРТЕ И ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙТРАЛИЗАТОРА

Н.Н. Беляев, Л.Я. Мунтян

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск

В работе представлены численные модели для решения двух задач в области экологической безопасности на транспорте. Первая задача – прогноз динамики загрязнения атмосферы при эмиссии химически опасных веществ в случае разливов, залповых или полунепрерывных выбросов на железнодорожном транспорте. Вторая задача – локализация и ликвидация зоны химического заражения в атмосфере путем подачи нейтрализатора от воздушных средств (самолет, вертолет). Разработанные численные модели учитывают метеоусловия, параметры эмиссии химически опасного вещества, снос капель нейтрализатора, их испарение, скорость движения воздушного средства, его траекторию движения. Построенные модели позволяют прогнозировать процесс загрязнения атмосферы, как для условия ровной поверхности, так и для застройки [1].

Основой разработанных численных моделей является уравнение массопереноса нейтрализатора и загрязнителя в атмосфере и уравнение потенциального течения. На основе уравнения массопереноса осуществляется расчет концентрационных полей нейтрализатора и загрязнителя в атмосфере. На основе модели потенциального течения осуществляется расчет локального поля скорости ветрового потока с учетом размещения зданий, железнодорожных вагонов, которые представляют собой препятствия и вызывают деформацию поля скорости. Кроме этого учитывается аэродинамика выброса нейтрализатора с заданной скоростью от воздушного средства.

Для численного решения задачи используются неявные разностные схемы [2]. Для формирования вида расчетной области на прямоугольной разностной сетке применяется метод маркирования. С помощью этого метода задается форма железнодорожных вагонов, цистерн и зданий, которые располагаются возле источника эмиссии химически опасного вещества. С помощью маркеров задается маршрут движения воздушного средства, подающего нейтрализатор. На основе разработанных численных моделей созданы два пакета прикладных программ.

Построенные численные модели были использованы для прогноза уровня загрязнения примагистральных территорий в случае гипотетических аварий на различных участках Приднепровской железной дороги. Представляются результаты прогнозных расчетов по оценке размеров, формы и интенсивности зон загрязнения атмосферы для различных аварийных ситуаций на железной дороге.

Список литературных источников

1. Беляев Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д.: «Акцент ПП», 2014. – 127 с.
2. Biliaiev M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application. – Torino, Italy, 2010. – № P1.7.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКУПОРИВАНИЯ ПОРЫ
МЕМБРАНЫ ПРИ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ НА БАЗЕ ДВУХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ
МАССОПЕРЕНОСА**

Н.Н. Беляев¹, Н.П. Нечитайло²

¹Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика
В. Лазаряна, Днепропетровск

²Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепропетровск

В настоящее время применение ультрафильтрации для очистки воды становится одним из наиболее перспективных методов. Несмотря на значительные достижения в области практического применения данного метода очистки, сейчас существует определенный дефицит методик расчета процесса закупоривания пор мембран. Как правило, для такого расчета используют одномерные модели массопереноса, которые не учитывают ряд физических факторов, оказывающих существенное влияние на процесс закупоривания поры.

В работе представлены новые двухмерные численные модели, позволяющие методом вычислительного эксперимента исследовать процесс динамики закупоривания поры. Численное моделирование осуществляется на базе двух уравнений:

- 1) уравнение для потенциала скорости;
- 2) уравнение массопереноса.

Первое уравнение позволяет рассчитывать поле скорости внутри поры с учетом изменения ее геометрии. Изменение геометрии происходит вследствие образования осадка на стенках поры или на «включениях» – областях с твердой непроницаемой границей, которые располагаются внутри поры.

Второе уравнение используется для расчета распределения концентрации примеси внутри поры и изменение этой концентрации при закупоривании поры.

Численное моделирование течения и массопереноса в поре проводится на прямоугольной разностной сетке. Форма поры задается в модели с помощью метода маркирования. Для численного интегрирования уравнения массопереноса используется попеременно-треугольная неявная разностная схема [1,2]. Численное интегрирование уравнения для потенциала скорости проводится с помощью метода суммарной аппроксимации. На базе разработанных численных моделей создан пакет прикладных программ. Для создания пакета использовался алгоритмический язык FORTRAN.

В работе представлены результаты комплекса вычислительных экспериментов по моделированию процесса закупоривания пор мембраны. Рассмотрены варианты, где варьировалась начальная форма поры и исследовалась динамика ее закупоривания при различных физических параметрах.

Список литературных источников

1. Беляев Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках: монография / Н. Н. Беляев, В. А. Козачина. – Д.: «Акцент ПП», 2015. – 114 с.
2. Беляев Н. Н. Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения: монография / Н. Н. Беляев, Е. К. Нагорная. – Д.: Nova идеология, 2012. – 112 с.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСКУССТВЕННОЙ ИОНИЗАЦИИ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ

Н.Н. Беляев¹, С.Г. Цыганкова²

¹Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск

²Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепропетровск

Работа посвящена созданию численной модели (CFD модели) для оценки уровня ионизации воздуха в помещениях при искусственной ионизации воздуха. Искусственная ионизация осуществляется двумя способами: установкой ионизатора в помещении или подачей уже ионизированного воздуха.

В работе рассматривается 2D численная модель для прогноза аэроионного режима в рабочих зонах офисных помещений. Моделирующие уравнения включают в себя уравнения аэродинамики, электростатики и массопереноса [1-5]. Расчет скорости движения воздушных потоков в помещении осуществляется на основе модели потенциального течения, для этого используется уравнение Лапласа для функции тока. Для расчета дрейфа заряженных частиц под действием электрического поля используется уравнение Пуассона для электрического потенциала. Модель включает три уравнения переноса, которые описывают рассеивание отрицательных, положительных ионов и пыли в помещении и рабочей зоне. Уравнение массопереноса учитывает взаимодействие ионов различной полярности друг с другом и с частицами пыли.

Численное интегрирование уравнений массопереноса проводится с помощью неявной попеременно-треугольной разностной схемы. Для численного интегрирования уравнений Лапласа и Пуассона применяется метод Либмана [1, 2].

В работе представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных на основе разработанного пакета программ. Особенностью этого пакета программ является учет при прогнозе наличия мебели в помещении, режима вентиляции, местоположения отверстий приточно-вытяжной вентиляции, расположения и интенсивности ионизаторов, конкретных мест эмиссии пыли, возможности применения экранов в помещении для регулирования интенсивности и формы концентрационного поля ионов. Концентрационное поле аэроионов представляется как в виде матрицы значений концентрации ионов, так и в виде изолиний концентрационного поля. Для решения задачи на базе разработанной CFD модели требуется порядка 2 минут компьютерного времени.

Список литературных источников

1. Беляев, Н. Н. Оценка аэроионного режима в рабочих зонах на базе CFD модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2015. - №46. – С. 168–173.
2. Беляев, Н. Н. Расчет аэроионного режима в помещении и в рабочей зоне на базе численной модели / Н. Н. Беляев, С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ, 2015. - №47. – С. 137–143.
3. Запорожец, О. І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О. І. Запорожец, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник національного авіаційного університету. – 2011. – №2. – С.120–124.
4. Air ion behavior in ventilated rooms. / Fletcher L. A., Noakes C. J., Sleigh P. A., Beggs C. B., Shepherd S.J. Indoor and Built Environment, 17 (2)., 2008. – pp. 173-182.
5. Noakes, C. J. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms / Noakes C. J, Sleigh P. A, Beggs C. // Proseedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms. – Roomvert 2007, 13 -15 June 2007, Helsinki.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМВІДНОСИН НА БАЗІ ТЕОРІЇ РЯДІВ ПРИ
ДИСТАНЦІЙНОМУ НАВЧАННІ
С.О. Борзов**

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ

Дистанційне навчання – сучасний вид отримання знань, але застосування методів, притаманних очній, або заочній формі доводять низький рівень порозуміння тьютора (викладача при дистанційній формі) та студента.

Математичне моделювання процесу взаємовідносин між студентом та тьютором було викладене в роботі (1), в якій доводиться, що процес порозуміння підкоряється експоненційній залежності. В даній роботі відбувається доповнення експоненційної моделі тим, що згадану модель можна доповнити аналізом подій, які відбуваються в учбовому процесі між тьютором та студентом.

Суть нового підходу полягає в тому, що тьютору пропонується скласти ряд з подій, які притаманні тому, чи іншому студенту. Далі, використовуючи, наприклад, класичну ознаку Даламбера, тьютор може з певною долею вірогідності стверджувати, чи будуть позитвнй результати навчання конкретного студента (ряд збіжний), або ні (якщо ряд розбіжний).

Математичне моделювання процесу взаємовідносин між тьютором, та студентом пропонується так.

Ознака Даламбера може бути записана у наступному вигляді.

Якщо в знакододатному ряді подій, які відбуваються між тьютором та студентом

$$\sum_{n=1}^{\infty} u_n, \quad u_n > 0, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (1)$$

існує границя $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = \rho$, то

1) ряд подій (1) збіжний при $\rho < 1$;

2) ряд подій (1) розбіжний при $\rho > 1$;

3) якщо $\rho = 1$, то ряд (1) може як збігатися, так і розбігатися, тобто ознака не чинна.

Для підтвердження працездатності запропонованого підходу, був проведений експеримент. На базі робіт одного із студентів, який вчасно виконував всі завдання, та надсилав їх тьютору, був складений числовий ряд ряд з подій, що відбувалися між ним, та тьютором. Ці події були такими.

Дія перша. Студент вчасно зареєструвався на сайті, отримав пароль доступу на сайт, виконав і надіслав перше завдання. Вважасмо, що $u_1 = 1$.

Дія друга. Друге завдання виконане вчасно, але не повністю. В такому випадку в елементі події $u_2 = \frac{1}{2n}$ маємо знаменник.

Подальші дії даного студента свідчили про те, він надсилав роботи з характерними недоробками, в яких накопичувалися недоробки попередніх тем. В такому випадку тьютор може скласти ряд подій у вигляді (2), а саме:

$$1 + \frac{1}{2!} + \frac{1^2}{3!} + \frac{1^3}{4!} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1^{n-1}}{n!}. \quad (2)$$

Використовуємо ознаку Даламбера збіжності ряду $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{u_{n+1}}{u_n} = \rho$.

За умовою задачі $u_n = \frac{1^{n-1}}{n!}$, тоді $u_{n+1} = \frac{1^n}{(n+1)!}$. Знаходимо границю їх відношення:

$$\rho = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1^n n!}{(n+1)! 5^{n-1}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n+1} = 0 < 1.$$

За ознакою Даламбера ряд збіжний. Отже, хоч студент надсилає роботи з певними недоробками, тьютор з певною долею вірогідності може очікувати позитивні результати їхньої співпраці.

Висновки. Запропонована математична модель відносин між тьютором та студентом при дистанційній формі навчання може суттєво підвищити продуктивність тьютора, щоб не витрачати ресурси на тих, хто не має достатньої наполегливості. Подальшим розвитком такого підходу є розробка математичних моделей на базі числових рядів зі знакозмінними елементами.

Список літературних джерел.

1. Борзов С.О., Борзова А.С. Модель психологічних особливостей дистанційного навчання// Гуманітарний вісник ДВНЗ «Переяслав-Хмельницький державний педагогічний університет імені Григорія Сковороди» - Додаток 1 до Вип. 27, Том XI (42) : Тематичний випуск «Вища освіта України в контексті інтеграції до європейського освітнього простору». – К.: Гнозис. 2012. – с.51-59.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

І.А. Василенко, С.О. Куманьов, О.А. Півоваров, М.І. Скиба

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ

Застосування математичного моделювання в хімічному і хіміко-технологічному процесі дозволяє більш повно провести дослідження, виявляти закономірності та знайти шляхи оптимізації і керування. Особливо доцільно застосовувати методи математичного моделювання для проведення кінетичних розрахунків і порівняння даних отриманих різними способами.

Співробітниками кафедри технології неорганічних речовин та екології Державного вищого навчального закладу ведеться активна робота для створення унікальних програм для розрахунку кінетики технологічних процесів. Програми розроблені у середовищі Delphi 7, мають графічний інтерфейс, виведення результатів здійснюється у вигляді масиву даних та графічних залежностей.

Розроблено комп'ютерну програму «Модель розрахунку кінетики вилугування дорогоцінних металів з рудних концентратів», яка об'єднує у собі чотири модулі, призначені для визначення можливого механізму та розрахунку кінетичних параметрів процесу вилугування золота з рудних концентратів розчинами, виготовленими з використанням води, обробленої під дією контактної нерівноважної плазми.

Відомо, що процес вилугування є складним і включає, щонайменше, декілька послідовних стадій, що характеризуються індивідуальною швидкістю, і будь-яка з них може виявитися найбільш повільною (лімітуючою) та визначати загальну швидкість процесу в цілому. В зв'язку з чим розробка математичної моделі з визначенням кінетичних параметрів, а відповідно і лімітуючої стадії процесу є доцільною для встановлення оптимальних умов вилугування дорогоцінних металів з рудних концентратів. У програму входять наступні модулі:

1. Модуль вибору рівняння розрахунку.
2. Модуль розрахунку енергії активації та передекспоненційного множника процесу
3. Модуль розрахунку кінетичних параметрів реакції n-го порядку
4. Модуль розрахунку швидкості реакції [1].

Комп'ютерна програма «Модель розрахунку процесу утворення твердої фази» об'єднує у собі чотири модулі, призначені для визначення можливого механізму та розрахунку кінетичних параметрів процесу утворення твердої фази при хімічному осадженні оксидів заліза із залізовмісних розчинів та можливості керувати дисперсністю твердої фази.

Оксиди заліза широко використовують у якості залізооксидних пігментів дисперсний склад яких є одним з основних показників їх якості. Розроблена математична модель дозволяє визначити кінетичні закономірності утворення оксидів заліза, прогнозувати та регулювати дисперсний склад твердої фази для одержання високоякісних пігментів та інших залізвмісних дисперсних матеріалів. У програму входять наступні модулі:

1. Модуль визначення кінетичних кривих процесу швидкої коагуляції.
2. Модуль визначення процесу витрати карбаміду на осадження твердої фази.
3. Модуль визначення процесу утворення твердої фази шляхом її осадження карбамідом.
4. Модуль визначення середнього числа часток у агрегаті твердої фази[2].

Комп'ютерна програма «Модель розрахунку процесу вулканізації і стабілізації модифікованих гумових сумішей» об'єднує у собі сім модулів, призначена для аналітичної оцінки кінетики процесу вулканізації гумових сумішей та стабілізації вулканізаторів, прогнозування і порівняння механізму процесів у модифікованих як модельних, так і промислових матеріалах гумових сумішах з метою визначення ефективності їх застосування.

Вулканізація каучуку, є складним хімічним процесом з великою кількістю реагентів, характеризується певними закономірностями і полягає в утворенні єдиної просторової сітки з макромолекул каучуку. В процесі вулканізації формуються властивості гуми. Існуючі розрахункові аналітичні та інженерні методи описання кінетики вулканізації застосовують, в основному, до певних видів кінетичних кривих. Отже, розроблена математична модель дає можливість оцінити процес утворення модифікованих гумових сумішей на основі карбодіазотистих ненасичених каучуків з використанням фосфатидних концентратів, що є досить перспективним напрямком покращення властивостей еластомерних матеріалів для їх використання у різних областях науки і техніки. У програму входять наступні модулі:

1. Модуль визначення порядку реакції та константи швидкості процесу вулканізації.
2. Модуль розрахунку енергії активації та передекспоненційного множника процесу вулканізації.
3. Модуль розрахунку швидкості реакції вулканізації.
4. Модуль розрахунку кінетичних параметрів реакції n-го порядку.
5. Модуль розрахунку окремих стадій процесу вулканізації.
6. Модуль розрахунку ступені зшивання полімеру та межових значень температури зберігання вулканізуючихся композицій.
7. Модуль розрахунку довговічності гумових сумішей з різними модифікуючими ми добавками[3].

Таким чином, математичне моделювання є ефективним інструментом для проведення досліджень у будь яких областях науки та дозволяє прогнозувати і направляти проведення експериментів.

Список літературних джерел:

1. Авторське право на твір №54134 Україна. Комп'ютерна програма «Модель розрахунку кінетики вилуговування дорогоцінних металів з рудних концентратів» / Півоваров О.А., Куманьов С.О., Василенко І.А., Воробйова М.І. – зареєстроване 18.03.2014.
2. Авторське право на твір №54135 Україна. Комп'ютерна програма «Модель розрахунку процесу утворення твердої фази» / Василенко І.А., Куманьов С.О., Чіванов В.Д., Бордунова О.Г. – зареєстроване 18.03.2014.
3. Авторське право на твір №589777 Україна. Комп'ютерна програма «Модель розрахунку процесу вулканізації і стабілізації модифікованих гумових сумішей» / Ковтунік І.В., Василенко І.А., Вашенко Ю.Н., Куманьов С.О. – зареєстроване 19.03.2015.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ У МОДЕЛЮВАННІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ О.В. Василенко

Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя

У процесі автоматизованого проектування та експлуатації технічних систем дослідник постійно змушений мати справу з побудовою та дослідженням моделей різних об'єктів. Моделювання дозволяє проводити різнобічний аналіз та оптимізацію проектованої системи.

В залежності від рівня абстракції, способу представлення моделі та задач дослідження обирають різні системи автоматизованого проектування (САПР) [1]:

- функціонального проектування, інакше системи інжинірингу, або CAE (Computer Aided Engineering).

- конструкторські системи, тобто CAD (Computer Aided Design);

- автоматизовані системи технологічної підготовки виробництва або CAM (Computer Aided Manufacturing).

В окремий клас можна виділити універсальні математичні процесори CAS (Computer Algebra System).

CAE та CAS дозволяють провадити дослідження на макрорівні, тобто аналізувати та оптимізувати систему із ціллю прийняття рішення щодо топології (структурний підхід) та функціональних можливостей в цілому (системний підхід). В CAD проєктуються підсистеми різної фізичної природи як на макрорівні (функціональний рівень для змішаних систем), так і на мікрорівні, наприклад, для електронних систем це схематехнічний рівень (в ECAD), звідки до CAM можуть бути передані програми для станків із ЧПУ та технологічні карти. В системах віртуального виробництва ланка CAE → CAD → CAM утворює наскрізний цикл під керуванням програми – менеджера даними про виріб (PDM - Product Data Manager) [1].

Моделювання має два етапи: «modeling» – відноситься до процесу побудови математичних моделей (ММ); «simulation» – означає проведення комп'ютерного експерименту з моделлю. Способи опису систем на етапі моделінгу [2, 3]:

- безперервні системи - звичайні диференціальні рівняння (ДР);

- дискретні системи - кінцево-різницеві ДР;

- системи з розподіленими параметрами - ДР в приватних похідних;

- системи з післядією - функціонально-диференціальні рівняння;

- стохастичні системи описуються ймовірнісними поняттями і методами.

Оскільки складні системи є синергетичним об'єднанням підсистем з різними фізичними властивостями (мультидоменні агрегативні), програмні засоби повинні допускати їхнє спільне моделювання. Як показав попередній аналіз, реалізувати це можливо кількома способами. По-перше, можна перейти до єдиної системи диференціальних рівнянь на етапі моделінгу, але в цьому випадку всі фізичні особливості окремих частин системи будуть загублені. Варіантом такого підходу є структурне/каузальне моделювання, засноване на використанні моделей у вигляді блоків, які мають виражені входи і виходи. Побудовані згідно з цією технікою моделі іноді називають спрямованими (орієнтованими) сигнальними графами. Структурне моделювання використовується, наприклад, в системах CAS (Simulink) та в CAE (VisSim, 20-Sim) [2,3]. Недоліки підходу – великий обсяг попередніх перетворень та схема моделі, що не відбиває реальну структуру об'єкта.

Інший варіант – використання систем моделювання, які здатні на єдиній методологічній основі моделювати компоненти механічні, електричні, інформаційні тощо, тобто поєднувати їх у єдину схему, зберігаючи при цьому звичні для фахівців у предметних областях способи завдання вихідної інформації, тобто надавати можливість мультидоменного/акаузального моделювання на основі схем фізичних принципів [3]. Оскільки в енергетичних ланцюгах потік енергії може змінювати напрямок, то для елементів фізичних схем входи і виходи не визначені; модель будь-якого технічного пристрою будується як перетворюючий енергію ланцюг. Окремим випадком є графи зв'язків (bond graph, BG).

Ще одним підходом є використання акаузальної по математичному забезпеченню програми для каузального моделювання. Так, в CAD для проєктування електронних систем (ECAD) можна будувати моделі системного рівня на основі блоків, математична дія та

однонаправленість яких формується на основі так званих поведінкових елементів– залежних програмованих джерел та RCL-двохполюсників [4]. Такий підхід можна назвати квазікаузальним. Ті ж самі поведінкові елементи можуть бути використані для емуляції дії підсистем неелектронної природи при моделюванні мультидомених систем із збереженням реальної структурної схеми. Таким чином нівелюється принципова відмінність структурного і фізичного моделювання, яка полягає не тільки у формі завдання вихідної інформації, але і в використовуваних методах чисельного інтегрування диференціальних рівнянь.

Звичай зі структурним моделюванням пов'язують явний вирішувач/солвер, який являє собою бібліотеку підпрограм явних методів чисельного інтегрування, які мають обмеження на ступінь жорсткості математичної моделі (розкид постійних часу перехідних процесів). З фізичним мультидоменим моделюванням зазвичай пов'язують ітераційний вирішувач, який реалізує неявний метод моделювання, який відрізняє мала економічність та необхідність оптимізації параметрів інтегрування. Таким чином, при квазікаузальному підході модель візуалізується як набір функціональних блоків (каузально пов'язаних), за яким формується система нелінійних диференціальних рівнянь в неявній формі, що розширює спектр допустимих видів аналізу та підвищує точність моделювання жорстких систем.

Слід зауважити, що деякі САЕ-системи (наприклад, 20-sim), незалежно від підходу до моделювання, використовують неявні та явні методи інтегрування, що дозволить моделювати в часовій області як об'єкти, задані структурними схемами, тобто з використанням спрямованих ланок, так і об'єкти представлені у вигляді фізичних принципів схем [2,5]. При завданні вихідної інформації у вигляді принципової фізичної схеми в математичне ядро може бути включена процедура каузалізації - перетворення мультидоменної інформації до форми спрямованої структури, а потім можуть бути використані ті ж самі методи явного чисельного інтегрування, що й у звичайному структурному моделюванні. Саме такий принцип реалізовано в пакетах Simmechanics і Simpowersystems, які є підсистемами CAS системи Simulink [1-3].

Отже, для опису однієї і тієї ж реальної системи може бути використаний різний математичний апарат, в залежності від цілей дослідження і вимог точності та адекватності. Грамотне використання програмного забезпечення здатне розширити межі та підвищити точність моделювання складних систем, а знання обмежень та способів налагодження параметрів симуляції сприяє підвищенню ефективності моделювання в цілому.

Список літературних джерел

1. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 430 с.
2. Клиначев Н.В. Обзор архитектурного построения программ математического моделирования динамических систем [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.exponenta.ru/educat/news/klinachev>
3. Имитационное моделирование сложных динамических систем Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.exponenta.ru/soft/others/mvs/ds_sim.asp
4. Micro-Cap 10, Analog and Digital Behavioral Modeling [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.spectrum-soft.com/demo/abm.shtml>
5. 20-sim 4.3 Reference Manual / Ir.C. Kleijn, Ir.M.A. Groothuis, Ir.H.G. Differ // Controllab Products B.V., 2012.– 1099 с.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ И ФОРМЫ КОЛЕБАНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

О.И. Власов, А.С. Каиров

Национальный университет кораблестроения, Николаев

В современной технике для изготовления оболочечных конструкций широко применяются анизотропные композиционные материалы, имеющие слоисто-волоконистую структуру и обладающие качественно новыми свойствами и физико-механическими характеристиками. Однако, слоистость и армирование материала, анизотропия упругих характеристик образуют конструктивную неоднородность и проявляются такими особенностями деформирования и поведения конструкции в экстремальных условиях, которые не наблюдаются у традиционных изотропных материалов. В связи с этим исследование основных динамических характеристик многослойных ортотропных оболочек представляет интерес как с точки зрения теоретического решения подобного класса задач, так и практического применения полученных результатов при проектировании конструкций из новых композиционных материалов с анизотропией упругих свойств. Поэтому исследование амплитудно-частотных характеристик данных оболочечных конструкций является актуальной задачей и представляет научный и практический интерес. Обзор исследований, посвященных данной проблеме, приведен в работах [1-7].

В работе исследуются свободные колебания усеченных конических многослойных композитных оболочек вращения с присоединенными твердыми телами, создающими конструктивную неоднородность. Выполнен анализ влияния структуры материала на амплитудно-частотные характеристики для различных видов граничных условий.

Использованный в работах [1, 2] подход, в основу которого положена теория анизотропных оболочек, в данной работе обобщен на задачи исследования собственных колебаний тонких упругих ортотропных оболочек вращения из слоистых композиционных материалов, армированных однонаправленными высокопрочными непрерывными волокнами.

Тонкостенная оболочка состоит из N однородных ортотропных слоев толщиной h_i , жестко связанных между собой в единый пакет, что исключает при деформировании их взаимное проскальзывание и отрыв. Предполагается, что в каждом слое существует приведенная плоскость упругой симметрии, параллельная касательной плоскости к координатной поверхности, и отсутствует обжатие по толщине пакета. Поверхность приведения отнесена к системе криволинейных ортогональных координат (x, θ, η) , отсчитываемым вдоль линий главных кривизн и по нормали к координатной поверхности. В качестве исходной принимается гипотеза недеформируемой нормали для всего пакета слоев оболочки в целом. Сопрягаемые слои линейно упругого материала подчиняются обобщенному закону Гука с учетом гипотезы Дюамеля-Неймана, а также условиям сопряжения слоев в пакете.

Для решения задачи разработана уточненная математическая модель многослойной ортотропной оболочечной системы и методика расчета ее собственных частот колебаний. Математическая модель динамического поведения ортотропных конструктивно неоднородных оболочек с присоединенными твердыми телами построена на основе линейной теории тонких упругих оболочек в рамках гипотез Кирхгофа-Лява. Задача решается методом Ритца.

Согласно принципу Остроградского-Гамильтона решение сводится к вариационному уравнению $\delta(\mathcal{E}) = 0$, где $\mathcal{E} = K - \Pi$ – функционал Лагранжа для неоднородной оболочечной системы; Π, K – потенциальная и кинетическая энергии многослойной ортотропной оболочки с присоединенными телами.

Интегрируя выражения для функционала энергии по толщине i -го слоя и суммируя полученные результаты по всему пакету слоев оболочки, приводим вариационное уравнение Лагранжа к двумерному виду. Составляющие функцию Лагранжа потенциальная и кинетическая энергии в общем случае запишутся в виде [1]:

$$\begin{aligned}
\Pi = & \frac{1}{2} \iint_S \left\{ C_{11} e_1^2 + 2C_{12} e_1 e_2 + C_{22} e_2^2 + C_{66} e_3^2 + \right. \\
& + 2[K_{11} e_1 e_4 + K_{12}(e_1 e_5 + e_2 e_4) + K_{22} e_2 e_5 + 2K_{66} e_3 e_6] + \\
& \left. + D_{11} e_4^2 + 2D_{12} e_4 e_5 + D_{22} e_5^2 + 4D_{66} e_6^2 \right\} A_1 A_2 dx d\theta; \\
K = & \frac{\omega^2}{2} \left\{ \sum_{i=1}^N \rho_i h_i \iint_S \sum_{k=1}^3 \left(u_k^{(i)} \right)^2 A_1 A_2 dx d\theta + \sum_{v=0}^Q \left\{ M_v \sum_{k=1}^3 \left(u_k^{(v)} \right)^2 \right\} \right\},
\end{aligned} \quad (1)$$

где ω – круговая частота собственных колебаний; S – площадь поверхности оболочки; A_1, A_2 – коэффициенты Ляме; h_i, ρ_i – толщина и плотность материала i -го слоя; C_{pq}, K_{pq}, D_{pq} – обобщенные жесткости ($p, q = \overline{1, 6}$) [1]; $e_p, u_k^{(i)}$ – компоненты деформаций и перемещений оболочки ($p = \overline{1, 6}; k = \overline{1, 3}$); $u_k^{(v)}, M_v$ – компоненты перемещений и массы присоединенных тел.

Значения эффективных упругих характеристик вычисляются в предположении равномерного распределения связующей матрицы и армирующих волокон по всем направлениям армирования при фиксированном общем содержании наполнителя.

Применяя процедуру Ритца, из условия стационарности функционала Лагранжа получим разрешающую систему однородных линейных алгебраических уравнений:

$$(A - \lambda B)C = 0, \quad (2)$$

где A и B – матрицы дифференциальных операторов однородных уравнений; C – матрица векторов собственных форм; λ – вектор собственных чисел частотного параметра.

Эффективность и возможности разработанной методики демонстрируются результатами расчетов. Учитываются различные варианты граничных условий и конструктивные особенности. Варьируются геометрические параметры оболочек, количество слоев и их физико-механические характеристики.

Получены новые численные результаты, характеризующие влияние геометрических характеристик, присоединенных твердых тел, ортотропии материала и граничных условий на собственные частоты и формы колебаний. Выявлены новые зависимости, закономерности и физико-механические эффекты, обусловленные конструктивными неоднородностями оболочечной системы, имеющие важное практическое значение. Разработаны мероприятия по улучшению основных амплитудно-частотных характеристик оболочечной системы. В качестве конструкционных композитных материалов рассматриваются углепластики HMS/DX210, P-313, AS/4397 и стеклопластик GLASS/DX210 [5].

На основе анализа полученных численных результатов следует, что существуют различные способы изменения амплитудно-частотных характеристик оболочек из композиционных материалов посредством варьирования состава композита, схемы армирования материала и изменения геометрии оболочечной системы. Значения частот и формы собственных колебаний оболочек из ортотропных композиционных материалов можно регулировать посредством варьирования их физико-механических характеристик. Характеристики этих материалов можно существенно изменять, варьируя параметры внутренней структуры, что создает широкие возможности для проектирования качественно новых конструкций с заданными динамическими свойствами.

Список литературных источников

1. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек / С.А. Амбарцумян. – М.: Наука, 1974. – 446 с.
2. Болотин В.В. Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 376 с.

3. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
4. Заруцкий В.А. О комплексных экспериментальных исследованиях устойчивости и колебаний конструктивно-неоднородных оболочек / В.А. Заруцкий // Прикл. механика. – 2001. – Т.37, № 8. – С.38-67.
5. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
6. Механика композитных материалов и элементов конструкций: В 3-х т. / А.Н. Гузь, Я.М. Григоренко, И.Ю. Бабич. – К: Наук. думка, 1983. – Т.2: Механика элементов конструкций. – 464 с.
7. Механика композитов: В 12 т. / Под ред. В.Д. Кубенко. – К.: А.С.К., 1999. – Динамика элементов конструкций: Т.9. – 379 с.

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ЯВЛЕНИЯ ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОРОД ПОЧВЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

С.Н. Гапеев, Д.О. Сосна

Национальный горный университет, Днепропетровск

Введение. Одним из наиболее частых и повсеместно распространенных видов проявлений горного давления в протяженных выработках угольных шахт Украины является пучение пород почвы, затраты на ликвидацию последствий которого значительны и приводят к повышению себестоимости угля. Сложность природы явления, разнообразие горно-геологических факторов, в которых эксплуатируются выработки, привело к возникновению массы гипотез, объясняющих механизм пучения. Анализ результатов натурных измерений, выполненных различными исследователями, приводит к выводу, что в основе явления вспучивания, наблюдаемого в несхожих условиях, лежат некие общие закономерности. Это позволяет рассматривать пучение как явление потери упругопластической устойчивости геомеханической системы «горная выработка-породный массив» [1]. Исследование явления упругопластической устойчивости аналитическими методами является достаточно сложной задачей, имеющей свое решение для сравнительно простых случаев. При этом такие решения сводятся к определению момента вспучивания и не рассматривают дальнейшее развитие процесса. Снять многие математические ограничения в задачах геомеханики позволяют численные методы, такие, как метод конечных элементов (МКЭ). При этом корректность результатов расчетов может быть обеспечена применением математических моделей, отражающих закономерности реального исследуемого процесса.

Результаты исследований. Потеря устойчивости приконтурного массива протекает как совокупность двух процессов [2]: *невозмущенного процесса* (до потери устойчивости) – деформирования приконтурного массива, протекающего по схеме запредельного деформирования породного образца при его испытании на прессах «жесткого» типа, и *возмущенного процесса* (после потери устойчивости) – развитие собственно выдавливания пород из почвы выработки.

В этой связи исследование явления вспучивания пород почвы в горных выработках осуществляется также в два этапа. На *первом этапе* выполняется решение задачи об упругопластическом распределении напряжений в окрестности одиночной выработки и определяются размеры зоны неупругих деформаций. Расчет ведется методом конечных элементов по алгоритму, учитывающему эффекты разрыхления и разупрочнения в окрестности выработки [3]. Полученные на этом этапе результаты проверяются на выполнение критерия, характеризующего возможность вспучивания почвы одиночной выработки, находящейся вне зоны влияния очистных работ в упругопластически деформирующемся массиве. В расчетах используется критерий, полученный А.Н. Шашенко [4] на основе применения подхода Ишлинского-Лейбензона [5, 6], имеющий вид

$$\bar{\varepsilon}_V r_L^{*2} \ln^2 r_L^* + 2 < 0 \cdot \quad (1)$$

Здесь $\bar{\varepsilon}_V$ – среднее относительное объемное разрыхление пород (определяется из опытов на сжатие породных образцов в процессе контролируемого разрушения); r_L^* – критический радиус зоны неупругих деформаций, приведенный к радиусу выработки, соответствующий глубине заложения, с которой произойдет вспучивание почвы в выработке. На первом этапе решения устанавливается некоторая критическая глубина, применительно к которой компоненты напряжений принимают предельные для этих условий значения. При этом основное напряженно-деформированное состояние вмещающего породного массива соответствует этой критической глубине и геометрии исследуемой области.

Выполнение критерия (1) свидетельствует о наступлении вспучивания почвы в выработке, т.е. о начале возмущенного процесса и численной процедуры второго этапа. На этом этапе явление выдавливания моделируется тем, что на контуре почвы задаются новые граничные условия в перемещениях и форма почвы выработки представляется косинусоидой вида $y = 1 + d \cos x$, где d – константа. Максимальное значение этого дополнительного перемещения, которое соответствует величине реальных смещений почвы в условиях, являющихся прототипом для моделирования, задается в параметрах функции, описывающей искаженный контур почвы выработки. Поскольку эти смещения в бифуркационной модели пучения соответствуют этапу возмущенного процесса деформаций, развивающемуся после прохождения историей процесса критической точки бифуркации, такие смещения в модели будем называть «закритическими перемещениями» $\Delta u_{з.л.}$.

На графиках рис. 1, которые представляют собой линеаризованный типичный график развития смещений почвы (график функции $u = f(T)$) выделяется три характерных временных интервала:

а) T_1 – период реализации упругопластических перемещений (невозмущенный процесс деформирования массива с точки зрения потери устойчивости почвы). Этот уровень перемещений достигается на этапе моделирования невозмущенного процесса, т.е. до тех пор, пока не будет выполнено условие (1). После выполнения условия величина смещений на контуре почвы модели запоминается и является для данной задачи «текущим порогом пучения» $u'_{н.пуч.}$;

б) T_2 – период активного развития процесса вспучивания пород почвы. С точки зрения бифуркационной модели пучения этот период соответствует переходу от невозмущенного процесса к возмущенному и следующему за этим переходом процессу формирования новой формы контура;

в) T_3 – период пассивного развития процесса пучения, который отличается малыми интенсивностями прироста величин смещений почвы и продолжается вплоть до достижения максимальных смещений, заданных в задаче.

Интервалы T_2 и T_3 относятся к возмущенному процессу деформирования массива, т.е. собственно пучению. В ходе моделирования пучение рассматривается как дополнительное по отношению к упругопластическим деформациям состояние геомеханической системы «выработка-породный массив», возникающее в ней при выполнении условия (1). Такой подход позволяет выполнять моделирование пучения после окончания основного (упругопластического) решения задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) геомеханической системы, накладывая результаты этого расчета на картину НДС, полученную в ходе упругопластического решения.

Имитационное моделирование пучения выполняется пошагово, что позволяет задавать закритические перемещения малыми долями, равными количеству шагов решения, получая картину изменения НДС моделируемой геомеханической системы по мере развития процесса пучения в модели. Процедура предусматривает приложение величин дополнительных перемещений в зависимости от развития процесса изменения НДС в массиве в окрестности моделируемой выработки:

А) если смещения в почве выработки на начало имитационного моделирования соответствуют интервалу T_3 (рис. 1, а), то процедура моделирования реализуется как

пошаговый расчет, при котором критические перемещения прикладываются к почве равномерно, увеличиваясь от шага к шагу на одинаковую величину, равную

$$u_{з.л.}^{(i)} = \frac{u_{\max} - u_{у.пл.}}{n_{з.л.}}, \quad (2)$$

где u_{\max} – максимальная величина максимальная величина пучения; $u_{у.пл.}$ – смещения контура почвы, полученные после упругопластического решения; $n_{з.л.}$ – количество шагов в процедуре имитационного моделирования пучения.

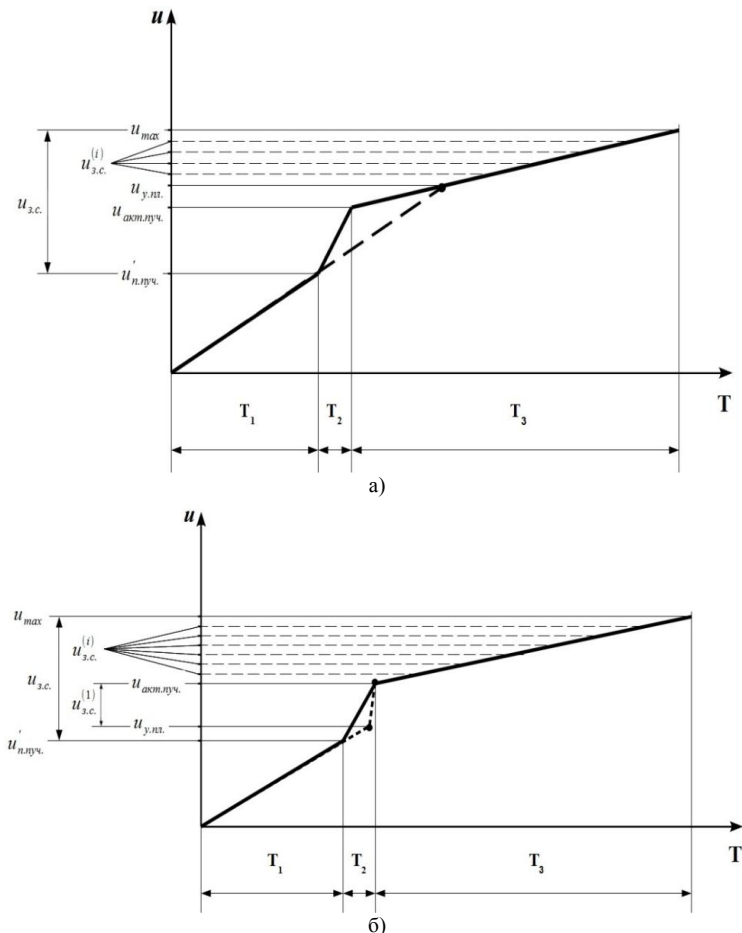


Рисунок 1 – К процедуре имитационного моделирования процесса пучения

Б) если смещения соответствуют интервалу T_2 (рис. 1, б), то на первом шаге имитационной процедуры к почве выработки прикладывается величина дополнительных перемещений, которая определяется выражением $u_{з.л.}^{(1)} = u_{акт.пуч.} - u_{у.пл.}$, где $u_{акт.пуч.}$ – величина смещений, которая имеет место на момент окончания активного процесса вспучивания (принимается из натуральных измерений). За оставшееся число шагов имитационного

моделирования на каждом шаге к почве выработки прикладываются закритические перемещения, равные по величине

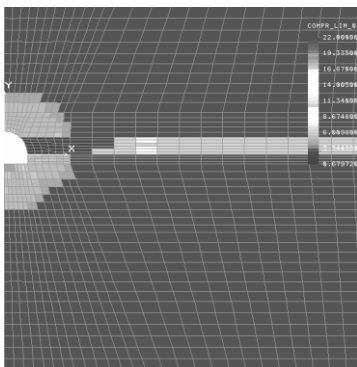
$$u_{з.п.}^{(i)} = \frac{u_{\max} - u_{\text{акт.пуч.}}}{n_{з.п.} - 1} \quad (3)$$

Выбор вариантов проведения имитационного моделирования (вариант А или Б) производится путем сравнения величины $u_{\text{акт.пуч.}}$, т.е. смещений, достигнутых на момент окончания активного процесса вспучивания, и величины смещений контура почвы $u_{у.пл.}$, полученной в результате упругопластического решения. Если $u_{у.пл.} \geq u_{\text{акт.пуч.}}$, то выбирают вариант А, иначе – вариант Б. Величина $u_{\text{акт.пуч.}}$ зависит от условий, в которых происходит эксплуатация выработки и развивается пучение. Пошаговая процедура имитационного моделирования по сути воссоздает развитие процесса пучения во времени, поскольку каждому значению $u_{з.п.}^{(i)}$ соответствуют своя картина НДС рассматриваемой системы, закритические перемещения $u_{з.п.}^{(i)}$ вызывают дополнительное возмущение НДС, которое накладывается на основное, полученное после упругопластического решения. Таким образом, пучение, имеющее непрерывный временной характер, рассматривается здесь как дискретный квазистатический процесс.

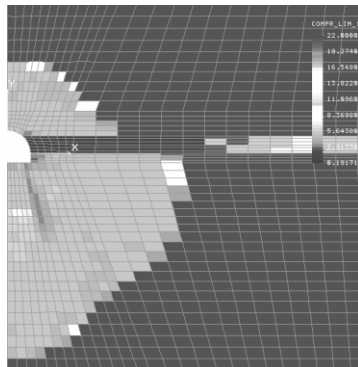
На рис. 2, 3 представлены результаты численной (МКЭ) реализации такого подхода для гидростатически сжатого массива, ослабленного одиночной выработкой, соответственно для случаев массива с угольным пластом и слоистого массива, содержащего в кровле мощный слой крепкого песчаника. Различная окраска конечных элементов соответствует различной степени разупрочнения.

Анализ результатов показывает, что с увеличением степени неоднородности массива в окрестности выработки от однородного до слоистого с различными геометрическими и прочностными параметрами слоев, форма зоны разрыхления, возникающей около выработки, изменяется от практически симметричной охватывающей выработку до несимметричной, вытянутой вдоль наименее крепкого слоя.

Кроме того, анализ результатов экспериментов, в которых исследовалось влияние параметров крепкого слоя в кровле на развитие явления вспучивания (при вариации мощности этого слоя и его расстояния до выработки) позволил установить следующее. На этапе невозмущенного процесса, т.е. до наступления потери устойчивости, предельные размеры зоны разрыхления, достигнутые к моменту потери устойчивости, нелинейно зависят как от расстояния до крепкого слоя, так и от его мощности. При этом определено, что при расстояниях до крепкого слоя в кровле и почве, равных 21,0 м, и мощности крепкого слоя в кровле, равной 18,0 м, влияние этого слоя на процесс потери устойчивости перестает сказываться.



а)



б)

Рисунок 2 – Конфигурации зон неупругих деформаций в массиве, включающем пласт угля, на этапе упругопластического решения (а) на этапе вспучивания (б)

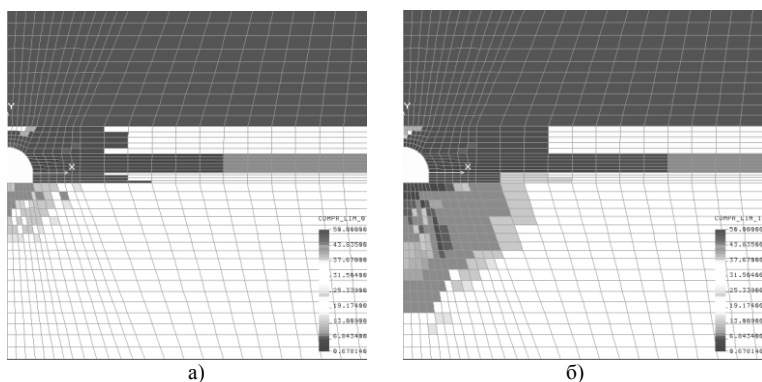


Рисунок 3 – Конфигурации зон неупругих деформаций в слоистом массиве на этапе упругопластического решения (а) на этапе вспучивания (б)

На этапе возмущенного процесса, т.е. после потери устойчивости, при величине закритического поднятия почвы, равной 0,3 м, наступает стабилизация размеров зоны неупругих деформаций и дальнейшее возрастание закритического поднятия не отражается на размерах зоны. Причем, это обстоятельство не зависит от геомеханической ситуации, в которой расположена выработка.

Анализ рис. 2, 3 выявляет значительное влияние свойств пород и структуры массива, окружающего выработку, на формирование зоны неупругих деформаций, а следовательно, и на устойчивость выработки, особенно в условиях выдавливания почвы (рис. 2,б и 3,б) – наблюдается уменьшение размеров зоны разрыхления в почве для случая слоистого массива. Этот факт необходимо учитывать при использовании описанной математической модели, например, введением в критерий (1) некоторого коэффициента, учитывающего различия в жесткостях однородной и слоистой толщи пород [2].

Выводы. Таким образом, рассмотрен подход к исследованию явления пучения пород почвы с позиций потери ее упругопластической устойчивости, охватывающий состояние массива как до момента потери, так и после него. Механическая модель, положенная в основу алгоритма исследования состояния массива после потери устойчивости, рассматривает пучение, имеющее непрерывный временной характер как дискретный квазистатический процесс. Результаты численного решения задач о потере упругопластической устойчивости почвы выработки, в надлежущей толще которой расположен мощный слой крепкой породы, указывают на необходимость учета прочностных, пространственных и геометрических параметров слоев, слагающих массив, при определении возможности вспучивания.

Такой подход может быть полезен при решении численных задач, например, связанных с оценкой несущей способности крепи, поскольку размер ЗНД и величина смещений на контуре выработки, которые формируют нагрузку на крепь, являются величинами, которые хорошо коррелируют друг с другом [3, 7].

Список литературных источников

1. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики: монография / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: Універ. вид-во «Пульсар», 2002.– 304 с.
2. Гапеев С.Н. Закономерности потери упругопластической устойчивости сложноструктурного массива в окрестности одиночной выработки: Дис. ... канд. техн. наук: 05.15.09 / Гапеев Сергей Николаевич. – Днепропетровск, 2005.– 188 с.

3. Шашенко А.Н. Деформируемость и прочность массивов горных пород: монография// А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.Н. Гапеев.– Днепропетровск: НГУ, 2008. – 224 с.

4. Шашенко А.Н. Устойчивость подземных выработок в неоднородном породном массиве: Дисс....докт. техн. наук: 05.15.04 / Шашенко Александр Николаевич.– Днепропетровск, 1988. – 507 с.

5. Ишлинский А.Ю. Рассмотрение вопросов об устойчивости равновесия упругих тел с точки зрения математической теории упругости / А.Ю. Ишлинский // Украинский математический журнал.– 1954.– т.6.– №2.– С.140-146.

6. Лейбензон Л.С. О применении гармонических функций к вопросу об устойчивости сферической и цилиндрической оболочек / Л.С. Лейбензон // Собр. тр.– М., 1951, т.1.– С.50-85.

7. Шашенко А.Н. Управление устойчивостью протяженных выработок глубоких шахт: монография / А.Н. Шашенко, А.В. Солодянкин, А.В. Мартовичский.– Днепропетровск: ООО «ЛизуновПресс», 2012.– 384 с.

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ВРОЖАЙНОСТІ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР ВІД ЗАСТОСУВАННЯ ДОБРИВА С.М. Гармаш, Є.В. Чернецький

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ

Кафедрою біотехнології розроблена технологія отримання екологічно безпечного добрива – біогумусу. З метою вивчення впливу його на врожайність томатів сорту Персей проведені дослідження застосування біогумусу та перегною при внесенні в ґрунт.

Середні значення врожайності томатів за три роки при внесенні різної кількості органічних добрив в ґрунт мають у всіх варіантах досліді статистично достовірні відмінності в порівнянні з врожайністю томатів без внесення добрив. Окрім цього, спостерігається достовірне збільшення врожайності при використанні біогумусу в порівнянні з використаним перегноєм, але тільки для доз більше 4 т/га (табл. 1).

Таблиця 1 – Deskриптивний статистичний аналіз і t-тест порівняння середніх значень врожайності томатів при внесенні в ґрунт органічних добрив

Варіанти досліді	Середнє значення, ц/га	Стандартне відхилення	Рівень значущості (перегній)	Приріст урожаю	
				ц/га	%
Без добрив (контроль)	227,0	4,3			
Перегній (2т/га)	235,0	3,4		8,0	3,5
Перегній (4т/га)	244,0	4,4		17,0	7,5
Перегній (6т/га)	258,0	3,9		31,0	13,7
Біогумус (2т/га)	239,0	5,6	0,086	12,0	5,3
Біогумус (4т/га)	255,0	3,6	0,000	28,0	12,3
Біогумус (6т/га)	304,0	3,7	0,000	77,0	33,9

На підставі порівняння середніх значень врожайності томатів сорту Персей за декілька років створенні моделі залежностей врожайності від витрати біогумусу.

Раніше встановлено, що залежність врожайності томатів від дози внесенного перегною адекватно описується лінійною регресійною моделлю. Для прогнозування впливу дози біогумусу на врожайність томатів найкращою є нелінійна квадратична регресійна модель (рис. 1).

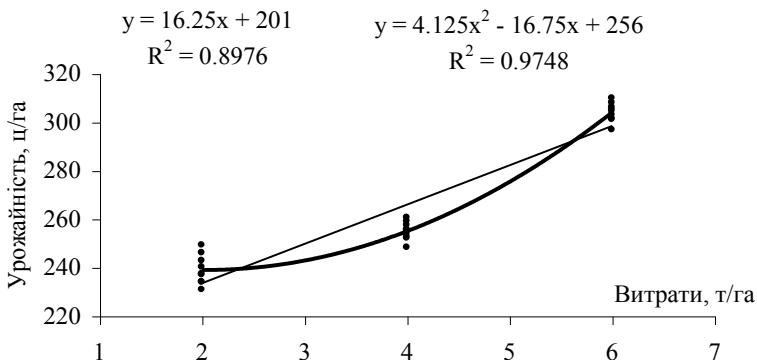


Рисунок 1 – Регресійні моделі залежності врожайності томатів від норм внесення біогумусу в ґрунт

Виявлена нелінійність ефектів дії біогумусу в ґрунті на врожайність томатів відображає складні механізми різносторонньої дії даного добрива на рослини в порівнянні з традиційно застосованим перегноєм. Моделювання експериментальних даних достовірно відобразило різну реакцію рослин томатів на застосування біогумусу. Регулюванням дози внесення добрив можна істотно впливати на підсумкову врожайність томатів.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИГНАЛОВ В СЕЙСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОХРАНЫ ПЕРИМЕТРА

А. С. Гринишак, Н. А. Лысенко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск

Создание любой модели осуществляется на основе априорных сведений о закономерностях физических явлений или путем идентификации структуры модели и определяющих ее параметров по данным, полученным в результате эксперимента. Полученная модель должна отображать физическую сущность процесса, чтобы было возможным ее использование для прогнозирования характеристик процесса при различных внешних условиях. Рассмотрим сейсмические сигналы с точки зрения объекта математического моделирования.

Авторегрессионную модель сейсмического сигнала предложили ученые из Японии - Sadanori Konishi и Genshiro Kitagawa в своей работе «Information Criteria and Statistical Modeling» [1]. Японские ученые подошли к этому вопросу с позиций предвидения, так как Япония - это страна где часто происходят землетрясения, поэтому необходимо обнаруживать сейсмозмущения на ранних этапах. Авторегрессионная модель – модель, где текущее значение сигнала зависит от предыдущих состояний сигнала. Сигнал описывается данным уравнением:

$$x_i = \sum_{j=1}^l a_j x_{i-j} + \xi_j, \quad (1)$$

где x_i - сигнал в текущий момент времени, x_{i-j} - предыдущие значения сигнала, a_j - авторегрессионные коэффициенты которые характеризуют сигнал, и ξ_j - белый шум. Пример реализации авторегрессионной модели сейсмосигнала приведен на рис. 1.

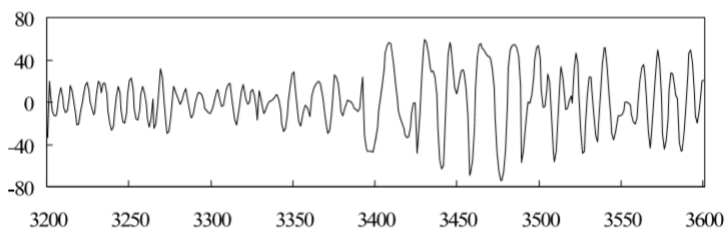


Рисунок 1 - Авторегрессионная модель сейсмического сигнала

Авторегрессионную модель использует также российский ученый Спектор А. А [2] и его последователи. В формуле (1) сумма в правой части описывает механизм предсказания текущего отсчета X_i на основе j предыдущих отсчетов, а информационный белый шум ξ_i интерпретируется как ошибка предсказания.

Филатова С. Г. в [3] предлагает рассматривать сейсмические сигналы, как случайные процессы, параметры которых будут зависеть от внешних условий. При воздействии шагов человека на грунт сигналы на выходе сейсмоприемника имеют характер импульсов примерно одинаковой длительности и случайной интенсивности. Частота их появления зависит от скорости движения. Амплитуда изменяется в зависимости от расстояния между источником сейсмосигнала и сейсмоприемником, а также определяется силой удара. После адаптивной декорреляции сигнала, его полезная составляющая, остается окрашенным гауссовским процессом, сохраняющим индивидуальные особенности спектрально-корреляционных характеристик, свойственные тому или иному типу сейсмоактивного объекта. Полученные после адаптивной декорреляции данные представляются в виде суммы двух гауссовых случайных процессов: фона, являющегося белым шумом с нулевым средним и постоянной дисперсией; и полезного сигнала (обусловленного воздействием объекта).

Долгих Л. А. в [4] рассматривает следующую модель сигнала. На рис. 2 представлен сигнал бегущего человека на расстоянии 20 м от сейсмоприемника.

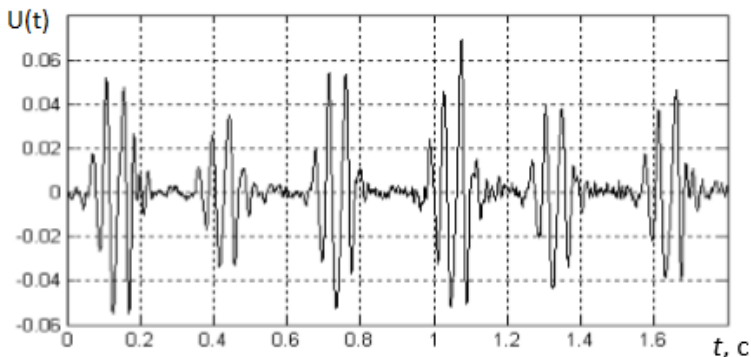


Рисунок 2 - Сигнал сейсмоприемника

Из рисунка видно, что сигнал (реакции на удар стопы) отличаются друг от друга, что обусловлено нестационарностью ударного возбуждения грунта при ходьбе и спецификой распространения упругих колебаний в грунте. Существенной особенностью, которая объединяет приведенные сигналы, является их затухающий псевдогармонический характер.

В [4] предлагается использовать такие известные функции, которые описывают затухающий колебательный процесс, как импульсы Пузырева

$$Y(t) = A_0 e^{-\alpha^2 t^2} \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

и Берлаге

$$Y(t) = A \cdot (\omega \cdot t)^2 \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (3)$$

где A – амплитуда колебаний, ω – частота собственных колебаний, α – коэффициент затухания.

Мясникова Н. В. и Зенов А. Ю. в работах [5] и [6], обосновывают использование модели, где сигнал представляет собой комбинацию узкополосных составляющих аддитивно смешанных с широкополосным шумом. Эта модель является наиболее общей, так как она охватывает широкий класс возможных сигналов, а так же выделяет специфические свойства быстропеременных процессов и позволяет выделить их из всего многообразия случайных процессов.

$$x(t) = \sum_{i=1}^{K_c} \varphi_i(t) + \xi(t), \quad (4)$$

где $\varphi_i(t)$ – i -я узкополосная составляющая; $\xi(t)$ – широкополосная составляющая; K_c – число узкополосных составляющих.

В ходе исследования моделей сейсмических сигналов была реализована модель (4). Данная модель состояла из 5 узкополосных составляющих, аддитивно смешанных с широкополосным шумом.

Промоделированный сигнал описывается следующим выражением:

$$x_j = Q_j + N_j + Y_j, \quad (5)$$

где N_j это широкополосный белый шум, реализованный случайными величинами с равномерным распределением на интервале $[-1;1]$. Сумма 5-ти узкополосных составляющих:

$$Q_j = \sum_{k=0}^5 q_{k,j} \quad (6)$$

В [7] узкополосные составляющие описываются уравнениями вида:

$$q_{1,i} = \cos(2\pi f_0 + \xi_{1,i}) + \xi_{5,i}, \quad q_{2,i} = \cos(2\pi f_2 + \xi_{2,i}) + \xi_{4,i}, \quad q_{3,i} = \cos(2\pi f_3 + \xi_{3,i}) + \xi_{3,i}, \\ q_{4,i} = \cos(2\pi f_4 + \xi_{4,i}) + \xi_{2,i}, \quad q_{5,i} = \cos(2\pi f_5 + \xi_{5,i}) + \xi_{1,i}, \quad (7)$$

где ξ_i – нормальные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией

$$\xi_i = \sqrt{2 \ln\left(\frac{1}{r_i}\right)} \cos(2\pi r_{2i}), \quad (8)$$

r_1 и r_2 – выборки случайных величин с равномерным законом распределения на интервале $[0;1]$.

В работе использовались следующие значения частот $f_1=49500$ Гц, $f_2=51500$ Гц, $f_3=50000$ Гц, $f_4=51000$ Гц, $f_5=49000$ Гц. В качестве затухающих колебательных процессов был использован импульс Берлаге (3) с параметрами: $A_1=1.25$, $A_2=0.75$, $A_3=4.25$, $A_4=2$, $A_5=3.25$, $A_6=1.25$; $\omega_1=130\pi$, $\omega_2=120\pi$, $\omega_3=110\pi$, $\omega_4=120\pi$, $\omega_5=102\pi$, $\omega_6=98\pi$; $\alpha_1=100$, $\alpha_2=90$, $\alpha_3=130$, $\alpha_4=100$, $\alpha_5=120$, $\alpha_6=70$. Результат моделирования приведен на рис. 3.

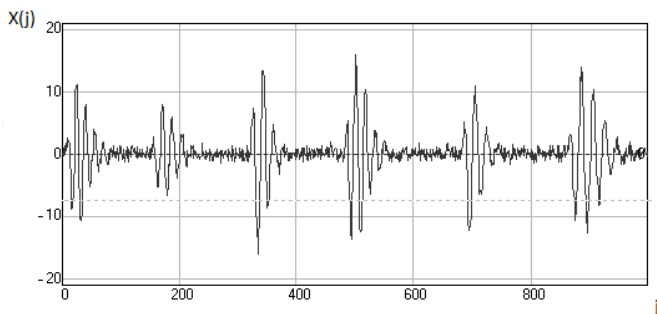


Рисунок 3 – Математическая модель сейсмического сигнала

В данной работе изучены и проанализированы различные модели сейсмических сигналов. Реализована модель сейсмического сигнала в виде суммы узкополосных составляющих аддитивно смешанных с широкополосным шумом. Данная модель содержит специфические свойства сейсмических сигналов, что позволит выделить из сигнала информативные параметры и в дальнейшем применить их для детектирования нарушителя и анализа его вида различными методами.

Список литературных источников

1. Konishi S. Information Criteria and Statistical Modeling / S. Konishi, G. Kitagawa. - Tokyo: Springer, 2008. - 237 с.
2. Райфельд М.А. Непараметрический метод обнаружения сигналов от сейсмически активных объектов: Том 41 / М.А. Райфельд, А.А. Спектор // Автотметрия. - 2005. - №6. – С. 88.
3. Филатова С. Г. Оценивание временных параметров сигналов в сейсмических системах охраны: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.17 – «Теоретические основы информатики» / С.Г. Филатова. – Новосибирск, 2011. - 22 с.
4. Долгих Л. А. Алгоритмы обработки информации на основе анализа быстропеременных процессов: дис. ...канд. техн. наук: 05.13.01 / Людмила Анатольевна Долгих. – Пенза, 2014. – 157 с.
5. Зенов А.Ю. Алгоритмы обнаружения и обработки информации на основе экстремальной фильтрации в системах периметровой охраны: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (в технике и технологиях)» / А.Ю. Зенов. – Пенза, 2013. - 24 с.
6. Мясникова Н. В. Совершенствование метода экстремальной фильтрации / Н.В. Мясникова, М.П. Берестень // Управление и информационные технологии: всерос. науч.-техн. конф., 24-25 апр. 2014 г.: материалы конф. – Пенза, 2014. - С. 35-38.
7. Антипенский Р. В. Разработка моделей случайных сигналов / Р.В. Антипенский // Компоненты и технологии. - 2007. - №11. – С. 147-151.

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ КОЛИВАННЯ БІОМАСИ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ПОПУЛЯЦІЇ ВИНОГРАДНОГО СЛИМАКА (*Helix pomatia*) У СКЛАДІ ЛІСОВОГО БІОЦЕНОЗУ

І.М.Грод, Л.О.Шевчик

Тернопільський національний педагогічний університет ім. Володимира Гнатюка, Тернопіль

Вступ. В західних регіонах України вивчення наземної малакофауни у XIX – XX ст. було зосереджене, в основному, в Українських Карпатах і на заході Подільської височини. Найстаріші відомості про молосків Західного Поділля та Прутсько-Дністровського межиріччя опубліковані у праці Й. Баковського (Bakowski, 1884), присвяченій наземним і прісноводним молоскам Галичини у розділі під загальною назвою «Поділ». Відомості про цю групу тварин Тернопільщини знаходимо в малакологічній літературі кінця XIX століття (Clessin S., 1887, Bakowski, 1892). Подальші дослідження у цій галузі проводили Ю.Полянський (1932) [5], та Калужацька М.З. (1963) [4].

Детальним вивченням наземних молосків Тернопільської області займалися Кузьмович Л.Г. та Кузьмович М.Л. Збір матеріалів вони проводили в різноманітних природно-територіальних комплексах регіону, зокрема, в Кременецьких горах, Товтрах, Придністров'ї, на Подільській височині, та на Ікво-Вілійській та Авратинській рівнинах.

Поряд з суто фауністичними дослідженнями в західних регіонах України проводились також екологічні дослідження цих тварин (В.І.Здун, 1960, 1963 [2,3], Стадниченко А.П., Стадниченко Ю.А., 1984 [10], Байдашніков О.О., 1992, 1996 [1], Сверлова Н.В., 1999 [9]). Власне Свердловою Н.В. (1999, 2003, 2004) деталізовано історичні аспекти формування та зоогеографічний склад сучасної малакофауни заходу України [6,7,8].

Розширення списку природних ресурсів, які використовує людина, спричинило залучення до об'єктів експлуатації й слимака виноградного, якого протягом століть споживають у їжу мешканці цілого ряду європейських країн. В Україні слимаків ще донедавна практично не споживали. Сьогодні ж страви з наземних молосків подаються у престижних ресторанах, продаються у супермаркетах. Останнім часом у різних регіонах Західної України почався інтенсивний збір та заготівля молосків для експортування за кордон та для власних потреб. Протягом 2014-2015 років цей процес поширився і на Тернопільську область [11]. Неконтрольований збір цих тварин може спричинити руйнування природних популяцій *Helix pomatia* і, як наслідок, порушення колообігу речовин в екосистемах області. Все це зумовлює необхідність активізації вивчення процесів життєдіяльності виду, структури, чисельності та продуктивності популяції слимака виноградного у нашому регіоні.

Матеріал і методи досліджень. Збір матеріалу проводили у лісах околиць села Великі Чорнокінці Чортківського району Тернопільської області протягом весняно-літньо-осіннього періодів. Досліджувана територія (площею біля 1 га) була поділена на 6 ділянок, місцеві назви яких: Долина (площею 147 м²), Боднарі (184 м²), Лисячі нори (193 м²), Дубчаки (232 м²), Лісок (112 м²), Чехів (132 м²).

Перші весняні збори були орієнтовані, переважно, на добре помітні у цей час порожні черепашки, наступні – на збір і вивчення живих молосків. Найбільш сприятливою для малакологічних досліджень виявилась дощова погода, при якій тварини, вивозяючи на стовбури дерев, були добре помітними і доступними для збирання [1]. Великих за розмірами молосків збирали вручну у мішечки, пошиті з цупкої тканини. Для кожної ділянки використовували окремий мішечок, етикетку прив'язували на зовнішньому боці мішка, щоб запобігти забрудненню та розривам останньої. Зібраних молосків зважували разом з мішечками на електронній вазі ВЕУ-2-0,5/1.

Біомасу слимака виноградного кожної окремої ділянки обчислювали як масу особин досліджуваного виду, що припадає на одиницю площі. Вимірювали цю величину в одиницях сирової маси на одиницю площі.

Розрахунок проводили за формулою 1:

$$\text{Біомаса} = \text{маса молосків (г, кг)} / \text{площу (м}^2, \text{ га)} \quad (1)$$

Біомасу досліджуваної території знаходили як суму біомас перелічених ділянок. Загальну біомасу популяції обчислювали множенням біомаси досліджуваної ділянки на площу лісу (112 га).

Для підрахунку продукції з'ясовували, скільки нової речовини утворилося за рік в результаті життєдіяльності молосків (формула 2). Одиниці вимірювання: кг / 1000 м² × рік.

$$\text{Продукція} = \text{різниця біомаси} / \text{час} \quad (2)$$

Продуктивність популяції обчислювали у відсотках діленням продукції на біомасу (формула 3).

$$\text{Продуктивність} = \text{продукція} / \text{біомаса} \times 100\% \quad (3)$$

Результати досліджень та їх обговорення. Останнім часом для вирішення багатьох актуальних задач екології та біології широко застосовується математичне моделювання. Прогнозування чисельності промислових популяцій, розробка оптимальної стратегії промислу, вивчення впливу антропогенних факторів на чисельність біологічних видів — ось далеко не повний перелік завдань, вирішення яких немислиме без застосування математичного моделювання.

Ми спробували спрогнозувати продуктивність популяції слимака виноградного, використовуючи динамічну модель з елементами стохастики різних змін в популяції живих організмів. Зібрані протягом кількох років дані були закладені в код програми разом з математичними формулами для їх опрацювання:

- обчислення швидкості зростання живої речовини в популяції (показник приросту популяції) $V_n = rN - (r/K)N^2$, де $r = (\ln(N_2) - \ln(N_1)) / (t_2 - t_1)$;

- обчислення показника максимально можливої біомаси $N(t) = N_0 \exp(r(t - t_0))$.

Математично прогнозовані показники лісової популяції слимака виноградного ми відобразили в таблиці середовища програмування.

Роки досліджень	Біомаса	Річна продуктивність	Продуктивність
2009	4,2	-	-
2010	4,5	0,3	7,1
2011	4,9	0,4	8,9
2012	5,2	0,3	6,1
2013	6,3	1,1	21,2
2014	5,822093465866...	-0,47790653413...	-7,6
2015	5,549021591260...	-0,27307187460...	-4,7
2016	5,150719200019...	-0,39830239124...	-7,2
2017	4,605669045369...	-0,54505015465...	-10,6
*			

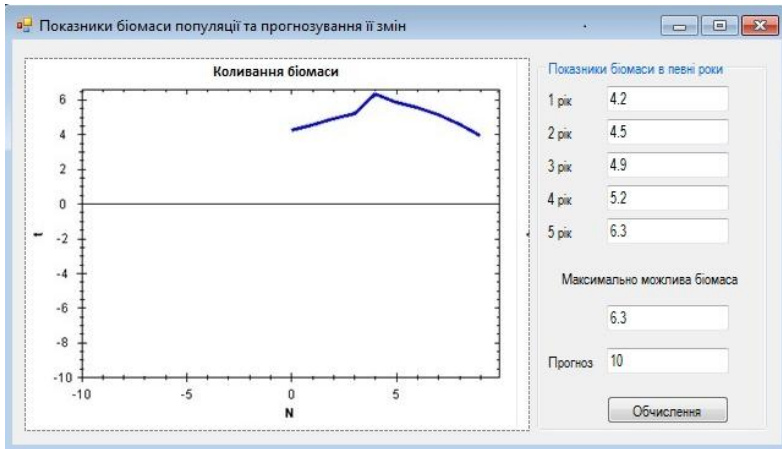


Рисунок 1 - Графік коливання біомаси популяції та прогнозування її змін показує форма системи програмування.

Отримані шляхом математичного моделювання результати знайшли підтвердження в процесі польових досліджень лісової популяції слимака виноградного. Виявлене при цьому зростання біомаси моллюска від 4896 г/га (у 2009 році), 5864 г/га (у 2010 році), 6214 г/га (у 2011 році), 6515 г/га (у 2012 році), до 6900 г/га (у 2013 році) пояснюється зростанням кількості речовини, що виробляється популяцією в процесі самовідтворення (табл. 1).

Для аналізу рентабельності відлову моллюсків оперували поняттям загальної біомаси слимака виноградного. Проведені обчислення продемонстрували тенденцію до зростання цього показника від 2009 р. (548,4 кг/т), 2010 р. (656,8 кг/т), 2011 р. (696,0 кг/т), 2012 р. (729,3 кг/т), до 2013 р. (772,8 кг/т).

Таблиця 1 - Показники продуктивності лісової популяції *Helix pomatia* (на прикладі матеріалів Чортківського району Тернопільської області)

Роки дослідження	Біомаса, г/га	Загальна біомаса, кг/га	Продукція, г/га	Продуктивність, %
2009	4896	548,4		
2010	5864	656,8	968	16,5
2011	6214	696,0	350	5,6
2012	6515	729,7	301	4,6
2013	6900	772,8	385	5,6
2014	6400	716,8	-500	-7,8

З екологічної точки зору, для встановлення швидкості зростання живої речовини підраховуємо показник продукції досліджуваної популяції. Для цього, з'ясовуємо скільки живої речовини утворилося протягом року внаслідок життєдіяльності *Helix pomatia* в регіоні, тобто обчислюємо зростання біомаси на одиницю поверхні та часу. Проведені дослідження продемонстрували зниження приросту живої речовини від 968 г/га протягом 2009 – 2010 років, 350 г/га протягом 2010 – 2011 років, 301 г/га протягом 2011 – 2012 років. Аналогічно зменшується і продуктивність досліджуваної популяції від 16,5% у 2010 р., 5,6% у 2011 р., до 4,6% у 2012 році, що створює передумови до подальшого спаду показника в наступні роки.

Висновки

1. Виявлена методом математичного моделювання корелятивна залежність між спадаючими показниками продукції, а отже, і продуктивності лісової популяції слимака

виноградного, створює передумови для зниження біомаси моллюска у найближчі роки, не дивлячись на п'ятирічне (2009 – 2013 рр.) зростання цього показника протягом перших років дослідження.

2. Отримані шляхом математичного моделювання результати знайшли підтвердження в процесі польових досліджень лісової популяції слимака виноградного. Виявлене при цьому зростання показника біомаси пояснюється зростанням кількості речовини виробленої популяцією моллюска в процесі самовідтворення.

3. Зниження приросту живої речовини і, як наслідок, зменшення продуктивності створює в подальшому передумови для спаду біомаси популяції слимака виноградного.

Список літературних джерел

1. Байдашников А.А. Наземная малакофауна Украинского Полесья. Сообщение 2. Формирование современных малакокомплексов / А.А. Байдашников // Вестн. зоологии. – 1996. – № 3. – С. 3-13.
2. Здун В.И. Материалы к фауне моллюсков Карпатских полонин / В.И.Здун // Флора и фауна Карпат.– М.: изд-во АН СССР, 1963. – Вып. 2. – С. 154-158.
3. Здун В.И. До фауни моллюсків Закарпаття / В.И.Здун // Наук. зап. наук.-природозн. музею АН УРСР. – К.: вид-во АН УРСР, 1960. – С. 83-95.
4. Калужняцька М.З. Колекції сучасних моллюсків Науково-природознавчого музею АН УРСР. Родина ставковикових – Limnaeidae / М.З. Калужняцька // Сучасна та минула фауна західних областей України. – К.: вид-во АН УРСР, 1963. – С. 69-75.
5. Полянський Ю. Матеріяли до пізнання малякофауни західного Полісся / Ю. Полянський // Зб. фізіограф. коміс. – Львів: Друкарня Наук. т-ва ім. Шевченка. – 1932. – вип. 4-5. – С. 83-100.
6. Сверлова Н.В. Зоогеографічний склад сучасної фауни черевоногих моллюсків (Gastropoda) західної частини Подільської височини / Сверлова Н.В., Гураль Р.І. // Вісн. Львів. ун-ту. Серія Географічна. – 2004. – Вип. 30. – С. 288-293.
7. Сверлова Н.В. Історичні зміни у наземній малакофауні (Gastropoda, Pulmonata) великого міста на прикладі Львова / Н.В. Сверлова // Сучасна екологія і проблеми сталого розвитку суспільства: Наук. вісн. Укр. держ. лісотехн. ун-ту. – Львів, 1999. – Вип. 9.– С. 127-130.
- 8.Сверлова Н.В. Історія і стан вивчення наземної малакофауни (Gastropoda, Pulmonata) заповідника "Медобори" / Н.В. Сверлова // Роль природно-заповідних територій Західного Поділля та Юри Ойцовської у збереженні біологічного та ландшафтного різноманіття. – Гримайлів-Тернопіль: Лілея, 2003. – С. 499-507.
- 9.Сверлова Н.В. Наземні моллюски (Gastropoda, Pulmonata) природних та урбанізованих екосистем Розточчя / Н.В. Сверлова // Природа Розточчя: Збірник наук.-техн. праць заповідника "Розточчя". – Івано-Франкове: ПЗ "Розточчя", 1999. – Вип.1. – С. 150-154.
- 10.Стадниченко А.П., К фауне и экологии пресноводных моллюсков (Gastropoda, Bivalvia) Украинского Полесья / Стадниченко А.П., Стадниченко Ю.А. // Гидробиол. журн. – 1984. – Т. 20, № 2. – С. 36-40.
11. Електронний ресурс: <http://te.20minut.ua/Podii/ravlikiv-z-ternopil-shini-vezut-na-m-yasov-yevropu-10446435.html>.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-УПРАВЛЯЮЧОЇ СИСТЕМИ НА ЛОГІЧНОМУ РІВНІ

О.П. Доренський

Кіровоградський національний технічний університет, Кіровоград

Основним забезпеченням сучасних інформаційно-управляючих систем (ІУС) є програмне забезпечення (ПЗ). При цьому до ІУС висуваються багатогранні технічні вимоги, левова частина з яких визначаються саме ПЗ, його надійністю. Водночас, властива програмному забезпеченню ІУС складність негативно спливає на надійність [1].

Безперечно, перспективне ПЗ сьогодні розробляється на основі об'єктно-орієнтованого підходу. Проте вже зазначена складність ПЗ ІУС визначає істотне перевантаження взаємодії й структури об'єктів програмного забезпечення, яке розробляється на основі ООП [2]. Це може привести до збільшення кількості дефектів в програмній системі, що тягне за собою істотне зниження надійності. А це є неприпустимим і критичним з погляду вимог як до безпосередньо програмного забезпечення, так і до ІУС загалом. Отже, сформульована проблема є на стільки важливою, що її вирішення вимагає комп'ютерного моделювання процесів, які протікають у програмній системі. При цьому слід зважати на той факт, що питання забезпечення надійності ПЗ слід вирішувати на всіх стадіях його життєвого циклу (рис. 1, а), які відповідно до об'єктно-орієнтованої методології поділяють на концептуальний, логічний та фізичний рівні [3]. Проте численні дослідження засвідчують, що витрати (ресурси) на виявлення й усунення помилок у ПЗ істотно зростають з кожною наступною стадією життєвого циклу (рис. 1, б) [4]. З цього обґрунтовано випливає задача моделювання функцій ПЗ на початкових стадіях його ЖЦ, на логічному рівні. Це дозволить скоротити ресурси, необхідні на реалізацію і впровадження програмного забезпечення ІУС.

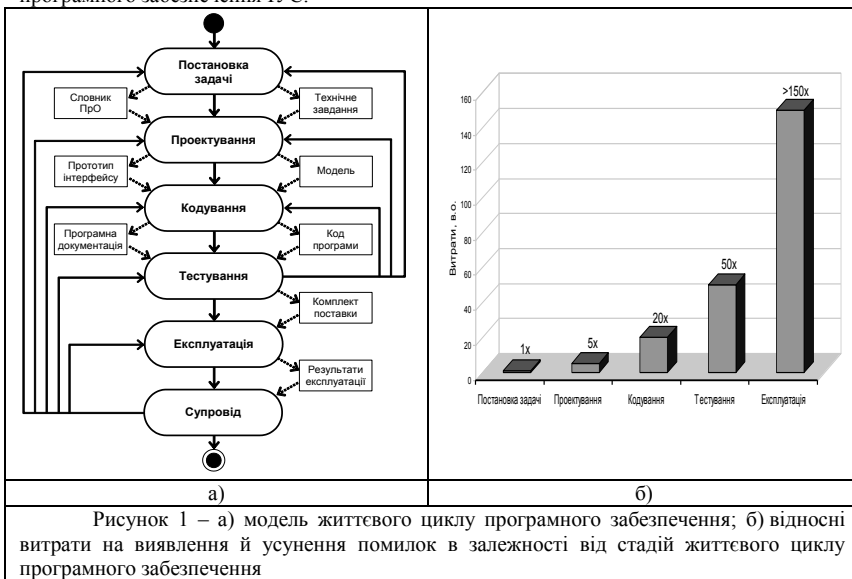


Рисунок 1 – а) модель життєвого циклу програмного забезпечення; б) відносні витрати на виявлення й усунення помилок в залежності від стадій життєвого циклу програмного забезпечення

На логічному рівні розроблення ПЗ визначається як процес отримання деталізованої моделі програмного забезпечення системи із суворо сформульованими цілями, поставленими перед ПЗ, а також написання специфікацій, що задовольняють встановлені вимоги. Програмне забезпечення ІУС представляється комплексом узгоджених моделей, які описують різні його аспекти мовою UML та візуалізованими у вигляді діаграм. Кожна з діаграм конкретизує відповідний аспект ПЗ на логічному рівні [3, 5].

Моделі можуть містити будь-яку комбінацію сутностей. Проте у практиці моделювання застосовують порівняно невелику кількість типових комбінацій, представлених у праці [3]. При цьому їх слід розділити на моделі, які відображають статичні, та моделі, що відображають динамічні аспекти системи, тобто функції (поведінку) ПЗ. З означеного постає актуальна задача, яка полягає у побудові й використанні на логічному рівні ЖЦ імітаційної моделі діаграми діяльності, яка є фундаментальною одиницею визначення функцій об'єкта в специфікації, задля семантичної перевірки реактивності всіх об'єктів програмного забезпечення. Отже, метою роботи є розроблення імітаційної моделі ПЗ ІУС.

Сформульована мета роботи досягається шляхом розв'язування поставленої задачі наступним чином.

1. На основі концептуальної моделі – діаграми діяльностей [3] – будується формальна модель в термінах автоматних мереж Петрі [6, 7]. Вибір означеного математичного апарату як основи формальної моделі обґрунтовується, по-перше, скінченно-автоматною сутністю діаграми діяльностей; по-друге, такими перевагами автоматних мереж Петрі: допускають довільну інтерпретацію елементів моделі як за типом фрагмента, що виконується, так і за рівнем абстракції; дозволяють моделювати асинхронність і недетермінованість паралельних незалежних подій, а також конфліктні взаємодії між процесами; як математична модель займають проміжне місце між скінченними автоматами та машинами Тюрінга (зокрема за виразної потужності вони значно багатші за автомати, наближаються до машин Тюрінга); включають можливості ряду інших моделей, запропонованих для паралельних систем, дозволяючи описувати як типові ситуації в означених системах, так і загальну динаміку функціонування складних асинхронних систем. Зазначені фактори забезпечують можливість використання обраного апарату як бази для створення імітаційних моделей об'єктів програмного забезпечення інформаційно-управляючих систем.

2. Програмна реалізація запропонованої імітаційної моделі, що здійснюється або однією з сучасних об'єктно-орієнтованих мов програмування (C++, C#, Delphi та ін.), або з використанням відомих засобів: MATLAB Simulink, PetriNet тощо.

Отже, запропонована імітаційна модель забезпечує опис і представлення динамічних процесів програмного забезпечення ІУС в межах діяльностей об'єктів задля аналізу й семантичної перевірки функціонування ПЗ на логічному рівні. Означене дозволяє на початкових стадіях життєвого циклу (ще до програмування) досягти належних показників надійності програмної системи, зменшити необхідний ресурс на створення й впровадження програмного забезпечення інформаційно-управляючих систем.

Список літературних джерел

1. Dorensky O. Design and development of software for digital image compression based on discrete Hartley transform / Dorensky Oleksandr, Meleshko Elisaveta, Smirnov Sergii // Internet-Education-Science (IES-2014): Ninth International Scientific-Practical Conference, Oct. 14-17, 2014 : Proceedings. – Vinnytsia, 2014 – P. 124-126.

2. Weisfeld M. The Object-Oriented Thought Process, Fourth Edition / Matt Weisfeld. – Addison-Wesley, Pearson Education, Inc., 2013. – p. 306.

3. Дудзяний І. М. Об'єктно-орієнтоване моделювання програмних систем: Навчальний посібник. / І. М. Дудзяний. – Львів: ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка, 2007. – 108 с.

4. Pomorova O. Intelligent assessment and prediction of software characteristics at the design stage / Oksana Pomorova, Tetyana Hovorushchenko // American Journal of Software Engineering and Applications. – 2013. – Vol. 2, No. 2 – pp. 25-31.

5. Маклафлин Б. Объектно-ориентированный анализ и проектирование / Бретт Маклафлин, Гэри Поллайс, Дэйв Уэст. – СПб.: Питер, 2013. – 608 с.

6. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: Пер. с англ. / Джеймс Питерсон. – М.: Мир, 1984. – 264 с.

7. Зайцев Д. А. Универсальная сеть Петри / Д. А. Зайцев // Кибернетика и системный анализ. – № 4. – 2012. – С. 24-39.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНО - ПЛАСТИЧНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ТІЛ
З УРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНОГО ХАРАКТЕРУ ДЕФОРМУВАННЯ
К.Е. Дьомічев¹, П.О. Стеблянко²**

¹Європейський університет, Черкаси
²Дніпродзержинський державний технічний університет, Дніпродзержинськ

Деталі і елементи металургійних конструкцій в процесі створення і експлуатації можуть перебувати під впливом складного нестационарного силового і температурного навантаження. До складних процесів нерівномірного деформування може призводити і нерівномірний нагрів тіл у поєднанні з силовими чинниками.

Для моделювання поведінки елементів металургійних конструкцій потрібно визначати нестационарний термомеханічний стан тіла не тільки на пружній стадії деформування, а й за межею пружності. Існуючі чисельні методи розв'язання таких нестационарних задач призводять, як правило, до великих обчислювальних труднощів, пов'язаних з вирішенням великих систем алгебраїчних рівнянь, і не завжди бувають ефективні. Ці обставини суттєво ускладнюють моделювання поведінки пружно-пластичних циліндричних тіл під дією температурного та силового навантаження.

Температурне поле для ізотропного тіла у випадку врахування тепла, що виділяється в процесі його деформування під дією температурного та силового навантаження, визначається шляхом розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності при певних початкових і граничних умовах [1]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left\{ \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \left(a \frac{H_2 H_3}{H_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial \alpha^1} \right) + \frac{\partial}{\partial \alpha^2} \left(a \frac{H_1 H_3}{H_2} \cdot \frac{\partial T}{\partial \alpha^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \alpha^3} \left(a \frac{H_2 H_1}{H_3} \cdot \frac{\partial T}{\partial \alpha^3} \right) \right\} + W_*, \quad (1)$$

де W_* - функція розсіювання або питома потужність внутрішніх джерел теплоти, $a = \frac{\lambda(T)}{c, \rho}$ -

ізохорна температуропровідність, яка для термочутливих матеріалів залежить від температури і потребує окремого математичного моделювання, H_i - параметри Ляме ($i = 1, 2, 3$), точкою позначені похідні за часом, α^i - ортогональні криволінійні координати

$$W_* = S_{ij} \dot{\mathcal{E}}_{ij} - \frac{1}{2G} S_{ij} \dot{S}_{ij} + \frac{\sigma_{ii}}{3} \left(\dot{\varepsilon}_{jj} - 3\alpha_T \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \frac{\sigma_{ii}}{3K} \dot{\sigma}_{jj},$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma, \quad \mathcal{E}_{ij} = \varepsilon_{ij} - \delta_{ij} \varepsilon, \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{ii}}{3}, \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon_{ii}}{3}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad K = \frac{3E}{1-2\nu}.$$

Тут S_{ij} , \mathcal{E}_{ij} - відповідно девіатори тензорів напруг і деформацій, σ_{ij} , ε_{ij} - тензори напруги і деформації.

Початковий розподіл температури в тілі, що відповідає природному ненапруженому стану тіла, задається так

$$T = T_0(\alpha^i) \quad \text{при} \quad t=0 \quad (3)$$

Граничні умови, які відображають вплив навколишнього середовища на температуру тіла, задаються в такий спосіб

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T-\theta) - q \quad (4)$$

де n - зовнішня нормаль до поверхні тіла, α_T - коефіцієнт лінійного теплового розширення, α - коефіцієнт теплообміну, θ - температура навколишнього середовища, q - тепловий потік.

У загальному випадку величини α , θ , q можуть залежати від часу й положення точки ($\alpha^1, \alpha^2, \alpha^3$) на поверхні тривимірного тіла V . Умова (2.4) при різних значеннях коефіцієнта α

містить три види граничних умов. Граничні умови першого роду полягають у тому, що на поверхні тіла в кожний момент часу заданий розподіл температури ($\alpha \rightarrow \infty, q = 0$). Граничні умови другого роду задають тепловий потік q через поверхню тіла ($\alpha = 0, q \neq 0$). Граничні умови третього роду формують закон теплообміну між поверхнею тіла й навколишнім середовищем при заданій величині $\Theta(q=0, \alpha \neq 0)$ [1].

Окрім температури в кожній точці тіла треба знайти зміщення точок тіла u_i (або їх швидкості V_i) і тензори напруги та деформації.

Створена нова математична модель для кількісного опису і дослідження термомеханічних процесів в циліндричних тілах з урахуванням залежності термомеханічних параметрів матеріалу від температури. За допомогою цієї моделі розв'язано ряд задач математичного моделювання [2-5], пов'язаних з розрахунками на міцність деталей металургійних конструкцій (валки слябінгів, блюмінгів і заготівельних станів). Наведені результати мають більш високий порядок точності в порівнянні з аналогічними результатами, отриманими за допомогою різничевого методу і реалізований за допомогою комп'ютерних пакетів Mathcad, Matlab.

Список літературних джерел

1. Стеблянюк П.А. Пространственные нестационарные задачи теории термоупругопластичности. НАН Украины, Институт механики, Министерство образования Украины, ДГТУ. 1997. – 273с.
2. Стеблянюк П.О. Моделювання поля напруження та деформації при нестационарному температурному навантаженні циліндричних тіл / П.О. Стеблянюк, К.Е. Дьомічев // «Строительство, материаловедение, машиностроение» Серия «Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве. - Выпуск 76.- Днепропетровськ, 2014- С.262-270.
3. Pavel A. Steblyanko Application of Fractional Steps Method for Determining the Stress and Strain Field during the Temperature Load of Cylindrical Bodies. / Pavel A. Steblyanko, Konstantin E. Dyomichev // DOI 10.12851/EESJ201501C06ART06. Eastern European Scientific Journal. ISSN 2199-7977 Ausgabe 1-2015, p. 138 -147.
4. Дьомічев К.Е. Про достовірність теоретичних розрахунків для деяких деталей машин, які працюють в умовах підвищених температур / К.Е. Дьомічев // Збірник наукових праць Вісника ЧДТУ, Серія «Технічні науки». - Випуск №1.- Черкаси, 2015 рік. - С.130-135.
5. Стеблянюк П.А. Определение нестационарного термонапряженного состояния в растущей по известному закону цилиндрической трубе / П.А. Стеблянюк, К.Э. Демичев // Збірник наукових праць Вісника ЧДТУ, Серія «Технічні науки». - Випуск №2.- Черкаси, 2015 рік. - С.106.-109.

О ПОДХОДАХ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

О.А. Жульковский, И.И. Жульковская

Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск

Введение. Как известно, разработка новых и усовершенствование штатных конструкций металлургического оборудования, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей передела, сдерживается отсутствием широкой и достоверной информации о тепловом режиме его эксплуатации. В то же время, проведение значительного числа необходимых промышленных экспериментов, способных дать ответы на проблемные вопросы функционирования устройств для выплавки, внеагрегатной обработки и разливки металла, трудноосуществимо и не представляется возможным и материально обоснованным. Для решения подобного рода задач наиболее предпочтительным и целесообразным является применение вычислительных методов и математического моделирования с использованием современных ЭВМ.

Результаты работы. Авторами унифицированы и апробированы подходы к математическому моделированию теплового режима металлургического оборудования, используемого на различных этапах сталеплавильного передела, от выплавки до разливки металла.

После постановки задачи и общего описания моделируемой системы с учетом принятых допущений строится математическая модель ее теплового режима.

Как известно, температурное поле конструкции может быть описано дифференциальным уравнением теплопроводности, которое в каждом конкретном случае принимает вид в соответствии с принятыми в задаче системой координат и размерностью расчетной области. Вопрос сеточного описания используемых для передела устройств обычно не вызывает дополнительных трудностей. При необходимости сложные проекции устройства заменяются на плоскости ступенчатой поверхностью. Теплофизические величины уравнения Фурье получают в результате аппроксимации температурными функциями соответствующих табличных значений.

Как показывает практика основных этапов металлургического передела, на протяжении всего времени операций на рабочих поверхностях оборудования имеет место сложный радиационно-конвективный теплообмен. Ввиду известной сложности численной реализации задач теплопереноса инженерные расчеты сложного теплообмена проводятся на основе принципа аддитивности – отдельно и независимо вычисляются тепловые потоки вследствие радиационного теплообмена и теплопроводности или конвекции, а результаты суммируются.

Начальные условия реализации конкретной задачи принимаются в соответствии с известными практическими данными.

Конечно-разностная аппроксимация принятых уравнений теплопроводности, а также граничных условий получается интегро-интерполяционным методом (методом баланса), т.е. из непосредственной аппроксимации соотношений теплового баланса, записанных для элементарных объемов. При этом для тепловых потоков на границах расчетной области используются выражения, обеспечивающие выполнение условий согласования.

Для расчета температурного поля используется численный метод прогонки, и поэтому уравнения баланса теплоты сразу записываются в неявном, расщепленном по пространственным переменным виде. Таким образом, аддитивная квазилинейная разностная схема принимает вид в соответствии с этапами расщепления по направлениям теплового потока.

Выводы. Разработаны, унифицированы и апробированы подходы к математическому моделированию теплового режима металлургического оборудования, используемого на основных этапах металлургического передела от выплавки до разливки металла. Результаты работы нашли свое применение, в частности, для исследования теплового режима верхней и донных продувочных устройств конвертеров для выплавки, а также ковшовых затворов для разливки стали с целью повышения надежности и стойкости указанных устройств.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СЕЧЕНИЙ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Н.В. Иванец

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Стержневые системы являются составной частью конструкций используемых на предприятиях химической отрасли. Такие конструкции часто функционируют в технологических средах, агрессивных по отношению к металлу. Для обеспечения надежной работы таких конструкций на протяжении всего предполагаемого срока эксплуатации при их проектировании следует учитывать влияние агрессивных сред.

Одной из основных составляющих математической модели поведения конструкции в агрессивной среде является модель корродирующего сечения.

Существуют алгоритмы, позволяющие с высокой точностью получить модели корродирующих элементов в виде совокупности треугольных фрагментов [1]. Их недостатком является разное количество параметров для разных сечений и использования вычислительных алгоритмов для определения их геометрических характеристик.

До недавнего времени в известных расчетах использовались модели сечений разных профилей (двутавр, уголок, швеллер) в виде совокупности прямоугольных фрагментов [2], в дальнейшем – модельных сечений.

В этом случае количество параметров сечений невелико (от 2 до 4) и для определения геометрических характеристик используются аналитические выражения. При всех преимуществах данных моделей их применение затруднительно, так как не существует правила назначения их параметров таким образом, чтобы корродирующий процесс в них развивался также, как и в реальных сечениях. Под моделированием коррозионного процесса в стержне в данном случае подразумевается описание изменения во времени площади, минимального момента инерции и напряжения.

В данной работе предлагается алгоритм определения начальных размеров модельных сечений, при которых изменение их геометрических характеристик во времени происходит так же, как и для реальных сечений.

Количество параметров сечений, очевидно, должно совпадать с количеством уравнений, обеспечивающих это выполнение этого условия. Доказано, что для этого достаточно, чтобы в начальный момент времени совпадали периметр, площадь и минимальный момент инерции сечения, а в произвольный момент времени выполнялись условия равенства производных момента инерции по времени.

Вектор параметров модельных сечений \bar{x} определяется из условия минимума квадрата отклонений вышеприведенных функций:

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\varphi_i(\bar{x}) - f_i}{f_i} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где φ_i и f_i - функции площади, периметра, момента инерции и его производной по времени в модельном и реальном сечениях соответственно.

Соответствующая задача минимизации решается методом случайного поиска.

Для всех фасонных профилей (двутавр, швеллер, уголки) получены размеры эквивалентных сечений. Это позволило использовать для моделирования поведение корродирующих конструкций, включающих стержневые элементы, более удобные модели корродирующих сечений.

Список использованной литературы

1. Мяченков В.И., Григорьев И.В. Расчет составных оболочечных конструкций на ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1981. – 111 с.
2. Зеленцов Д.Г., Ляшенко О.А., Науменко Н.Ю. Информационное обеспечение расчетов корродирующих объектов. Математические модели и концепция проектирования систем. – Днепропетровск: УГХТУ, 2012 – 264 с.

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МІГРАЦІЇ
БЛИЗЬКОСПОРІДНЕНИХ ВИДІВ
К. С. Іванків**

Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів

Вступ. Направлена міграція є невід'ємною частиною життя біологічних спільнот. Врахування міграційних ефектів особливо важливо при моделюванні розподілу близькоспоріднених видів в одній екологічній ніші.

У даній роботі розглянуто модель розподілу по ареалу конкуруючих за єдиний ресурс близькоспоріднених популяцій, що записана у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь параболічного типу. Проаналізовано випадок, коли міграційні потоки залежать від нерівномірності розподілу видів і ресурсів. На основі методу прямих проведено чисельне дослідження можливих сценаріїв співіснування і витіснення популяцій. Встановлена можливість застосування моделі конкуруючих видів для прогнозування поведінки реальних біосистем.

Постановка задачі. Для двовимірного ареалу і двох конкуруючих популяцій розглядається модель, що враховує міграційні потоки при неоднорідності життєвих умов і нерівномірності розподілу самих популяцій:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\nabla q_1 + f_1, \quad q_1 = -\varepsilon_1(u, v)\nabla u + \alpha_1 u \nabla p + \beta_1 u \nabla v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla q_2 + f_2, \quad q_2 = -\varepsilon_2(u, v)\nabla v + \alpha_2 v \nabla p + \beta_2 v \nabla u. \quad (2)$$

Тут $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ – густини близькоспоріднених видів, q_1, q_2 – міграційні потоки, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right)^T$.

Природний приріст густини популяцій опишемо «логістичним» законом [2]:

$$f_1 = \mu_1 u f_0, \quad f_2 = \mu_2 v f_0, \quad f_0 = \left(1 - \frac{u+v}{p}\right). \quad (3)$$

де μ_1, μ_2 – коефіцієнти природного приросту відповідно першої та другої популяцій.

Для близькоспоріднених видів неоднорідність життєвих умов по ареалу моделюється введенням додатної функції узагальненого ресурсу $p(x, y)$. Вплив неоднорідності життєвих умов враховується у виразах для q_1, q_2 членами, які містять градієнт функції $p(x, y)$.

Дифузійні коефіцієнти $\varepsilon_1(u, v)$ та $\varepsilon_2(u, v)$ є додатними функціями і залежать від густин популяцій [1]:

$$\varepsilon_i = k_i + \gamma_i g(u, v). \quad (4)$$

Тут $k_1, k_2, \gamma_1, \gamma_2$ – матриці другого порядку з невід'ємними елементами, випадок лінійної дифузії отримуємо при нульових γ_1, γ_2 .

У виразах для потоків q_1 і q_2 в (1) – (2) направлена міграція враховується другими та третіми доданками. Міграційні параметри $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ є матрицями другого порядку.

Перенесення густини популяції $u(x, y, t)$, що викликане нерівномірністю розподілу густини популяції $v(x, y, t)$ описується доданком $\beta_1 u \nabla v$. Аналогічно для густини $v(x, y, t)$ міграція, викликана нерівномірністю розподілу $u(x, y, t)$ описується доданком $\beta_2 v \nabla u$.

Для ареалу прямокутної форми $[0, a] \times [0, b]$, $b/a \square 1$ (модель долини) на сторонах $y = 0$, $y = b$ ставляться умови Неймана, а на двох інших – умови Діріхле:

$$\frac{\partial u(x, 0, t)}{\partial y} = \frac{\partial u(x, b, t)}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v(x, 0, t)}{\partial y} = \frac{\partial v(x, b, t)}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$u(0, y, t) = u_*^0(y, t), \quad u(a, y, t) = u_*^a(y, t), \quad v(0, y, t) = v_*^0(y, t), \quad v(a, y, t) = v_*^a(y, t),$$

де $u_*^0(y, t), v_*^0(y, t), u_*^a(y, t), v_*^a(y, t)$ – відомі функції.

У початковий момент часу популяції розміщені у локалізованих зонах.

Схема числового експерименту. Метою числового експерименту для системи (1)-(2) є аналіз міграційних ефектів для двох близькоспоріднених популяцій.

Для чисельного розв'язку задачі (1)-(2), (5) при заданих початкових умовах розподілу щільності популяцій застосовується метод прямих [3,4,6]. Метод прямих дозволяє понизити розмірність диференціальної задачі. Подібне пониження розмірності особливо виправдано в тих випадках, коли ролі незалежних змінних виявляються нерівнозначними.

Якщо знехтувати зміною щільності популяції по координаті y , отримаємо систему з одною просторовою змінною X .

На відрізьку $[0, a]$ вводиться рівномірна сітка

$$x_i = ih, \quad i = 0, 1, \dots, n+1, \quad h = a / (n+1), \quad (6)$$

а через u_i, v_i позначимо значення густин популяцій у вузлі x_i .

Для обчислення потоків q_1, q_2 вводиться додаткова сітка $x_{i+\frac{1}{2}} = \frac{(x_{i+1} + x_i)}{2}$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$.

Для апроксимації рівнянь (1) – (2) по просторовій змінній використовується схема, пов'язана з послідовним використанням операторів першого порядку на двоточковому шаблоні [3]. Уведемо різницевий оператор

$$(du)_{i+\frac{1}{2}} = (u_{i+1} - u_i) / h$$

та оператор обчислення середнього

$$(\delta u)_{i+\frac{1}{2}} = (u_{i+1} + u_i) / 2$$

У результаті дискретизації отримується система звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{du_i}{dt} = [dq_1 + f_1]_i, \quad (q_1)_i = (du\delta\varepsilon_1 - \alpha_1 d\rho\delta u - \beta_1 dv\delta u)_i, \quad (7)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = [dq_2 + f_2]_i, \quad (q_2)_i = (dv\delta\varepsilon_2 - \alpha_2 d\rho\delta v - \beta_2 du\delta v)_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Сіткові аналоги крайових умов мають вигляд:

$$u_0 = u_{n+1} = v_0 = v_{n+1} = 0. \quad (9)$$

Систему (7)-(8) запишемо у вигляді

$$\frac{dY}{dt} = \Psi(Y), \quad Y(t) = (u_1, u_2, \dots, u_n, v_1, v_2, \dots, v_n), \quad (10)$$

де Y - вектор вузлових змінних.

Для інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь (10) використано вкладений метод Дормана-Прінса 5("4") з автоматичним вибором кроку інтегрування [5].

Розрахунки проводились до виходу на стійкий стаціонарний розподіл популяцій. Стаціонарний режим оцінювали за середньою щільністю популяцій

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n+1} u_i, \quad \bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n+1} v_i. \quad (11)$$

Аналіз міграційних ефектів для випадку двох популяцій. Числовий експеримент проводився при таких значеннях параметрів:

$$a = 2, k_1 = 0.03, k_2 = 0.04, \gamma_1 = 0.01, \gamma_2 = \frac{4}{3\gamma_1}, \mu_1 = 3, \mu_2 = 4.$$

Функція ресурсу задається формулою:

$$p(x) = -2.0078x^9 + 10.2238x^8 - 6.0718x^7 - 54.7201x^6 + 134.4155x^5 - 119.9046x^4 + (12) \\ + 39.3701x^3 - 2.7288x^2 + 1.5430x + 0.1036.$$

Початкові розподіли густини популяцій

$$u_0(x) = \begin{cases} 0, & x < 0, \\ -\frac{0.2}{(0.4)^2}(x-0.6)(x-1.2), & 0.6 \leq x \leq 1.2, \\ 0 & x > 1.2. \end{cases} \quad (13)$$

$$v_0(x) = \begin{cases} 0, & x < 1.3, \\ -\frac{0.2}{(0.4)^2}(x-1.3)(x-1.9), & 1.3 \leq x \leq 1.9, \\ 0 & x > 1.9. \end{cases} \quad (14)$$

Функція $g(u, v)$ вибрана у вигляді: $g = uv$.

Початковий та кінцевий розподіл популяцій наведено на рисунку 1.

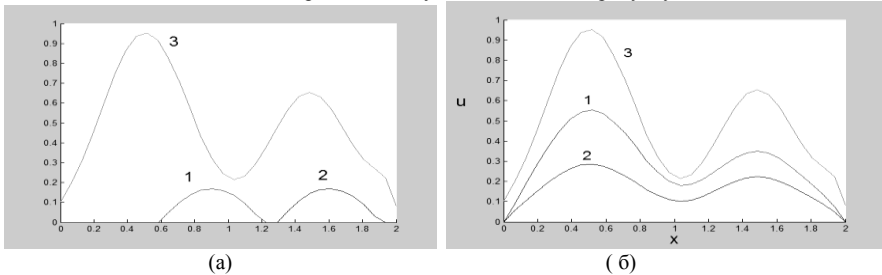


Рисунок 1 - Початковий (а) розподіл і фінальний (б) розподіл густини популяцій u (крива 1) та v (крива 2); функція ресурсу $p(x)$ (крива 3)

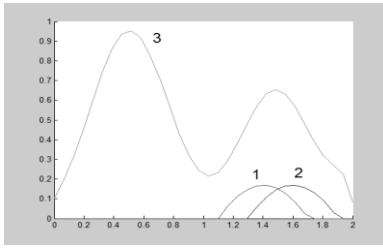
Проведені обчислення показали, що при різних коефіцієнтах міграції відбувається вихід на стійкий стаціонарний розподіл. В таблиці 1 наведено фінальні значення середніх густин популяцій при різних значеннях параметрів міграції.

Проаналізуємо вплив нерівномірності функції ресурсу на міграцію у випадку, коли $p(x, t) = p_0(x)(1 - \sigma(u(x, t) + v(x, t)))$. Розрахунки проводились при фіксованому коефіцієнті $\sigma = 0.4$, $p_0(x)$ має вигляд (11), $u(x, t), v(x, t)$ – густини популяцій в момент часу t .

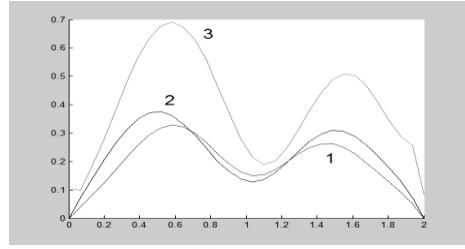
Таблиця 1. Середнє значення популяцій у кінцевий момент часу

Коефіцієнти міграції	Середнє значення популяції \bar{U}	Середнє значення популяції \bar{V}
$\alpha_1 = \alpha_2 = \beta_1 = \beta_2 = 0$	0.3010	0.1863
$\alpha_1 = 0.15, \alpha_2 = 0.01, \beta_1 = 0, \beta_2 = 0$	0.2386	0.2293
$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0, \beta_1 = -0.06, \beta_2 = -0.06$	0.3189	0.1697
$\alpha_1 = 0.15, \alpha_2 = 0.01, \beta_1 = -0.06, \beta_2 = -0.06$	0.2734	0.16837

На рисунку 2 зображено початковий та кінцеві розподіли густин популяцій при початкових розподілах, що перетинаються.



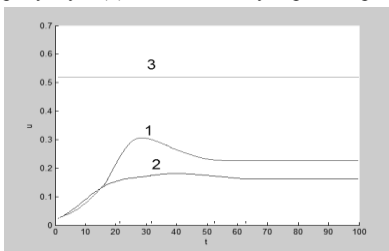
(a)



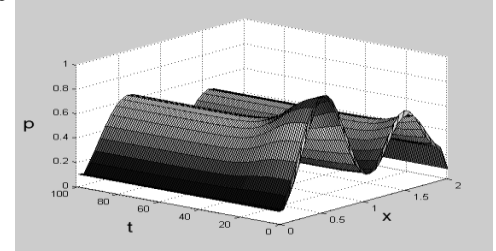
(б)

Рисунок 2 - Початковий (а) розподіл і фінальний (б) розподіл густини популяцій U (крива 1) та V (крива 2); функція ресурсу $p(x, t)$ (крива 3)

Динаміку середньої густини популяцій по ареалу зображено на рисунку 3 (а). На рисунку 3 (б) показано зміну нерівномірно розподіленого ресурсу по ареалу з часом.



(a)



(б)

Рисунок 3 - Динаміка середньої щільності популяцій по ареалу (а) за період $t \in [0, 100]$. Середнє значення функції ресурсу – крива 3. Зміна ресурсу $p(x, t)$ (б) за період $t \in [0, 100]$

Висновки. Наведені результати дослідження системи нелінійних рівнянь параболічного типу, що описує просторово-часову еволюцію двох близькоспоріднених видів.

На міграцію популяцій впливає два фактори: нерівномірність функції ресурсу і неоднорідність розподілу популяцій. В експерименті встановлено, що кожна популяція займає в основному ту сприятливу зону, до якої знаходиться ближче у початковий момент часу.

Проведені числові експерименти показали, що при різних коефіцієнтах міграції відбувається вихід на стійкий стаціонарний розподіл. Найшвидше встановлюється стаціонарний режим у випадку врахування обох міграційних факторів і найповільніше – у випадку міграції викликаної тільки неоднорідністю життєвих умов.

Список літературних джерел

1. Белотелов Н. В. Популяционные модели с нелинейной диффузией / Белотелов Н. В., Лобанов А. И. // Математическое моделирование. 1997. – т IX, №12. – С. 43-56.
2. Березовская Ф.С. Полиномиальные модели популяций с автотаксисом: решения «бегущие волны» / Березовская Ф.С., Карев В.П. // Математическое моделирование. 2000. – Т.12, №1. – С.79 – 93.
3. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем / Самарский А. А. — Москва: Наука, 1989 – 552с.
4. Самарский А. А. Численные методы решения задач конвекции-диффузии / Самарский А. А., Вабищевич П. Н. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 480 с.
5. Хайрер Э. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. / Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г.- Москва: Мир, 1990. – 512с.
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т.1: Перевод с англ. / Флетчер К. – Москва: Мир, 1991. – 504с.

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.Г. Зеленцов

Украинский государственный химико-технологический университет», Днепропетровск

При решении практических задач, связанных с прогнозированием долговечности металлических конструкций, функционирующих в агрессивных средах (АС), особое значение приобретает проблема точности моделирования коррозионных процессов. В общем случае моделирование коррозии во времени предполагает численное решение задачи Коши для систем дифференциальных уравнений (СДУ), описывающих процесс накопления геометрических повреждений. Повышение точности за счёт увеличения количества узлов временной сетки приводит к резкому увеличению вычислительных затрат. В настоящей работе предлагается методика, позволяющая достигнуть высокой точности численного решения при минимальных вычислительных затратах.

Одной из первых работ, в которой приводятся рекомендации по выбору параметров численного решения СДУ при исследовании корродирующих пластин, следует считать [1]. В ней предлагается принимать длину шага интегрирования не более $1/200$ отношения толщины пластины к скорости коррозии при отсутствии напряжений. Обобщить эти рекомендации на случай стержневых конструкций невозможно, так как они не учитывают такие важные факторы, влияющие на погрешность численного решения, как периметр сечения стержня и значение напряжения в начальный момент времени. Кроме того, следование указанным рекомендациям может приводить к чрезмерным вычислительным затратам при исследовании многоэлементных конструкций, особенно при решении оптимизационных задач.

В более поздних работах повышение эффективности и точности вычислительных алгоритмов осуществлялось посредством их модификации, в том числе – использованием аналитических зависимостей между параметрами сечения и агрессивной среды, напряжением, предельным значениям глубины коррозии и временем [2, 3]. Однако количественных оценок погрешностей решения в этих работах приведено не было.

Более перспективным представляется подход, основанный на формализации информации о влиянии на погрешность решения (помимо величины шага интегрирования) таких факторов, как начальные значения напряжений в элементе, характеристика его сечений (формы, площади, периметра) и параметров агрессивной среды. Такая формализация была осуществлена с помощью искусственных нейронных сетей (ИНС) [4, 5]. При очевидных преимуществах данного подхода остался открытым вопрос о влиянии изменения во времени внутренних усилий в стержневых элементах на точность получаемого решения.

В настоящей работе предлагается алгоритм решения задачи прогноза долговечности корродирующих статически неопределимых шарнирно-стержневых конструкций (ШСК), основанный на априорном определении зависимости внутренних усилий в стержнях и численном решении только одного дифференциального уравнения.

Математические модели поведения многоэлементных металлических конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах и подвергающихся коррозионному разрушению, включают в себя две связанные между собой группы уравнений. Первая представляет собой уравнения механики деформированного твёрдого тела – уравнения равновесия и совместности деформаций, соотношения Коши и физические соотношения.

$$\begin{cases} \bar{R} = K^{-1} \cdot \bar{u} \\ \bar{\varepsilon} = D \cdot \bar{u} \\ \bar{\sigma} = E \cdot \bar{\varepsilon} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь K, D, E – матрицы жёсткости, дифференцирования и упругости; $\bar{R}, \bar{u}, \bar{\varepsilon}$ и $\bar{\sigma}$ – векторы узловых нагрузок, перемещений, деформаций и напряжений.

Вторая группа описывает процесс изменения вследствие коррозии геометрических размеров конструктивных элементов и имеет вид системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СДУ) первого порядка:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot \Phi(\sigma_i(\bar{\delta})); \quad \delta_i|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Здесь δ_i – глубина коррозионного поражения (параметр поврежденности); t – время; v_0 – скорость коррозии при отсутствии напряжений; N – количество стержневых элементов. Функции правых частей СДУ $\Phi(\sigma)$ зависят от уровня механических напряжений, для определения которых используются уравнения первой группы.

Очевидно, на изменение напряжений в стержневых элементах будут влиять два фактора: изменение площади сечений и изменение усилий. Величина коррозионного поражения в элементе, от которого и зависит площадь сечения, определяется величиной напряжения только в этом элементе, и при постоянном значении усилия СДУ вида (2) вырождается в совокупность несвязанных дифференциальных уравнений, отличающихся лишь параметрами.

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot \Phi[\sigma_i(A_i(\delta_i), Q_i)]; \quad \delta_i|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \quad (3)$$

Долговечность любого конструкционного элемента может быть определена аналитически, то есть точно (для принятой модели коррозионного износа). Таким образом, решение задачи прогноза долговечности статически определимых ШСК сводится к решению независимых дифференциальных уравнений. Это решение может также служить приближенной оценкой долговечности статически неопределимых конструкций. Его погрешность будет определяться законом изменения усилий в стержневых элементах.

В статически неопределимых конструкциях усилие в данном элементе зависит от изменяющихся во времени жесткостных характеристик всех элементов. Именно это определяет связь между уравнениями системы (2):

$$\frac{d\delta_i}{dt} = v_0 \cdot \Phi[\sigma_i(A_i(\delta_i), Q_i(\bar{\delta}))]; \quad \delta_i|_{t=0} = 0; \quad i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

На характер изменения усилий во времени кроме параметров коррозионного износа оказывают влияние такие факторы, как топология конструкции и её начальные геометрические параметры, граничные условия и условия нагружения, количество элементов системы. Формализовать эту зависимость, а, тем более, получить аналитическое решение СДУ не представляется возможным. Следует отметить, что изменение внутренних усилий оказывает меньшее влияние на скорость коррозионного процесса, чем изменение площадей сечений.

Функция, аппроксимирующая зависимость усилия в стержне от времени $Q(t)$, может быть построена только в результате решения СДУ вида (4). Если зависимость усилия в элементе, который определяет долговечность конструкции в целом, от времени будет формализована, то вместо СДУ (4) достаточно получить решение единственного уравнения, причём, с любой степенью точности. На расхождение между гипотетическим точным решением СДУ (4) и решением одного уравнения будет влиять только погрешность аппроксимации.

Исходя из этого, решение задачи долговечности предлагается проводить в два этапа.

Первый этап (этап прогноза) предполагает численное решение СДУ с минимальным количеством узловых точек для определения номера элемента, определяющего долговечность конструкции, и построения для него аппроксимирующей функции $Q = Q(t)$. В результате реализации первого этапа определяется приближенное значение долговечности.

На втором этапе (этапе коррекции) численно решается единственное дифференциальное уравнение, описывающее коррозионный процесс в этом элементе с учётом изменения усилия в нём с нужной точностью.

Результаты численных экспериментов позволили сделать вывод о том, что полином третьей степени весьма точно аппроксимирует закон изменения внутреннего усилия. Следовательно, на временном интервале $[0; t^*]$, где t^* – долговечность стержневого элемента,

достаточно четырёх узловых точек. Таким образом, на этапе прогноза задача расчёта напряжённого состояния конструкции решается только четыре раза.

Остановимся на алгоритме численного решения задачи Коши для СДУ вида (4).

В большинстве известных работ для решения СДУ использовались одношаговые численные методы типа Рунге-Кутты, чаще всего – метод Эйлера. Недостатки этих методов, помимо низкой эффективности, достаточно полно изложены в [3].

Главным неудобством обычного метода Эйлера является то, что абсцисса точки пересечения графика функции $\sigma = \sigma(t)$ с прямой $\sigma = \sigma^*$ неизвестна; её определение и является целью решения задачи прогноза долговечности. Произвольное назначение длины шага интегрирования (расстояния между узлами временной сетки) не только не позволяет контролировать точность численного решения, но и не всегда обеспечивает выполнение условия его существования для всех возможных параметров СДУ.

В настоящей работе для численного решения СДУ (4) предлагается использовать модифицированный алгоритм метода Эйлера с переменным шагом интегрирования по аргументу (рис. 1). Предлагается задавать приращение функции $\Delta\sigma_s = const$, а соответствующее значение приращения аргумента Δt_s определять по формуле, вывод которой приведен в [3]:

$$\Delta t_s = \frac{\Delta\delta_s}{v_0} - \frac{2kQ}{v_0 d} \ln \left\{ \frac{(2a \cdot \Delta\delta_s + b - d)(b + d)}{(2a \cdot \Delta\delta_s + b + d)(b - d)} \right\}. \quad (5)$$

В (5) приняты следующие обозначения: a – коэффициент формы сечения; s – номер временного интервала; Q – величина осевого усилия; k – коэффициент влияния напряжения на скорость коррозии; $b = -P_{s-1}$; $c = A_{s-1} + kQ$; $d = \sqrt{b^2 - 4ac}$; A_{s-1} , P_{s-1} – площадь и периметр сечения в $(s-1)$ -й момент времени. Приращение параметра повреждённости $\Delta\delta_s$, соответствующее приращению напряжения $\Delta\sigma_s$ определяется, как решение уравнения:

$$A_{s-1} - P_{s-1} \cdot \Delta\delta_s + a \cdot \Delta\delta_s^2 = \frac{Q}{\sigma_{s-1} + \Delta\sigma_s} \quad (6)$$

Возможность использования данной модели для описания процесса электрохимической коррозии обоснована в [3]. В качестве параметра вычислительной процедуры выступает количество равноотстоящих узловых точек интервала $[\sigma_0; \sigma^*]$. В этом случае условие существования численного решения выполняется для всей области определения параметров СДУ.

Для иллюстрации предложенного подхода к решению задачи прогноза долговечности рассмотрим статически неопределимую 5-стержневую ферму (рис. 2). Параметры конструкции и агрессивной среды принимались следующие: $L = 100$ м; $P = 200$ кН; $[\sigma] = 240$ МПа; $v_0 = 0,1$ см/год; $k = 0,003$ МПа⁻¹. Сечения элементов соответствуют стандартным уголковым профилям: (1) - 160×100×10; (2) и (3) - 100×63×8; (4) - 110×110×8 и (5) - 180×110×12.

Для получения эталонного решения использовался метод Эйлера с постоянным шагом по времени. Расстояние между узлами временной сетки принималось равным $\Delta t = 0,005 \cdot \tilde{t}$, где $\tilde{t} = \min\{\tilde{t}_1; \tilde{t}_2; \dots; \tilde{t}_5\}$ – приближённое значение долговечности конструкции; $\tilde{t}_1; \tilde{t}_2; \dots; \tilde{t}_5$ – значения долговечности стержневых элементов, найденные с использованием формул (5) и (6) при $\Delta\sigma = [\sigma] - \sigma_0$ и постоянном значении внутренних усилий. Найденное таким образом значение определялось долговечностью четвёртого элемента и составило $\tilde{t} = 2,512$ года, расстояние между узлами $\Delta t = 0,0125$ года.

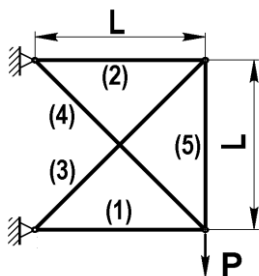
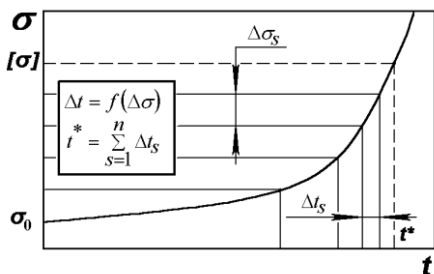


Рисунок 1 – Графическая иллюстрация вычислительного алгоритма Рисунок 2 – Расчётная схема фермы

Значения усилий и напряжений (в скобках) в элементах фермы в различные моменты времени представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты решения методом Эйлера с постоянным шагом по времени

t, лет	$Q_i, \text{кН}$ ($\sigma_i, \text{МПа}$)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
0,0	-144,69 (-57,88)	55,16 (44,49)	55,14 (44,47)	-77,90 (-45,94)	205,01 (61,46)
1,0	-148,71 (-79,24)	51,10 (58,96)	51,07 (58,93)	-72,13 (-60,69)	210,82 (79,98)
2,0	-156,52 (-128,93)	43,18 (89,52)	43,14 (89,45)	-60,89 (-91,90)	222,17 (116,84)
2,66	-168,79 (-233,86)	30,71 (143,44)	30,69 (143,23)	-43,24 (-147,65)	240,08 (173,85)

В элементах (2), (3) и (4) происходит уменьшение внутренних усилий, а в элементах (1) и (5) – увеличение. Поэтому долговечность конструкции будет определять первый элемент.

Эталонное значение долговечности составило $t_{et} = 2, 67596$ года. Уточнение решения для трёх последних узлов временной сетки осуществлялось методом парабол. Для получения эталонного решения задача расчёта напряжённого состояния конструкции решалась 214 раз.

В таблице 2 представлены значения усилий и напряжений (в скобках) в элементах конструкции, полученные при использовании изложенного выше алгоритма. Для построения аппроксимирующего полинома этим использовались данные первых четырёх строк таблицы.

Таблица 2 – Результаты решения методом Эйлера с переменным шагом по времени

t, лет	$\Delta t, \text{лет}$	$Q_i, \text{кН}$ ($\sigma_i, \text{МПа}$)				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
0,0	1,685	-144,69 (-57,88)	55,16 (44,49)	55,14 (44,47)	-77,90 (-45,94)	205,01 (61,46)
1,685	0,654	-153,00 (-103,09)	46,75 (74,34)	46,72 (74,29)	-65,96 (-76,34)	217,76 (99,05)
2,339	0,342	-160,37 (-152,48)	39,27 (103,41)	39,24 (103,31)	-55,35 (-106,02)	227,76 (133,03)
2,681	0,223	-167,38 (-208,77)	32,15 (133,05)	32,12 (132,88)	-45,28 (-136,49)	237,98 (164,89)
2,904	-	-174,93 (281,64)	24,48 (167,60)	25,45 (166,88)	-34,43 (-172,16)	249,04 (198,09)

На втором этапе численно решалось одно дифференциальное уравнение, описывающее процесс коррозионного разрушения в первом элементе при формализованной зависимости внутреннего усилия от времени:

$$\frac{d\delta}{dt} = v_0 \cdot \left(1 + k \cdot \frac{Q_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3}{A_0 - P_0 \delta + a \delta^2} \right), \quad (7)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты полинома, аппроксимирующего зависимость усилия от времени, A_0, P_0 – площадь и периметр сечения при $t = 0,0$.

Численное решение дифференциального уравнения (7) было получено с использованием метода Эйлера при $\Delta t = 0,0125$ года. Полученное значение долговечности $t^* = 2,69374$ года. Погрешность решения задачи относительно эталонного решения составила 0,66 % . При этом задача расчёта напряжённого состояния решалась пять раз, то есть вычислительные затраты уменьшились более чем в 40 раз.

В таблице 3 приведены результаты решения задачи прогноза долговечности для пятистержневой фермы с элементами одинакового сечения.

Таблица 3 – Сравнительные результаты решения задачи

Профиль	\tilde{t} , лет	t_{et} , лет	n	t^* , лет	ε , %
Уголок 125×125×9	2,26072	2,32173	206	2,30548	0,70
Уголок 140×90×10	2,52368	2,59140	206	2,57318	0,70
Двутавр 160×81	1,52978	1,57270	207	1,56206	0,68
Швеллер 180×70	1,62107	1,66593	206	1,65450	0,69
Швеллер 200×76	1,79142	1,83823	205	1,82510	0,71

В столбцах таблицы указаны: профиль, из которого изготовлены стержни; приближённое значение долговечности; эталонное значение долговечности; количество шагов интегрирования СДУ; значение долговечности, полученное с помощью нового алгоритма и погрешность этого решения. Из приведенных данных следует, что показатель эффективности алгоритма не зависит от формы и размеров сечений стержневых элементов.

Приведенный алгоритм расчёта может быть обобщён на другие классы конструкций.

Список литературных источников

1. Петров, В.В. Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой [Текст] / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. – Саратов: Сарат. ун-т, 1987. – 288 с.
2. Зеленцов Д.Г. Об одном алгоритме решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений [Текст] / Д.Г. Зеленцов. - Придніпровський науковий вісник. Фізико-математичні науки. – 1998. - № 112 (179). – С. 31 – 37.
3. Зеленцов Д.Г. Информационное обеспечение расчётов корродирующих объектов. Математические модели и концепция проектирования систем [Текст] / Д.Г. Зеленцов, О.А. Ляшенко, Н.Ю. Науменко. – Днепропетровск: УГХТУ, 2012. – 264 с.
4. Зеленцов Д.Г. Использование нейронных сетей при решении задач долговечности корродирующих конструкций [Текст] / Д.Г. Зеленцов, Л.И. Короткая. - Вісник Кременчуцького національного університету ім. М.Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 3 (68), част. 1. – С. 24 – 27.
5. Зеленцов Д.Г. Алгоритм управления точностью численного решения некоторых классов систем дифференциальных уравнений [Текст] / Д.Г. Зеленцов, Л.В. Новикова, Н.Ю. Науменко. - Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 5 (82). – Дніпропетровськ, 2012. – С. 71 – 79.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ РОЗПЛАВУ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ANSYS POLYFLOW

І.І. Івницький, О.Л. Сокольський, І.О. Мікульонюк

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», Київ,

Вступ. Вироби з полімерних матеріалів використовуються майже у всіх сферах людського життя та галузях виробництва. З початку 1950-х років спостерігається стійка тенденція стабільного зростання світового ринку пластмас: з 1 млн т у 1950 р. до 170 млн т у 2000 р. Тому завдання математичного моделювання процесу перероблення полімерних матеріалів стає актуальнішим з року в рік.

Теоретичні засади моделювання течії розплаву полімерних матеріалів розглядалися у працях [1–3]. Серед програмних комплексів, що призначені для комп'ютерного моделювання течії полімерних матеріалів можна виділити ANSYS Polyflow, який пропонує найбільш комплексний підхід до всіх аспектів математичного моделювання.

Моделювання течії розплаву. При моделюванні процесу течії полімерних матеріалів найбільш доцільно використовувати узагальнену модель ньютонівської потоку [4, 5], що базується на розв'язанні рівнянь нерозривності нестисливої рідини і збереження імпульсу:

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i v_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i, \quad (2)$$

де $v_i, i = \overline{1,3}$ – компоненти вектора швидкості, м/с; $x_i, i = \overline{1,3}$ – декартові координати, м; ρ – густина, кг/м³; t – час, с; p – тиск, Па; $\tau_{ij}, i = \overline{1,3}, j = \overline{1,3}$ – компоненти тензора напружень, Па; $g_i, i = \overline{1,3}$ – компоненти вектора прискорення вільного падіння, м/с².

Девіатор тензору деформації визначається

$$\tau_{ij} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma}, \quad (3)$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹, яка визначається

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

Залежність в'язкості від швидкості зсуву для переважної кількості полімерних матеріалів доцільно виражати степеневим законом [6]

$$\eta(\dot{\gamma}) = K(\lambda\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (5)$$

де K – коефіцієнт консистенції, Па·с; λ – період релаксації, с; n – індекс течії.

Варто зазначити, що при величині індексу течії менше за 0,7 (а для більшості полімерних матеріалів він менший за 0,7) слід використовувати ітераційну схему Пікарда, замість Ньютона, що вказана за замовчуванням.

У разі неізотермічного характеру течії використовується залежність, що виражається формулою

$$\eta = H(T)\eta(\dot{\gamma}), \quad (6)$$

де $H(T)$ – температурна залежність в'язкості від швидкості зсуву, що для більшості полімерних матеріалів може бути виражена законом Арреніуса

$$H(T) = \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_\alpha - T_0} \right) \right], \quad (7)$$

де α – відношення енергії активації до термодинамічної константи, К; T_a – температура, за якої $H(T)=1$, К; T_0 – найнижча термодинамічно прийнята температура ($T_0 = 0$), К; T – абсолютна температура, К.

При завданні граничних умов найбільш уживаними при моделюванні течії полімерних матеріалів є:

- на вході у канал – швидкість потоку або об'ємна витрата;
- на виході з каналу – вільне витікання;
- на стінках каналу – нульова швидкість або умови ковзання.

При моделюванні неізотермічної течії на кожну з граничних умов може бути додатково прикладена відповідна температура.

Пристінні ефекти на стінці описуються за допомогою узагальненого закону Нав'є, що зв'язує напруження зсуву зі зміною швидкості

$$\tau = -F_{slip} |v_s - v_w|^{e_{slip}}, \quad (8)$$

де v_s – тангенціальна швидкість течії, м/с; v_w – тангенціальна швидкість стінки каналу, м/с;

F_{slip} та e_{slip} – параметри матеріалу.

Визначення параметрів матеріалу для узагальненого закону Нав'є можливо за допомогою експериментальних досліджень, методика яких описана у [7].

Адекватність виконання числового моделювання може бути перевірена шляхом співставлення результатів натурального експерименту з використанням капілярного вискозиметра з результатами моделювання на скінченно-елементній сітці, що повністю відтворює геометрію каналу, який використовувався в експерименті.

Приклад результатів моделювання течії розплаву поліетилену високого тиску марки 15803-020 (ГОСТ 16337-77) крізь канал плоскощільної формуючої головки зображено на рис. 1. На рисунку показано конфігурацію чверті каналу головки, оскільки його геометрія симетрична по двох площинах.

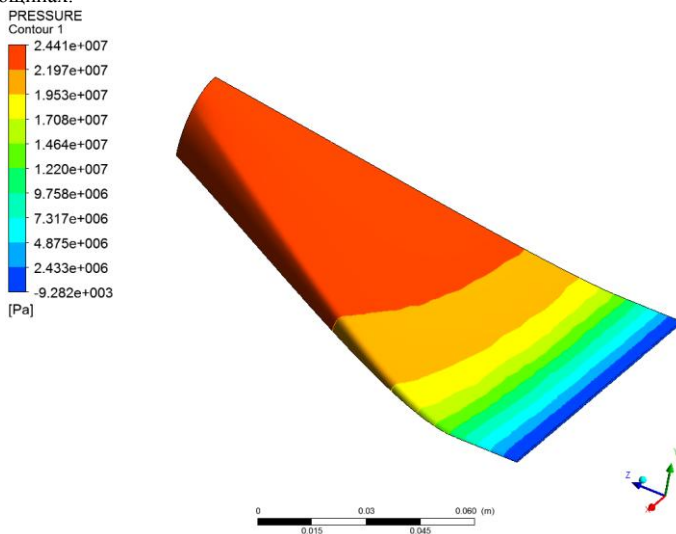


Рисунок 1 – Розподіл тиску при течії ПЕВТ крізь канал формуючої головки

Відсутні частини замінено граничними умовами «площина симетрії». Граничною умовою на вході в канал було задано швидкість потоку 10 мм/с, а на виході з головки – нульовий

тиск. На бічних стінках граничною умовою задано проковзування розплаву по стінках, описані за допомогою узагальненого закону Нав'є, параметри якого визначені експериментально. В низці випадків розплав демонструє здатність проковзувати по твердих стінках каналу або утворювати низькомолекулярний шар зниженої в'язкості. Ці фактори можуть вносити помітні корективи у процес течії [1], тому їх необхідно враховувати у моделюванні. Методика визначення параметрів пристінного шару та їх застосування у моделюванні наведена у [2].

З проведеного розрахунку можна отримати розподіл швидкостей, в'язкостей, тиску (що показано на рис. 1), та інших параметрів.

Висновки. Математичне моделювання течії розплаву полімерних матеріалів дозволяє значною мірою скоротити час та кількість кроків, необхідних для доведення обладнання та його налаштування на робочий режим за рахунок визначення всіх необхідних параметрів обладнання ще на етапі моделювання.

Список літературних джерел

1. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні / О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький, І. О. Мікульонюк, І. І. Івіцький. // Хімічна промисловість України. — 2013. — № 6. — С. 34—37.
2. Sokolskyi A. L. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment / A. L. Sokolskyi, I. I. Ivitskyi. // Modern Scientific Research and their Practical application. — 2014. — N 21410. — P. 136—140.
3. Ivitskyi I. I. Polymer Wall Slip Modelling / I. I. Ivitskyi. // Technology Audit and Production Reserves. — 2014. — N 3. — P. 8—11.
4. Dynamics of Polymeric Liquids / R. B. Bird, C. F. Curtiss, R. C. Armstrong, O. Hassager. — New York: Wiley-Interscience, 1987. — 672 p.
5. Barnes H. A. An Introduction to Rheology / H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters. — Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989. — 199 p.
6. ANSYS Polyflow User's Guide — Canonsburg: ANSYS, Inc., 2013. — 790 p.
7. Sivetskyi V. I. Methods for Determining the Presence, Character and Value of Wall Effects in Flow of Polymer Material / V. I. Sivetskyi, O. L. Sokolskyi, I. I. Ivitskyi. // Technology Audit and Production Reserves. — 2015. — №4. — С. 48—52.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОНСТРУКТИВНО НЕОДНОРОДНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, ОСЛАБЛЕННЫХ КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ В.А. Каиров¹, В.П. Шевченко²

¹ Национальный университет кораблестроения, Николаев

² Донецкий национальный университет, Винница

Особое место в расчетной практике инженерных конструкций занимают задачи расчета собственных колебаний тонких упругих подкрепленных ребрами оболочек вращения с отверстиями и присоединенными твердыми телами. Обзор работ по данной проблеме содержится в [1, 3]. Рассматривается упругая оребренная цилиндрическая оболочка вращения, регулярно подкрепленная стрингерами и шпангоутами вдоль координатных линий и ослабленная круглыми отверстиями со свободными краями. Присоединенные твердые тела дискретно распределены на наружной поверхности. Деформированное состояние оболочки и ребер описывается линейными уравнениями теории оболочек и стержней с использованием гипотез Кирхгофа-Лява и Кирхгофа-Клебша.

Целью данной работы является исследование влияния круглых отверстий, подкрепляющих ребер, присоединенных твердых тел и их дискретного размещения на частоты и формы свободных колебаний тонких упругих конструктивно неоднородных оболочек вращения.

Задача определения собственных частот и форм колебаний оболочечной системы решается методом конечных элементов (МКЭ). В основу алгоритма расчета положен известный принцип Остроградского-Гамильтона.

Решение задачи для конструктивно неоднородной подкрепленной оболочки выполняется методом конечных элементов с использованием вариационного принципа Лагранжа [2]:

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0 \quad (1)$$

$i = (1, 2, \dots, N)$,

где $L = \Pi - T$ – функция Лагранжа; Π, T – потенциальная и кинетическая энергии деформации и колебаний дискретно подкрепленной оболочки; q_i – обобщенные координаты i -го узла; t – координата времени; N – число узлов конечно-элементной модели.

Решение системы (1) для малых колебаний ищем в следующем виде:

$$\{q\} = \{a\} \sin \omega t, \quad (2)$$

где $\{q\}$ – вектор обобщенных перемещений узлов модели; $\{a\}$ – вектор амплитуд перемещений узлов; ω – круговая частота собственных колебаний.

На основе зависимости (1) с учетом (2) получим частотное уравнение для определения собственных частот и форм свободных колебаний:

$$([K] - \omega^2 [M])\{a\} = 0, \quad (5)$$

Полученное матричное выражение представляет собой систему однородных линейных алгебраических уравнений, решение которых дает вектор собственных частот и матрицу форм колебаний оболочечной системы. Задача сводится к вычислению матриц жесткости $[K]$ и масс $[M]$ оболочки, которые формируются из матриц жесткости и масс составляющих ее конечных элементов.

Численные исследования выполнены для стальных подкрепленных цилиндрических оболочек с равномерно распределенными ребрами жесткости и ослабленных круглыми отверстиями. Исследовано влияние различных граничных условий и конструктивных особенностей на амплитудно-частотные характеристики. Выполнено сопоставление полученных численных результатов с решениями, полученными с использованием пакета ANSYS и данными голографического эксперимента.

Установлено, что амплитудно-частотные характеристики оболочек зависят в основном от жесткости и дискретного размещения подкрепляющих ребер и присоединенных твердых тел. Выявлены новые зависимости, закономерности и физико-механические эффекты, обусловленные конструктивными неоднородностями оболочечной системы, имеющие важное практическое значение и позволяющие разработать мероприятия по улучшению ее амплитудно-частотных характеристик.

Полученные результаты и методика расчета на основе МКЭ могут быть использованы при проектировании подкрепленных ребрами оболочечных конструкций при динамическом нагружении.

Список литературных источников

1. Заруцкий В.А. О комплексных экспериментальных исследованиях устойчивости и колебаний конструктивно-неоднородных оболочек // Прикл. механика. – 2001. – Т.37, № 8. – С.38-67.
2. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1978. – 519 с.
3. Методы расчета оболочек / Гузь А. Н., Чернышенко И. С., Чехов В. Н. – К.: Наук. думка, 1980. – Т.1: Теория тонких оболочек, ослабленных отверстиями. – 636 с.
4. Bathe K.J. Numerical methods in finite element analysis / K.J. Bathe // Englewood Cliffs:Prentice-Hall, 2006. – 564 p.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНЫХ ЗАДАЧ ГИДРОМЕХАНИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСОБСТВЕННЫХ ИНТЕГРАЛОВ В СМЫСЛЕ КОНЕЧНОЙ ЧАСТИ ПО АДАМАРУ**В.А. Катан**

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск

В плоской постановке рассматривается задача о произвольном гидродинамическом ударе цилиндрического тела с поперечным сечением произвольной формы, которое находится на свободной поверхности жидкости [1]. Поставленная задача с помощью конформного отображения области гидродинамического течения на верхнюю полуплоскость сводится к классической смешанной задаче Келдыша-Седова для характеристической функции течения, решение которой может быть представлено в квадратурах [2].

Для определения положения граничных точек зон отрыва течения жидкости от поверхности тела применяется вариационный принцип Огазо, что приводит к некоторому трансцендентному уравнению относительно некоторого числового параметра, который характеризует положение точки отрыва на контуре тела (вторая точка – точка пересечения контура тела со свободной поверхностью жидкости). Это трансцендентное уравнение содержит сингулярные интегралы в смысле конечной части по Адамару, для вычисления которых применяются формулы Адамара-Манглера [3-4].

Для обоснования предложенного подхода к математическому моделированию с использованием несобственных интегралов в смысле конечной части по Адамару были рассмотрены задачи, которые допускают аналитическое решение, то есть указанные квадратуры могут выражаться через элементарные функции. В качестве таких тестовых задач были рассмотрены: задача о вертикальном ударе с вращением горизонтальной пластинки в условиях возникновения отрыва, задача о горизонтальном ударе с вращением вертикальной пластинки. В обоих случаях удовлетворительное совпадение решения через несобственные интегралы в смысле конечной части по Адамару и решения, выраженного через элементарные функции, указывает на применимость указанного подхода в математическом моделировании ударного взаимодействия тела и жидкости со свободной поверхностью [5-6].

Список литературных источников

- Седов Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики. / Л.И. Седов – М.: Наука. – 1980. – 448 с.
- Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости / Н. И. Мусхелишвили – М.: Наука. – 1966. – 707с.
- Общая теория аэродинамики больших скоростей под редакцией У.Р. Сирса – М.: Воениздат. – 1962. – 300 с.
- Адамар Ж. Задача Коши для линейных уравнений с частными производными гиперболического типа. / Ж.Адамар – М.: Наука. – 1978. – 352 с.
- Гоман О. Г. Ударное взаимодействие несжимаемой жидкости и вертикальной пластины, плавающей на ее поверхности, в условиях образования одной зоны отрыва и наличии вращения / О.Г. Гоман, В.А. Катан // Вісник ДНУ. Серія: Механіка. 2013. – № 5(21). – Вип. 17, Т. 1. – С. 191 – 205.
- Катан В.А. Об одном способе определения положения зоны отрыва течения приударном взаимодействии твердого тела и жидкости, / В.А. Катан // Вісник ДНУ. Серія: Механіка. 2014. – № 5(22). – Вип. 18, Т.1. – С. 63 – 71.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗОГРЕВА ОДНОМЕРНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

В.Ю. Клим

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск

Предложена математическая модель диссипативного разогрева и определения температурных полей стержневых элементов конструкций при циклическом нагружении [1,2]. Стержневые элементы конструкций могут быть представлены в виде однородных и кусочно-однородных стержней, с разными видами теплового контакта в местах стыка и условиями теплообмена с окружающей средой.

Температура диссипативного разогрева стержня при циклическом нагружении определяется по следующему алгоритму.

По длине l стержень разбивается на N конечных интервалов по координате $[x_{i-1}, x_i]$, $i = 1, 2, \dots, N$. Для интервала времени $[\tau_{j-1}, \tau_j]$ на каждом интервале по координате $[x_{i-1}, x_i]$ выполняется последовательность действий:

1. Значения теплофизических и механических характеристик материала (теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность, плотность, модуль упругости и предел текучести) определяются по принятым зависимостям [1].

2. Решается задача вынужденных колебаний. Определяются формы колебаний, деформации и напряжения по длине стержня для любого момента времени $\tau \in [\tau_{j-1}, \tau_j]$.

3. Проверяется условие для амплитудных напряжений в опасном сечении, то есть максимальное значение амплитудных напряжений по длине стержня сравнивается с заданным значением предела текучести.

4. Определяется количество циклов нагружения N^* .

5. Определяется распределение интенсивности внутренних источников тепла по длине стержня по известным зависимостям [1].

6. Решается линейная задача теплопроводности для определения температурного поля $T(x, \tau)$.

7. Распределение температуры по длине стержня в конце текущего интервала времени $T(x, \tau_j)$ является начальным для следующего интервала времени.

Для последующего интервала времени на каждом интервале по координате повторяются предыдущие шаги алгоритма.

Разбиение на интервалы по времени и по координате может быть неравномерным. Для кусочно-однородного стержня из m частей для каждой части длиной R_v определяется функция $T_v(x_v, \tau)$.

Для проведения вычислительного эксперимента в качестве расчетной модели образца взят сплошной стержень круглого поперечного сечения из аустенитной стали X18Ni10T, подвергающийся циклическому растяжению-сжатию [1,2].

Список литературных источников

1. Веселовский В. Б. Температурные поля элементов конструкций, разогревающихся вследствие высокочастотного нагружения/ В. Б. Веселовский, В. Ю. Клим // Вісник Донецького університету, Сер. А: Природничі науки, 2003. – Вип. 1. – С. 127–130.

2. Веселовский В. Б. Тепловыделение в стержневых элементах конструкций при циклическом нагружении / В. Б. Веселовский, И. А. Колесник, В. Ю. Клим // Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ.- Вып. 2(17).- Д.: Новая идеология, 2010. – С. 23 – 31.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПАРОГАЗОВОЇ СУМІШІ НА ККД ТЕПЛООВОГО АКУМУЛЯТОРА

О.В. Коломієць, К.М. Сухий, О.А. Бєляновська

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ

В наш час тенденція монотонного зростання вартості первинного палива та послуг систем централізованого тепlopостачання стимулює економію енергоресурсів в усіх галузях науки і техніки, та обумовлює перехід споживачів теплової енергії до систем децентралізованого опалення. Одним із першочергових завдань науковців всього світу є розробка ефективних теплоаккумуляторів для акумулювання низькопотенційного тепла, не останнє місце серед яких займають сорбційні теплові акумулятори.

Для оцінки робочих характеристик сорбційних теплових акумуляторів, оптимізації їх конструкцій і режимних параметрів необхідно мати можливість детально аналізувати процеси, що протікають всередині зазначених пристроїв. Враховуючи, що проведення багатоваріантних експериментальних досліджень пов'язане з великими матеріальними і часовими витратами, особлива роль при проектуванні систем акумулювання тепла відводиться методам математичного моделювання. Тому вивчення процесів тепломасопереносу в даних середовищах та створення надійної математичної моделі для їх опису набувають першочергового значення при створенні ефективних теплових акумуляторів та систем децентралізованого опалення на їх основі.

Мета роботи полягає у дослідженні, за допомогою математичного моделювання, впливу швидкості парогазової суміші на ККД теплового акумулятора. Конструктивне виконання пристрою наведено в [1]. В якості теплоаккумулятивного матеріалу використано композитний сорбент «силікагель/ Na_2SO_4 » основні характеристики якого описано в [2].

Процес експлуатації теплового акумулятора здійснюється у 4 етапи. На першому етапі відбувається прогрів теплоакуюлюючого матеріалу від температури навколишнього середовища до температури початку адсорбції. На другому етапі проходить адсорбція водяної пари на композитному матеріалі. На третьому відбувається нагрівання композитного матеріалу до температури регенерації та його регенерація. І на четвертому відбувається охолодження композитного матеріалу «силікагель натрій/ Na_2SO_4 » до температури початку сорбції. Враховуючи ці стадії коефіцієнт корисної дії визначали як, %:

$$ККД = \frac{Q_k}{Q_3} \cdot 100 \quad (1)$$

де Q_k – корисна теплотасорбції, кДж:

$$Q_k = M_{ком} \cdot \Delta H_{сор}, \quad (2)$$

$M_{ком}$ - маса композиту, кг; $\Delta H_{сор}$ - теплота сорбції, кДж/кг

Q_3 - витрати теплоти, кДж:

$$Q_3 = Q_{комп} + Q_{кор} + Q_{зм} + Q_{вип} + Q_{води}^{вип} + Q_{дес} + Q_{сор}^{води}, \quad (3)$$

тут $Q_{комп}$, $Q_{кор}$, $Q_{зм}$, $Q_{дес}$, $Q_{вип}$, $Q_{води}^{вип}$, $Q_{сор}^{води}$ – відповідно, на кожній із стадій, витрати теплоти для нагріву композиту, нагрівання корпусу установки, нагрівання змійовика, десорбції, нагрівання води в баку, випаровування води в баку, нагрівання сорбованої води, кДж.

Кількість теплоти, що не залежить від способу підводу для всіх деталей, обчислюється по одній загальновідомій формулі:

$$Q = M \cdot C \cdot \Delta t \quad (4)$$

Вплив швидкості парогазової суміші на ККД враховано введенням в розрахунок коефіцієнту A – який показує значення адсорбції кг/кг. Цей коефіцієнт використовується при розрахунку витрат теплоти на десорбцію:

$$Q_{дес} = \Delta H_{дес} \cdot M_{ком} \cdot A, \quad (5)$$

та на нагрівання сорбованої води:

$$Q_{\text{сорб}}^{\text{вобл}} = M_{\text{ком}} \cdot A \cdot C_0 \cdot (t_{\text{пер}} - t_{\text{н.с.}}) \quad (6)$$

$\Delta H_{\text{оес}} = 2850$ - теплота десорбції, кДж/кг.

$$A = \frac{C_0 - C}{M_{\text{ком}}} \cdot V_{\text{нов}} \quad [3]. \quad (7)$$

де $V_{\text{нов}}$ - об'єм повітря: $V_{\text{нов}} = F_{\text{адс}} \cdot w \cdot \tau$, м³; w - швидкість парогазової суміші, м/с;

$F_{\text{адс}}$ - площа перерізу теплового акумулятора, м². C - концентрація парогазової суміші на виході з теплового акумулятора [3]:

$$C = \frac{C_0}{e^{\frac{[\beta(-\tau w C_0) + H]]}{a}} + 1} \quad (8)$$

де τ - час адсорбції, с; C_0 - концентрація парогазової суміші на вході до теплового акумулятора, кг/кг; H - висота теплового акумулятора, м; a - сорбційна ємність матеріалу, кг/кг; β - коефіцієнт масо передачі, визначений із залежності[4]:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{1}{\beta_n} + \frac{1}{\beta_{\text{пр}}} \quad (9)$$

де $\beta_y = 0,355 \cdot \frac{w}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{w \cdot \rho_y \cdot d}{\mu_y} \right)^{-0,359} \cdot \left(\frac{\mu_y}{\rho_y \cdot D_y} \right)^{-0,667}$ - коефіцієнт масовіддачі у газовій фазі

[5], w - швидкість парогазової суміші, м/с; ε - пористість композитного матеріалу; d - еквівалентний діаметр частинок сорбенту, м; ρ_y , μ_y , D_y - відповідно густина повітря, вязкість повітря, коефіцієнт дифузії водяної пари; $\beta_n = \frac{10 \cdot D_n}{d}$ - коефіцієнт масовіддачі в порах;

$D_n = 0,308 \cdot \frac{R^2}{\pi^2 \cdot t_{0,5}}$ - коефіцієнт дифузії в порах [3]; $t_{0,5}$ - час, с (знаходиться по

експериментальним кінетичним кривим сорбції наведеним в [2]);

$\beta_{\text{пр}} = 0,0567 \cdot \frac{w}{1 - \varepsilon} \cdot \left(\frac{w \cdot \rho_y \cdot d}{\mu_y} \right)^{0,22}$ - коефіцієнт поздовжнього перемішування [5]; Енергію

активації процесу сорбції води композитом знаходили як $E = tg\alpha \cdot R$, тут R - постійна газова стала; α - кут нахилу прямої, що ілюструє зміну коефіцієнта дифузії в координатах $\ln D - 1/T$, до горизонту.

Результати розрахунку, за формулами 1 - 9, коефіцієнту корисної дії в залежності від швидкості парогазового потоку при відносній вологості повітря 40, 50, 60 % та температурі регенерації 80-100 °С наведено на рис. 1.

Результати розрахунку коефіцієнту дифузії

t , °С	$\sqrt{t_{0,5}} \cdot \sqrt{c}$	$t_{0,5}$, с	D_n , м ² /с
40	31	961	$8,13 \cdot 10^{-12}$
50	19	361	$2,16 \cdot 10^{-11}$
60	8	64	$1,22 \cdot 10^{-10}$

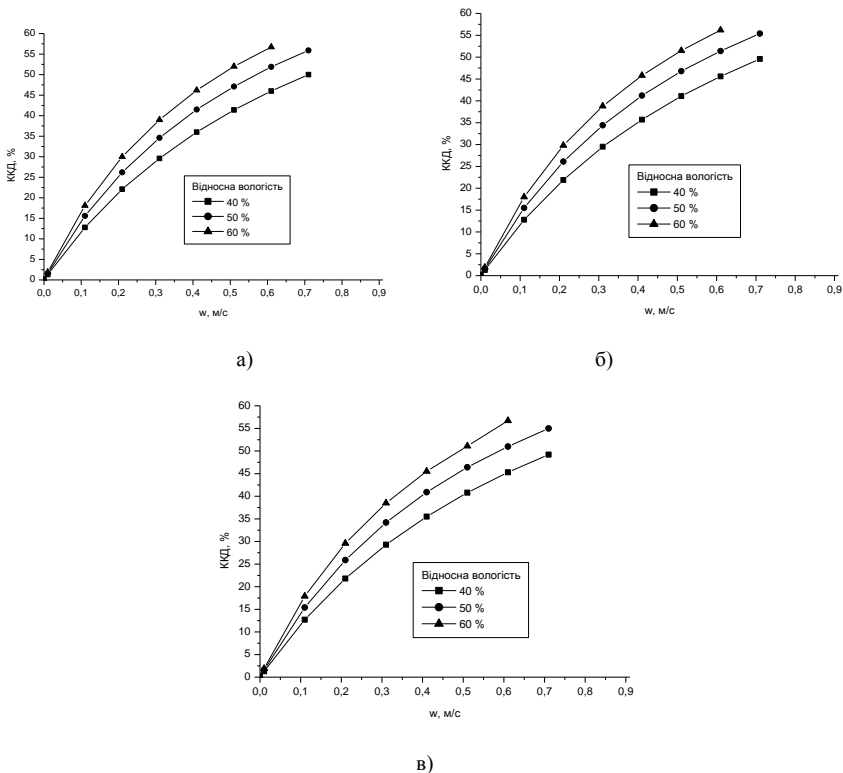


Рисунок 1 - Залежність коефіцієнту корисної дії від швидкості парогозового потоку при відносній вологості 40-60 %. а) Температура регенерації 80 °С; б) Температура регенерації 90 °С; в) Температура регенерації 100 °С.

Як видно з рис. 2 зростання ККД відбувається зі збільшенням швидкості парогозової суміші та відносної вологості, а температура регенерації сорбенту майже не впливає на нього. Максимальне значення ККД складає 55% і досягається при відносній вологості 40-60 % в діапазоні швидкості парогозової суміші 0,6 – 0,8 м/с.

Список літературних джерел

1. Патент 83436 А Україна, МПК F 24 Н 7/00. Тепловий акумулятор / Сухий К.М., Сухий М.П., Беляновська О.А., Козлов Я.М., Коломієць О.В. (Україна); заявник та патентовласник ДВНЗ УДХТУ. – № у 2013 03474; Заявл. 21.03.13; Опубл. 10.09.2013, Бюл. №17. – 5 с.
2. Kostyantyn M. Sukhyu, Elena A. Belyanovskaya, Yaroslav N. Kozlov, Elena V. Kolomiyyets, Mikhaylo P. Sukhyu. Structure and Adsorption Properties of the Composites ‘Silica Gel – Sodium Sulphate’, obtained by Sol – Gel Method // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 64, № 1 – 2. – P. 408 – 412.
3. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов / под ред. чл.-кор. АН СССР П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л: Химия, 1987. – 576 с.
4. Матвейкин, В.Г. Математическое моделирование и управление процессом короткоциклового безнагревной адсорбции / В.Г. Матвейкин, В.А. Погонин, С.Б. Путин, С.А. Сковрцов. – М. : «Издательство Машиностроение-1», 2007. – 140 с.

5. Борисов Г. С. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский и др.; под общ. ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

СТОХАСТИЧНА МОДЕЛЬ РОСТУ МАКСИМАЛЬНОЇ ГЛИБИНИ ПІТІНГА З ВРАХУВАННЯМ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ Р.Я. Косаревич, Б.П. Русин

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Львів

Пітингова корозія – один із поширених та найнебезпечніших проявів корозії через вразливість до неї пасивних металів та завдяки стрімкому поширенню в глибину. Велика кількість чинників системи метал-середовище, такі як склад сплаву та мікроструктура, властивості оточуючого середовища, його температура, які потрібно враховувати при пітинговій корозії, вимагають розвитку теоретичних моделей та засобів відтворення для того щоб краще зрозуміти результати процесу пітингової корозії. Окрім численних експериментальних досліджень по встановленню закономірностей розвитку пітингової корозії та детерміністичних моделей росту також відомо ряд стохастичних моделей для опису процесу зародження і росту пітингів [1,2].

Глибина корозійних пітингів залежить від швидкості корозії та часу їх зародження. Тому виникає необхідність визначення величини найглибшого пітинга кородуючої структури на основі обмеженої кількості зразків, отриманої з загальної популяції корозійних пітингів. Для цього використовуються підходи на основі розподілів екстремальних величин та моделювання росту глибини пітинга [3].

Пітингова корозія охоплює два основних процеси: зародження пітинга та ріст пітинга. Після зародження, пітинг може відразу репасивуватися або продовжувати рости, а потім репасивуватися. Цей процес розглядається як метастабільна пітингова корозія. Якщо метастабільний пітинг продовжує зростати, то він стає стабільним пітингом. Таким чином він може досягти спостережуваного розміру, за певний проміжок часу. Час який проходить з моменту утворення пітинга до його стабільного росту залежить від кородуючого матеріалу та умов оточуючого середовища. Було показано, що величина цього часу є випадковою величиною з експоненціальним законом розподілу [2].

На підставі цих результатів, стохастичні моделі зародження пітингів були запропоновані в літературі на основі однорідного процесу Пуассона [4]. Згідно запропонованих моделей зародження пітингів відбувається випадково із постійною швидкістю утворення. Тим не менш, в інших дослідженнях, зародження пітинга розглядали або як миттєве по відношенню до часу спостереження або як таке, що відбувається протягом обмеженого періоду часу [5]. Вперше використано неоднорідний Марковський процес для моделювання росту глибини пітинга у роботі [5]. Загальна модель, яка об'єднує процеси зародження та росту була запропонована як узагальнений стохастичний процес у роботі [6]. Подальший розвиток запропоновані ідеї отримали в роботі [7].

Загальна модель пітингової корозії. Пітингова корозія розвивається як у просторі так і в часі. Крім того кожному пітингу можна поставити у відповідність ряд характеристик: розмір видимого отвору, глибина, стабільний чи метастабільний та інші. В такому випадку загальною моделлю, яка б дозволила повністю описати розвиток пітингової корозії доцільно обрати просторово-часовий маркований точковий процес, реалізацією якого є точковий образ. Марковані точкові процеси дозволяють пов'язати маркери точок, які описують властивості об'єктів представлених точками і можуть бути як залежними від місця положення точок так і не пов'язаними із ними. Іншими словами маркований точковий процес X_M є послідовністю випадкових маркованих точок $X_M = \{x_n(t); m(x_n(t))\}$, де $m(x_n(t))$ - маркер точки $x_n \in W$, W - обмежена підмножина R^2 або R^3 , M – простір маркерів.

На відміну від Пуассонівських точкових процесів більш загальною моделлю є неоднорідні Марковські точкові процеси або точкові процеси Гіббса. Такі процеси дозволяють

враховувати взаємодію між об'єктами на різних рівнях від найпростішої парної до взаємодії між зв'язними компонентами, які формують об'єкти процесу [8,9]. Позначимо $\Gamma = W \times M = \{(\omega_1, \omega_2) : \omega_1 \in W, \omega_2 \in M\}$.

Нехай $(x, m) = (x_1, \dots, x_n, m_1, \dots, m_n)$, у випадку парної взаємодії між елементами процесу густина обмеженого маркованого точкового процесу Гіббса має вигляд:

$$f(x, m) = \frac{\exp[-U(x, m)]}{Z}, \quad (1)$$

де потенціальна або функція енергії $U(x, m)$ записується у вигляді:

$$U(x, m) = \sum_{s=1}^n V^{(1)}(x_s, m_s) + \sum_{s=1}^{n-1} \sum_{r=s+1}^n V^{(2)}(x_s, x_r, m_s, m_r). \quad (2)$$

а нормуючий множник Z як:

$$Z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-|W|}}{n!} \int_{\Gamma} \dots \int_{\Gamma} \exp[-U(x)] d(x_1, m_1) \dots d(x_n, m_n), \quad (3)$$

$V^{(1)}(x_s, m_s) = -\log[\lambda(x_s) p(m_s | x_s)]$, $\lambda(x)$ - інтенсивність процесу в точці x , $p(\cdot | x)$ - розподіл значень маркера в точці x . $V^{(2)}(x_s, x_r, m_s, m_r) = \Phi(x_s, x_r, m_s, m_r)$ - потенціальна функція пари маркерів (m_s, m_r) розміщених в точках (x_s, x_r) .

Функція інтенсивності $\lambda(x_s)$ є залежною від часу оскільки пітінги утворюються не одночасно, тому в загальному вона матиме вигляд

$$\lambda(x_s) = \lambda_t(x_s) = \int_W \int_{t_0}^t \lambda(t, x_s) dt dx. \quad (4)$$

Для визначення густини ймовірності умовного розподілу маркерів точкового процесу $p(m_s | x_s)$ скористаємось виразом наведеним у [6]. Для випадку одного пітінга ймовірність досягнення глибини дискретного стану i з моменту зародження $(t - t_k)$ визначається як:

$$F(i, t - t_k) = 1 - \{1 - \exp[-\rho(t - t_k)]\}^i, \rho(t) = \int_0^t \mu(\tau) d\tau. \quad (5)$$

де $\mu(\cdot)$ - частота переходу величини глибини пітінга від певного стану до наступного протягом дуже малого інтервалу часу.

Необхідно пов'язати цю частоту із місце розташуванням пітінга, а саме із властивостями поверхні зразка у місці його утворення. Відомий факт, що найбільш вірогідним місцем зародження пітінгів є місця включень різноманітних фаз на поверхні матеріалу, що проявляється, наприклад, у потоншенні захисної оксидної плівки. Очевидно, що ймовірність зародження і відповідно росту пітінга буде більшою в області, де концентрація включень більша. Якщо визначити випадкове поле $Z(x)$ для непошкодженого зразка, для якого значенням у кожній точці є загальна кількість або площа чи об'єм неметалевих включень у околі B деякого радіусу r точки x , тобто:

$$Z(x) = N(B + x), Z(x) = \sum_{[x_i, m_i] \in A} 1_B(x - x_i) m_i, \quad (6)$$

де m_i – площа або об'єм включень. Тоді можна запропонувати наступну залежність між $\mu(\cdot)$ та $Z(x)$ для випадку, коли $Z(x)$ – площа включень у околі навколо точки x :

$$\mu(t, x) = 1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{Z(x)}{\pi}}\right). \quad (7)$$

Фіксел у 1984 році запропонував модель точкового процесу парної взаємодії, потенціальна функція для якого має наступний вигляд [9]:

$$c(x_s, x_r) = \begin{cases} 1, \|x_s - x_r\| > f \\ a * \exp(-\kappa * \|x_s - x_r\|), h \leq \|x_s - x_r\| \leq f \\ 0, \|x_s - x_r\| < h \end{cases} \quad (8)$$

де h – мінімальна відстань взаємодії, f – позначає діапазон взаємодії елементів, якщо відстань більша за f , то елементи не взаємодіють, a – константа, яка визначає вид процесу: $a=0$ – Пуасонівський процес, $a>0$ – кластерний процес, $a<0$ – процес обмеженої взаємодії, κ – параметр, який визначає характер зменшення взаємодії із збільшенням відстані між елементами процесу. Як показано у роботі [10] застосування моделі Фіксела дозволяє генерувати точкові образи наближені до лабораторних, отриманих під час експериментів.

З врахуванням значення маркерів у точках взаємодії вираз (8) набуде вигляду:

$$c(x_s, x_r) = \begin{cases} 1, \|x_s - x_r\| > f \\ a * \exp(-\kappa * \|x_s - x_r\|), h \leq \|x_s - x_r\| \leq f \\ 0, \|x_s - x_r\| < h \end{cases} \quad (9)$$

$$\kappa = (2 * (m_s + m_r))^{-1}, m_s \in [0,1]$$

Для відображення залежності між глибиною пітінгів та їх взаємодією запропоновано параметр \mathbf{K} у виразі (9) виразити через глибини пітінгів, що взаємодіють. Якщо взаємодіють два стабільні пітінги, глибина яких більша половини товщини металу ($m_s + m_r > 1$), то їх взаємний вплив виражається у прискоренні процесу корозії, тоді значення функції взаємодії зростає. Якщо серед взаємодіючих тільки один з пітінгів є відносно глибоким, тобто $m_s + m_r \approx 0.5$, тоді взаємодія не змінюється, що виражається у практично незмінному значенні функції взаємодії виразу (9). При взаємодії двох неглибоких пітінгів, коли $m_s + m_r \leq 0.5$

змінна \mathbf{K} набуде значення більшого за одиницю, що призведе до зменшення значення функції взаємодії. Таке трактування функції взаємодії відображає уявлення про перебіг пітінгової корозії оскільки як відомо з досліджень [2] пітінги досягнувши певної критичної глибини продовжують стабільно рости, що відповідає першому випадку наявності двох стабільних пітінгів. Другий випадок відповідає наявності одного стабільного пітінга, вплив якого може призводити до репасивації сусідніх метастабільних пітінгів [2]. Також у третьому випадку, коли глибина пітінгів невелика вони можуть репасивуватися тобто перетворитися у метастабільні, що призведе до послаблення корозійного пошкодження.

На основі виразів (1)-(10) можемо отримати наступний загальний вигляд для функції густини ймовірності маркованого точкового процесу пітінгової корозії у деякій області зразка A множини пітінгів x із глибинами m після часу t з моменту початку корозійного процесу. t, x, m – являють собою вектори значень.

$$f(x, m, t) = \frac{1}{Z} \sum_{k=1}^g \left\{ \lambda(t - t_0, x_k) \left(1 - \{1 - \exp[-\rho(t - t_k)]\}^{m_k} \right) \right\} \quad (11)$$

$$\exp \left(a \sum_{s=1}^{g-1} \sum_{r=s+1}^g \exp \left(- \frac{1}{2(m_s + m_r)} \|x_s - x_r\| \right) \right)$$

Параметри моделі. Для ефективного застосування моделі (11) необхідно визначити чи побудувати оцінки для її параметрів, які дозволять верифікувати побудовану модель. Для цього була проведена серія корозійних експериментів, кожен з яких мистив n_c зразків матеріалу, що піддавався впливу корозійного середовища протягом певного часу. Після цього вимірювалась глибина всіх пітінгів та визначалися максимальні. Розподіл максимальних величин моделювався

розподілом Гумбеля [5], а розподіл їх розгашування – розподілом Фіксела [9]. Визначення параметрів для виразу (11) відбувалося за допомогою мінімізації функції загальної похибки, яку можна виразити як:

$$E_T = \sum_{i=1}^{N_i} \left(\sqrt{(\mu_e^i - \mu_p^i)^2} + \sqrt{(\sigma_e^{2i} - \sigma_p^{2i})^2} \right), \quad (12)$$

де (μ_e^i, σ_e^{2i}) та (μ_p^i, σ_p^{2i}) середнє значення та дисперсія значень для експериментальних та оцінених за виразом (11) розподілів отриманих під час проведення i -го експерименту.

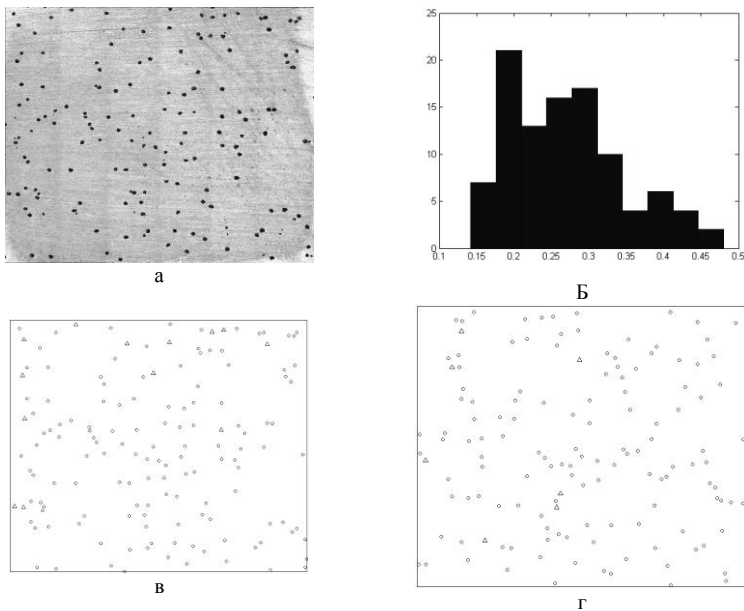


Рисунок 1 – Результати експериментів: а) експериментальний зразок; б) розподіл екстремальних значень глибин пітінгів; в) точковий образ експериментального зразка; г) синтезований точковий образ.

Результати експериментів.

На рис.1. Наведено результати моделювання на основі виразу (11). Рис. 1а відображає один із експериментальних зразків, які використовувались. На Рис. 1б наведено розподіл максимальних значень глибин пітінгів отриманих на основі виразу (11). За допомогою тесту Смірнова-Колмогорова підтверджено його відповідність узагальненому експоненціальному розподілу. На Рис 1в та Рис. 1г наведено приклади точкових образів, які відповідають реальному зразку та отриманому на основі виразу (11).

Список літературних джерел

1. P.M. Aziz. Application of the Statistical Theory of Extreme Values to the Analysis of Maximum Pit Depth Data for Aluminium // Corrosion. – 1956. – vol. 12(10). – P. 37–45.
2. T. Shibata, T. Takeyama. Stochastic Theory of Pitting Corrosion // Corrosion. – 1977. – vol. 33, – No. 7. – P. 243–251.
3. D. E. Hawn. Extreme Value Prediction of Maximum Pits on Pipelines // Materials Performance. – 1977. – P. 29–38.

4. J. W. Provan, E. S. Rodriguez III. Part I: Development of Markov Description of Pitting Corrosion // Corrosion. – 1989. – vol. 45. – No3. – P.178–192.
5. H. P. Hong. Application of the Stochastic Process to Pitting Corrosion // Corrosion. – 1999. – P.10–16.
6. A. Valor, F. Galeo, L. Alfonso, D. Rivas, J. M. Hallen. Stochastic modeling of pitting corrosion: A new model for initiation and growth of multiple corrosion pits // Corrosion Science. – 2007. – vol. 49. – P. 559–579.
7. A. J. Baddeley, M. N. M. van Lieshout. Area–interaction point processes // Annals of the Institute of Statistical Mathematics. – 1995. – vol. 47, No 4. – P. 601–619.
8. P. Grabarnik, A. Sarkka. Interacting neighbour point processes: some models for clustering // Journal of Statistical Computation and Simulation. – 2001. – vol. 68. – P. 103–126.
9. T. Fiksel. Estimation of parameterized pair potentials of marked and nonmarked Gibbsian point processes. // Elektron. Informationsverarb. u. Kybernet. – 1984. – vol. 20, P. 270–278.
10. Косаревич Р. Про стохастичні підходи до моделювання пітингової корозії та взаємодію пітінгів. / Р. Косаревич, А. Похмурський, Б. Русин // Фізико–хімічна механіка матеріалів. – 2014.– №10. – С. 115–118.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОБРОБКИ СТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ ДРОТОМ ПІД ЧАС ПРОДУВАННЯ ІНЕРТНИМ ГАЗОМ НА АГРЕГАТІ КІВШ-ПІЧ

К.С. Красніков

Дніпродзержинський державний технічний університет, Дніпродзержинськ

Постановка проблеми. Введення дроту у розплав є сучасним методом позалінійної обробки сталі. Встановлення раціональних технологічних параметрів цього процесу у промислових і лабораторних експериментах є коштовним. У даній роботі запропоновано математичну модель для чисельних досліджень на комп'ютері, які значно дешевше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Плавлення порошкового дроту досліджувалось закордонними вченими. Наприклад, у роботі [1] представлено математичну модель, у якій враховано, що порошковий дріт спочатку проходить крізь шлаковий шар із появою шлакової кірки, після чого дріт потрапляє до сталевого розплаву, де створюється сталева кірка.

В основу моделі плавлення з рухомими межами фазового переходу в роботі [2] покладено розв'язок задачі Стефана. Отримано формулу для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі для турбулентного обтікання дроту. Взаємодію із шаром шлаку не враховано.

У роботі [3] було застосовано інший підхід до розв'язку задачі плавлення речовини у розплаві сталі, використовуючи метод кінцевих об'ємів, який можна застосовувати для моделювання дво- або тривимірного несиметричного плавлення із намерзанням кірки.

Моделювання траєкторії руху порошкового дроту має свій розвиток. У роботі [4] надано двовимірну постановку задачі, дріт представлено ланцюгом стрижней, наведено рівняння Лагранжу другого роду, узагальненими координатами обрано зенітні кути сферичної системи координат для кожного стрижня, але не надано формули для енергії, дисипативних сил, координат центрів мас стрижней, виражених через узагальнені координати та їх.

У роботі [5] наведено модель руху, яка дозволяє тільки приблизно оцінити глибину занурення та траєкторію руху дроту з урахуванням плавлення. Модель враховує Архімедову силу, силу тяжіння та швидкість введення, і не враховує пружні сили дроту, сили гідродинамічного опору з боку розплаву, більш схожа на модель руху частинки у розплаві (вплив сусідніх ланок не враховано). В результаті роботи моделі можна отримати наближену двовимірну траєкторію руху.

Вимагає уваги робота [6], у якій наведено детальний опис тривимірної математичної моделі, представлено формули координат центрів мас стрижнів, виражених узагальненими координатами, формули кінетичних, потенційних енергій та дисипативних сил.

Для моделювання гідродинаміки сталевого розплаву автори роботи [7] (с. 26) використовують трьохетапний метод Білоцерковського, який підходить для розв'язку тривимірної задачі руху розплаву.

У роботі [8] наведено детальний опис математичної моделі гідродинаміки розплаву у циліндричних координатах. Модель можна застосовувати для агрегату ківш-піч.

Постановка мети. Метою роботи є опис математичної моделі плавлення дроту з появою кірки і тривимірної математичної моделі динаміки руху дроту з урахуванням гідродинаміки розплаву та усереднення порошку.

Виклад основного матеріалу. Перелік завдань до розв'язання має вигляд:

1) задача одновимірного плавлення дроту з урахуванням кірки розплаву та різної швидкості введення. Для цієї задачі достатньо одного виміру у просторі;

2) задача тривимірного руху порошкового дроту, як системи твердих тіл. Саме тривимірний розв'язок необхідний для визначення траєкторії руху та координат вивільнення порошку або частини дроту;

3) задача тривимірного руху розплаву і порошкового усереднення. Різні розташування та різні кількості фурм продування зумовлюють тривимірне визначення швидкісного поля розплаву.

Модель плавлення дроту. Якщо взяти невеликий відрізок дроту і вважати цей відрізок циліндром, тоді його плавлення у розплаві можна спрогнозувати, використовуючи математичну модель, яка ґрунтується на методі кінцевих об'ємів у циліндричній системі координат [5]. Хай плавлення відбувається за таких умов:

1) Нехтується тепловий потік уздовж дроту. Враховується тільки радіальний потік;

2) Нехтується рух речовини всередині дроту;

3) Рідкий матеріал комірок змішується з розплавом сталі миттєво.

Під час плавлення у циліндрі виникають ділянки з однорідним по характеристикам матеріалом. Всі ділянки складаються з кінцевих об'ємів (комірок). Межі ділянок визначаються за характеристиками у комітках. Наприклад, якщо у комірці перебуває речовина оболонки дроту і температура комірки більше ліквідус, тоді ця комірка відноситься до ділянки III (рис. 1).

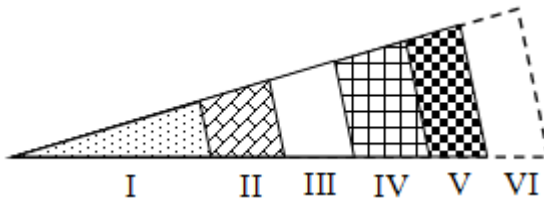


Рисунок 1 – Схематичний перетин порошкового дроту у розплаві

Розглянемо ці ділянки:

I. Ділянка порошкоподібної начинки дроту, що має особливі теплофізичні властивості (наприклад, мала теплопровідність);

II. Ділянка сталеві оболонка дроту (зазвичай тонка);

III. Ділянка, яка виникає, коли матеріал оболонки стає рідким – нагрівається вище T_L (температура ліквідус).

IV. Кірка розплаву, який після охолодження нижче T_S^p (температура солідус розплаву) намерзає шар за шаром на поверхню дроту.

V. Ділянка-шар приповерхневого розплаву, яка має товщину в один кінцевий об'єм і завжди знаходиться на поверхні дроту або кірки, тобто є рухомою. Швидкість росту або зменшення кірки залежить від різниці теплових потоків на ділянці V. Введено припущення про значно малий рух розплаву на ділянці V, що дає можливість визначати тепловий потік на одній грані комірки як дифузійний тепловий потік, а на протилежній грані, сусідній до розплаву – тепловий потік з урахуванням вимушеної конвекції за допомогою коефіцієнта тепловіддачі.

VI. Оточуюче дріт середовище. Це може бути атмосфера (вакуум), якщо дріт лежить на розплаві шлаку. Це може бути розплав шлаку, сталі або їх границя в залежності від

розташування дроту в даний момент часу. Термо- і гідродинаміка на ділянці VI поблизу дроту врахована в емпіричному коефіцієнті тепловіддачі, тому на цій ділянці розрахунки не проводяться.

На гранях кінцевих об'ємів визначаються потоки тепла. На межі ділянок V і VI тепловий потік зумовлений конвекційним теплообміном – гранична умова III роду ($q = \alpha \cdot S \cdot (T - T_p)$), де α – коефіцієнт тепловіддачі, S – площа грані, T_p – температура розплаву, T – температура у приповерхневій комірці).

На межі ділянок IV і V має місце дифузійний тепловий потік, який визначається за законом Фур'є ($q_i = \lambda \cdot S \cdot (T_{i-1} - T_i)/L$), де S – площа грані, L – відстань між центрами об'ємів, T_i і T_{i-1} – температури відповідних об'ємів, λ – коефіцієнт теплопровідності, який визначається середнім гармонійним коефіцієнтів теплопровідності сусідніх комірок).

Також по закону Фур'є визначаємо дифузійні теплові потоки всередині дроту.

Теплоту фазового переходу матеріалу комірки враховано в ефективній теплоємності [15](с.174). З часом температура комірок кірки досягає температури плавлення і розплав сталі заповнює ці комірки. Після розплавлення оболонки дроту порошокподібна начинка потрапляє у сталь, де збільшується концентрація у відповідній комірці ковша, а відповідний циліндр (відрізок дроту) видаляється.

Таким чином побудовано одновимірну модель плавлення з урахуванням кірки розплаву. Перевагою застосованого методу кінцевих об'ємів є консервативність різницевої схеми, а недоліком – ступінчастість поля теплових потоків, яка зменшується збільшенням просторових кроків.

Модель руху дроту. Порошковий дріт у розплаві може рухатися у багатьох напрямках і для визначення динаміки руху потрібно враховувати сили пружності, тяжіння, виштовхування, гідродинамічного опору з боку розплаву. Модель ґрунтується на механіці Лагранжа, яка дає можливість врахувати вищенаведені сили.

Дріт представлено нерозривним ланцюгом стрижней, який схематично показано на рис. 2. Точка відліку – центр ковшового дна. Значного кручення дроту не має, тому крученням, а також усіма пов'язаними з крученням явищами можна нехувати.

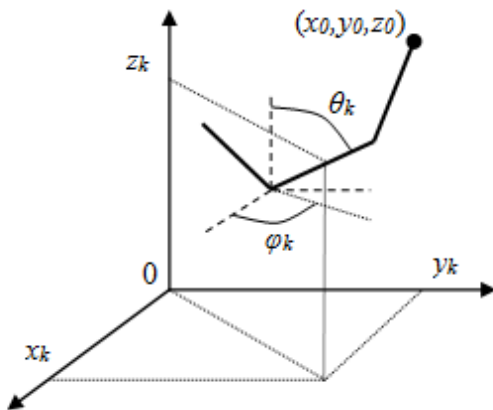


Рисунок 2 – Декартові координати центру мас k -го стрижня

Радіус-вектори центрів мас стрижнів мають вигляд:

$$\vec{r}_k = \vec{r}_0 + \sum_{j=1}^{k-1} \vec{l}_j + \frac{1}{2} \vec{l}_k, \quad (1)$$

де \vec{l}_j – напрямок j -го стрижня:

$$\vec{l}_j^x = l \sin \theta_j \cos \varphi_j; \quad \vec{l}_j^y = l \sin \theta_j \sin \varphi_j; \quad \vec{l}_j^z = l \cos \theta_j; \quad (2)$$

Декартові координати і швидкості мас стрижнів визначаються так:

$$\begin{aligned} x_k &= x_0 + \sum_{j=1}^k l_{jk} \sin \theta_j \cos \varphi_j, \\ y_k &= y_0 + \sum_{j=1}^k l_{jk} \sin \theta_j \sin \varphi_j, \\ z_k &= z_0 + \sum_{j=1}^k l_{jk} \cos \theta_j, \end{aligned} \quad (3)$$

де $l_{jk} = l - \delta_{jk} l 0.5$ (l – довжина стрижня).

Динаміка системи стрижней визначається рівняннями Лагранжа другого роду [9] з урахуванням потенційних і дисипативних сил:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_b} - \frac{\partial K}{\partial q_b} = - \frac{\partial P}{\partial q_b} + \tilde{F}_b \quad b = \overline{1, S} \quad (4)$$

де K і P – відповідно кінетична і потенційна енергії системи стрижней, \tilde{F}_b – узагальнені дисипативні сили опору, q_b - узагальнені координати. Кількість ступенів свободи S дорівнює подвійному числу стрижней (і додаткові три ступеня свободи на випадок самостійного руху). Узагальненими координатами обрано (рис. 2): кути сферичної системи координат (зенітний – θ_k та азимутальний – φ_k), декартові координати початку ланцюга (x_0, y_0, z_0) на випадок самостійного руху дроту в розплаві.

Кінетична енергія K має вигляд:

$$K = \sum_{k=1}^N \left[\frac{m_k}{2} (v_k^x{}^2 + v_k^y{}^2 + v_k^z{}^2) + \frac{I_k}{2} (\omega_k^2 + \sigma_k^2 \sin^2 \theta_k) \right], \quad (5)$$

де ω_k і σ_k – кутові швидкості, що відповідають кутам θ_k і φ_k , m_k – маса k -го стрижня, N – поточна кількість стрижнів у ланцюгу, I_k – момент інерції (відносно осі, що проходить через центр мас стрижня перпендикулярно напрямку стрижня), який дорівнює $I^2 m_k / 12$.

Потенційна енергія системи стрижней визначається формулою:

$$P = \sum_{k=1}^N \left[g \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_k} \right) m_k z_k + \frac{\kappa_k}{2} (\Delta_k - \psi_k)^2 + \Omega_k^r \Gamma(\Theta_k) + \Omega_k^z \Gamma(z_k) \right], \quad (6)$$

де g – прискорення вільного падіння, ρ_0 і ρ_k – густина розплаву і середня густина k -го стрижня (ρ_0 залежить від місцезнаходження стрижня – сталь, шлак, повітря), κ_k – коефіцієнт пружності в з'єднанні $(k-1)$ -го та k -го стрижнів, Δ_k – кути між ними, ψ_k – кути залишкової деформації, Ω_k^r і Ω_k^z – потенційні енергії для утримання k -го стрижня у межах ковша (опис наведено далі), $\Gamma(\Theta_k)$ і $\Gamma(z_k)$ – розривні функції. Припускаючи, що кути Δ_k невеликі, вони визначаються за формулою:

$$\Delta_k^2 = \Delta \theta_k^2 + \Delta \varphi_k^2 \sin^2 \theta_k, \quad (7)$$

де R_c – радіус dna ковша, γ – кут нахилу стінки ковша (конусність), $\Delta \theta_k = \theta_k - \theta_{k-1}$, $\Delta \varphi_k = \varphi_k - \varphi_{k-1}$.

Доданки Ω_k^r і Ω_k^z у формулі потенційної енергії відповідають за утримання стрижнів у межах ковша, збільшуючись, коли k -й стрижень виходить за межі. Вважаючи, що за межами ковша умовна пружина з коефіцієнтом пружності ζ розтягується дією на центр мас k -го стрижня за радіальним або вертикальним напрямком, доданки Ω_k^r і Ω_k^z мають вигляд:

$$\Omega_k^r = \frac{\zeta}{2} \Theta^2, \quad \Omega_k^z = \frac{\zeta}{2} z_k^2, \quad \Theta_k = \sqrt{x_k + y_k} - R_c - z_k \sin \gamma, \quad (8)$$

де R_c – радіус dna ковша, γ – кут нахилу стінки ковша (конусність).

Нехай \vec{w}_k – швидкість центру мас k -го стрижня відносно розплаву. Якщо напрямок швидкості \vec{w}_k співпадає з напрямком стрижня \vec{l}_k , то опором рухові k -го стрижня з боку розплаву можна нехтувати. Таким чином сила опору залежить від перпендикулярній стрижню складовій швидкості:

$$\vec{f}_k = -C_x \frac{\rho w_k^{\perp} \vec{w}_k^{\perp}}{2} A, \quad \vec{w}_k^{\perp} = \vec{w}_k - (\vec{l}_k \cdot \vec{w}_k) \vec{l}_k / l^2, \quad (9)$$

де C_x – безрозмірний коефіцієнт опору, ρ – густина розплаву, A – площа поздовжнього розрізу стрижня ($d \cdot l$).

В нашому випадку система (4) має структуру системи лінійних рівнянь відносно прискорень $\alpha_k, \beta_k, \dot{v}_0^x, \dot{v}_0^y, \dot{v}_0^z$ ($Mx=b$, де M – матриця коефіцієнтів системи, x – вектор-стовпчик невідомих прискорень і b – вектор-стовпчик вільних членів), в якій кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих прискорень. Дана система розв'язується чисельно. При цьому часову вісь поділено на часові кроки (які нумеруються індексом n), на яких всі змінні вважаються сталими. На кожному часовому кроці знаходиться матриця M , стовпчик b та отримуються невідомі прискорення x після розв'язання системи рівнянь класичним ітераційним методом Гауса-Зейделя. Початкові узагальнені швидкості та координати потрібно задавати, а для наступного часового кроку ($n+1$) їх можна визначати за методом Ейлера-Кромера, використовуючи знайдені прискорення.

Модель руху розплаву. Розрахунок руху розплаву сталі та усереднення матеріалу дроту ведеться у циліндричних координатах із такими припущеннями:

- розплав сталі – однорідна в'язка нестислива Ньютонівська рідина;
- ківш має форму усіченого конуса;
- поверхня розплаву сталі гладка;
- нехтується вплив руху дроту на гідродинаміку розплаву;

Для чисельного розв'язку використовується трьохетапний метод розщеплення за фізичними факторами Білоцерковського [16] та етап розрахунку конвекційно-дифузійного рівняння.

Для полів швидкості, тиску та концентрації на межі S розрахунковій області встановлено граничні умови:

$$\vec{n} \cdot \vec{\nabla} \vec{v} \Big|_S = 0, \quad \vec{v}_{\perp} \Big|_S = 0, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} p \Big|_S = 0, \quad \vec{n} \cdot \vec{\nabla} c \Big|_S = 0, \quad (10)$$

Шар заграничних комірок оточує розрахункову область, чим полегшує встановлення граничних умов.

Умовою закінчення моделювання є зменшення коефіцієнту варіації порошкової концентрації в розплаві сталі до 2%.

Висновки і пропозиції. Перспективну тривимірну математичну модель руху дроту з існуючої роботи [11] удосконалимо граничними умовами для стінок ковшу, врахуванням плавлення стрижнів та гідродинамікою розплаву з усередненням матеріалу дроту. Таким чином отримано єдину модель технологічного процесу обробки сталі дротом на агрегаті ківш-піч. У майбутньому потрібно реалізувати модель у комп'ютерній програмі та перевірити на відповідність дійсному процесу.

Список літературних джерел

1. Sanyal S. An Improved Model of Cored Wire Injection in Steel Melts / S. Sanyal, S. Chandra, S. Kumar and G. G. Roy // ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 7, pp. 1157–1166.
2. Полозюк О. Е. Математическое моделирование и рациональные режимы обработки металлургических расплавов порошковой проволоки: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. тех. наук : спец. 05.16.02 "Металлургия черных металлов" / Полозюк Олег Евгеньевич – Мариуполь, 1997. – 15 с.

3. Красніков К. С. Математична модель несиметричного плавлення легкоплавкої домішки / К. С. Красніков, С. Є. Самохвалов, В. П. Піптюк, Г. А. Андрієвський // Математичне моделювання, – №2(31), 2014. – С. 47-50.

4. Болотов В. Ю. Комплексная задача движения, плавления и усвоения проволоки при продувке металла в сталеразливочном ковше / Болотов В. Ю., Самохвалов С. Е. // Сб. науч. труд. ДГТУ. (Металлургия). – Дн-жинск, 1998. – С. 39 – 44.

5. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали / [Исаев О. Б., Чичкарев Е. А., Кислица В. В., Лившиц Д. А., Носоченко О. В., Матросов Ю. И.]; под. общ. ред.. д.т.н., проф.. Шахпазова Е. Х. – М.: Металлургиздат, 2008. – С. 73. ISBN 978-5-902194-32-3.

6. Піптюк В. П. Вивчення траєкторії руху дроту при введенні в металеву ванну під час продувки аргонном на установці ківш-під. Частина 1. Математична модель / Піптюк В. П., Самохвалов С. Є., Гнип Р. Р., Павлов С. М., Овчаренко Т. М. // Науковий журнал «Математичне моделювання». – ДДТУ, Дніпродзержинськ. – 2010. – № 1. – С. 21-24.

7. Методы расщепления в задачах гидродинамики и тепломассопереноса / А. П. Огурцов, С. Е. Самохвалов, Т. Ж. Надрыгаило // Днепропетровск: Системные технологии, 2003. – 260 с.

8. Математичне моделювання переносних процесів у конвертері : Монографія / С. Е. Самохвалов, А. М. Сокол. — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013.— 99 с.

9. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике. Учебное пособие для вузов / Под. ред. Е. С. Пятницкого. – 3-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – С. 37-57.

ДЕФОРМУВАННЯ ТРИШАРОВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО ТИСКУ О.В. Кудін, С.В. Чопоров

Запорізький національний університет, Запоріжжя

Вступ. Тришарові оболонкові елементи конструкцій широко застосовуються в авіа- та суднобудуванні, космічній промисловості, цивільному будівництві, радіоелектроніці та інших галузях народного господарства.

Переважає більшість досліджень по статичі та динаміці тришарових конструкцій виконано в припущенні лінійної залежності між напруженнями та деформаціями. Але такі матеріали як мідь, сплав алюмінієвої бронзи, мартенівська сталь, дюралюміній, полімерні матеріали та композити вже на стадії малих деформацій відхиляються від закону пружності Гука. Тобто, для таких матеріалів існує область деформацій, в якій може застосовуватись геометрична лінеаризація основних рівнянь теорії пружності, але закон пружності Гука вже не описує поведінку матеріалу з достатньою точністю. Тому актуальною залишається проблема дослідження напружено-деформованого стану тришарових пластин та оболонок при врахуванні нелінійної пружності окремих шарів.

Метою даної роботи є визначення напружено-деформованого стану тришарової циліндричної оболонки з нелінійно-пружним заповнювачем, яка знаходиться під дією зовнішнього навантаження.

Деформований стан оболонки. Розглянемо тришарову циліндричну оболонку кругового перетину. Будемо вважати, що шари оболонки виконано з ізотропних матеріалів. При цьому, для матеріалу обшивок оболонки вважається справедливим закон Гука, а заповнювач вироблено з нелінійно-пружного матеріалу, що описується законом пружності в формі Г. Каудерера [1].

Оскільки товщини обшивок $h^{(1)}$, $h^{(2)}$ для тришарових конструкцій значно менші ніж товщина шару заповнювача $h^{(3)}$, для обшивок приймається гіпотеза Кірхгофа-Лява. Для заповнювача приймається гіпотеза про лінійний розподіл тангенціальних переміщень по товщині та нестисливість матеріалу заповнювача в поперечному напрямі. У подальшому верхній індекс у

круглих дужках використовується для позначення номеру шару тришарової оболонки. Також вважаються, що шари оболонки ідеально з'єднані один з одним та мають постійну товщину.

Компоненти тензору напружень та деформацій та вираз для повної потенційної енергії оболонки у загальному випадку невісесиметричної задачі неведені у [2]. У якості невідомих функцій переміщень приймемо $u_1(r, \varphi)$, $u_2(r, \varphi)$ – переміщення серединної поверхні заповнювача, $u_3(r, \varphi)$ – прогин; $\psi_1(r, \varphi)$, $\psi_2(r, \varphi)$ – кути повороту нормалі до серединної поверхні заповнювача у площинах rz та φz відповідно.

Вісесиметрична деформація циліндричної тришарової оболонки. Розглянемо задачу визначення напружено-деформованого стану циліндричної тришарової оболонки під дією рівномірного зовнішнього тиску.

Параметри Ламе для циліндричної оболонки приймуть значення $A_1 = 1$ та $A_2 = R$, а головні кривизни – $k_1 = 0$, $k_2 = \frac{1}{R}$.

Оскільки задача в даній постановці вісесиметрична, переміщення $u_1(r)$, $u_3(r)$, та кут $\psi_1(r)$ залежать від однієї координати r , а кутові переміщення та кут повороту нормалі у площині φz тотожно рівні нулю – $u_2 = \psi_2 = 0$.

Функціонал повної потенційної енергії тришарової циліндричної оболонки при дії рівномірного тиску має вигляд:

$$\begin{aligned}
 E = & \iint \left(\int_0^{h^{(1)}} (\sigma_r^{(1)} \varepsilon_r^{(1)} + \sigma_\varphi^{(1)} \varepsilon_\varphi^{(1)}) \delta_1^{(1)} \delta_2^{(1)} dz + \right. \\
 & + \int_{h^{(1)+h^{(3)}}^{h^{(1)+h^{(3)}+h^{(2)}}} (\sigma_r^{(2)} \varepsilon_r^{(2)} + \sigma_\varphi^{(2)} \varepsilon_\varphi^{(2)}) \delta_1^{(2)} \delta_2^{(2)} dz + \\
 & \left. + \int_{h^{(1)}}^{h^{(1)+h^{(3)}}} (\sigma_r^{(3)} \varepsilon_r^{(3)} + \sigma_\varphi^{(3)} \varepsilon_\varphi^{(3)} + \tau_{rz}^{(3)} \varepsilon_{rz}^{(3)}) \delta_1^{(3)} \delta_2^{(3)} dz - A \right) = 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

Робота зовнішніх сил у (1) запишеться наступним чином:

$$A = qu_3(r, \varphi) \left(\frac{h^{(1)} + h^{(3)}}{R} + 1 \right). \quad (2)$$

Граничні умови для випадку защемлення кругових контурів оболонки можна виразити через переміщення $u_1(r)$, $u_3(r)$, $\psi_1(r)$:

$$u_3(r) = u_1(r) = \psi_1(r) = 0, \quad r = 0, L. \quad (3)$$

Після підстановки виразів компонентів деформації $\varepsilon_r^{(1)}$, $\varepsilon_\varphi^{(1)}$, $\varepsilon_r^{(2)}$, $\varepsilon_\varphi^{(2)}$, $\varepsilon_r^{(3)}$, $\varepsilon_\varphi^{(3)}$, $\varepsilon_{rz}^{(3)}$ та напружень $\sigma_r^{(1)}$, $\sigma_\varphi^{(1)}$, $\sigma_r^{(2)}$, $\sigma_\varphi^{(2)}$, $\sigma_r^{(3)}$, $\sigma_\varphi^{(3)}$, $\tau_{rz}^{(3)}$ з роботи [2], які наведені вище, у рівняння (1) отримаємо вираз повної потенційної енергії через шукані переміщення $u_1(r)$, $u_3(r)$, $\psi_1(r)$.

Таким чином, вираз (1) та граничні умови (3) замикають задачу деформації циліндричної оболонки при дії стискаючого навантаження.

Для розв'язання даної задачі використовуємо метод Рітца. Координатні функції, що відповідають граничним умовам (4), матимуть вигляд:

$$\begin{aligned}
 u_1(r) &= \sum_{i=1}^n A_i \sin\left(\frac{i\pi r}{L}\right), \\
 u_3(r) &= \sum_{i=1}^n B_i \sin\left(\frac{i\pi r}{L}\right), \\
 \psi_1(r) &= \sum_{i=1}^n C_i \sin\left(\frac{i\pi r}{L}\right).
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Підставляючи (4) в функціонал енергії (1) та обчислюючи похідні

$$\frac{\partial E}{\partial A_i}, \frac{\partial E}{\partial B_i}, \frac{\partial E}{\partial C_i}, \quad i = 1..n,$$

отримаємо системи лінійних або нелінійних алгебраїчних рівнянь, які відповідають лінійно-пружній та нелінійно-пружній постановці задачі.

Чисельні результати. Розглянемо задачу деформування тришарової циліндричної оболонки з наступними параметрами: товщина обшивок $h^{(1)} = h^{(2)} = h = 0,001$ м, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона $E = 203200$ МПа, $\mu = 0,27$ відповідно; товщина заповнювача $h^{(3)} = 0,0349$ м, модуль зсуву та модуль об'ємної деформації заповнювача – $G^{(3)} = 2,77 \cdot 10^4$ МПа, $K^{(3)} = 6 \cdot 10^4$ МПа, $\gamma_2 = -3,878 \cdot 10^5$; довжина та радіус оболонки $L = 4,014$ м, $R = 1,99$ м відповідно. Розв'язок отримано з використанням аналітичної моделі (рисунок а) та скінченно-елементної моделі (рисунок б) на базі теорії зсувних деформацій першого порядку для багатошарових пластин і оболонок (узагальнення теорії Тимошенко-Мінділіна).

На рисунку 1 зображені прогин $u_3(r)$, переміщення $u_1(r)$ та інтенсивність напружень $\tau^{(3)}$.

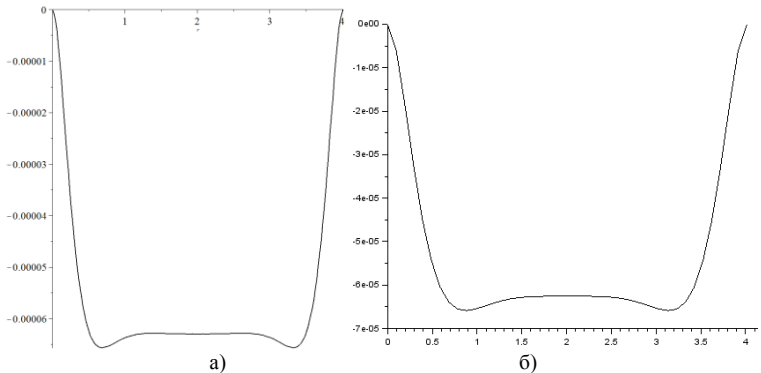


Рисунок 1 – Прогин тришарової циліндричної оболонки під дією рівномірного зовнішнього тиску

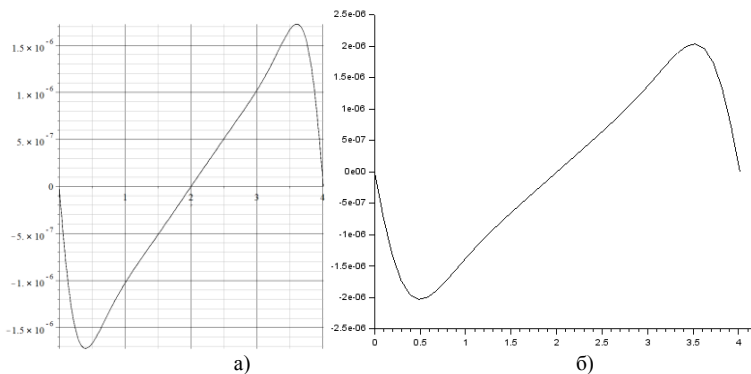


Рисунок 2 – Переміщення вздовж твірної тришарової циліндричної оболонки під дією рівномірного зовнішнього тиску

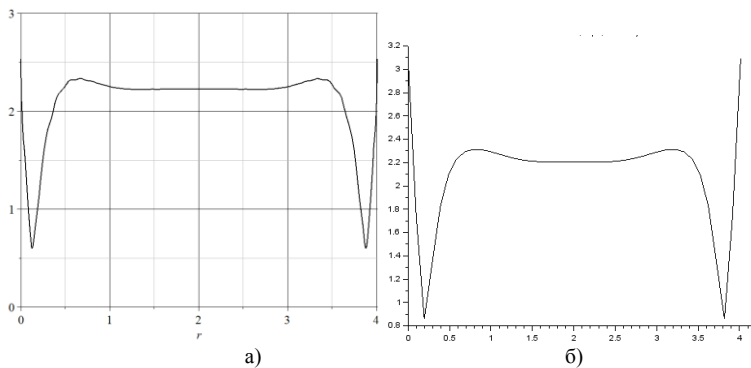


Рисунок 3 – Інтенсивність напружень циліндричної оболонки під дією рівномірного зовнішнього тиску

Розглянемо вплив нелінійної пружності матеріалу заповнювача на значення переміщень та інтенсивності напружень. На рисунках 4 – 5 наведено значення переміщень $u_1(r)$, $u_3(r)$ та інтенсивності напружень $\tau^{(3)}$ при врахуванні нелінійної пружності матеріалу заповнювача тришарової циліндричної оболонки.

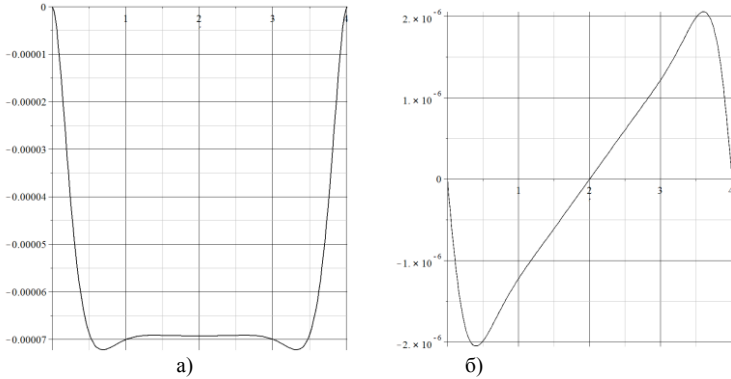


Рисунок 4 – Прогин тришарової циліндричної оболонки (а) та переміщення вздовж твірної (б) під дією рівномірного зовнішнього тиску

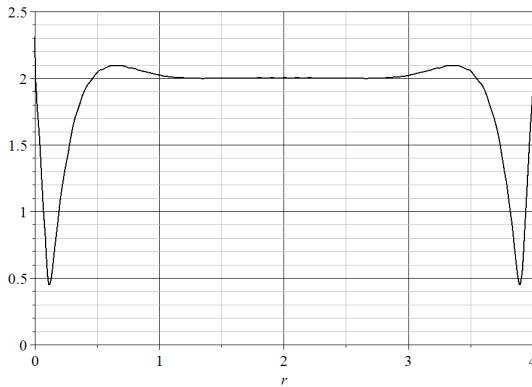


Рисунок 5 – Інтенсивність напружень циліндричної оболонки під дією рівномірного зовнішнього тиску

Висновок. Виходячи з результатів обчислень, наведених на рисунках 1 – 3, можна зробити висновок про адекватність побудованих в роботі аналітичних та скінченно-елементних моделей. Розбіжність між значеннями, отриманими за аналітичною та скінченно-елементною моделлю становить в середньому 1 – 5%. При порівнянні цих моделей для середнього шару вважається справедливим закон Гука.

З порівняння рисунків 4 – 5 можна зробити висновок, що переміщення $u_1(r)$, $u_3(r)$ збільшуються на 10% – 20% при врахуванні нелінійної пружності заповнювача. Натомість інтенсивність напружень $\tau^{(3)}$ зменшується в середньому на 10%.

Список літературних джерел

1. Каудерер Г. Нелинейная механика. Пер. с нем. / Г. Каудерер–М. : Изд-во иностр. лит., 1961. – 777 с.
2. Кудін О.В. Стійкість тришарових циліндричних оболонок з нелінійно-пружним заповнювачем при осьовому стисканні / О.В. Кудін // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій. – Дніпропетровськ: Ліра, 2014. – Вип. 23. – С. 75-85.

ГЕОМЕТРИЧНІ ВІДОБРАЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРУ НА ПЛОЩИНІ Л.В. Кузьміна, М.П. Мацюк

Дніпропетровський аграрно-економічний університет, Дніпропетровськ

Розглядається загальна задача геометричного відображення та моделювання простору на площині, яка об'єднує в собі три елементи: геометричний апарат проєкціонування, просторовий об'єкт та його проєкції.

Використаний метод з'йомки зі співпадшими осями для різних проєкціуючих конгруенцій.

Одержані рівняння відповідностей точкових рядів, утворених проєкціями пар точок простору на площині проєкцій. Рівняння містять інформацію про метрику простору, вид проєціуючого апарату та проєкційної системи.

Зформульований принцип єдинності для систем проєкцій зі співпадшими осями, в якому кожному виду проєкціонування на площині проєкцій відповідають ознаки притаманні тільки цьому виду.

Результати досліджень можуть бути використані для розвитку нарисної геометрії, фотограметрії в оптично різних середовищах, розпізнавання геометричних образів.

Ключові слова: Моделювання, конгруенція, метрика, центральні проєкції, двосередовищна зйомка, принцип єдинності.

В теорії відображення та моделювання простору на площині розрізняють три елементи:

- геометричний проєціуючий апарат, в який входять площина проєкцій Π та проєціуюча конгруенція K_{Γ} -двохпараметрична множина прямих або кривих ліній;
- просторовий об'єкт;
- проєкції об'єкта на площині Π , виконані даним апаратом

В теорії відображення та моделювання простору на площині розв'язують три задачі, в яких за двома елементами визначають третій. Не дивлячись на явний зв'язок цих задач, в загальному вигляді, як єдина задача вони не розглядалися, так як вид проєціуючого апарату визначався за проєкціями лінійчатого простору.

Прикладом такого розв'язання може бути відома теорема єдинності центральних та паралельних проєкцій Єгера [1], сутність якої в тім, що тільки при цих видах проєціонування пряма загального положення відображається в пряму на площині проєкцій. Для такого розв'язання достатньо однієї проєкції. Але одна проєкція без додаткових умов не відображає ні позиційних, ні метричних властивостей простору, що унеможливило розв'язання задачі в загальному вигляді.

Для даної роботи пропонується розв'язання цієї задачі за декількома проєкціями точкового простору. Зважаючи на загальність задачі, накладені значні обмеження на метод її розв'язання, види проєціуючих апаратів і їх конгруенцій та їх взаємне положення в просторі. В роботі використаний окремий метод проєціонування, відомий у фотограметрії, як зйомка зі співпадшими осями [3].

Проєціуючий апарат рухається по прямій s (рис.1), займаючи на ній ряд положень, з яких виконується проєціонування точок простору на одну площину Π , або зв'язану з конгруенцією площину при послідовному перепроєціуванні в останньому випадку на спільну площину.

Розглядалися апарати, що володіють оберальною симетрією навколо осі s руху. При цьому носієм проєкцій точок буде пучок прямих з центром в точці P перетину осі s з площиною Π . Проєкції пар точок A, B простору утворюють на прямих u, u' пучка проєктивні ((1-1)-значні), або багатозначні відповідності точкових рядів, де проєкції з однаковими нижніми індексами відповідають одному положенню апарата [2].

Рівняння цих відповідностей будуть містити в собі інформацію про метрику точкового простору (координати точок), вид проєціуючого апарата, його конгруенцію та проєкційну

систему. Визначальним при цьому буде знаходження подвійних (або кратних) точок для всіх відповідностей, що можливо тільки при спільному носії точкових рядів. Для цього, використовуючи метод циліндричних координат, сумішаємо обертанням навколо осі s всі площини пучка s проєкційної системи в одну площину. Тоді проєкції точок розташуються на одній прямій y (рис. 1).

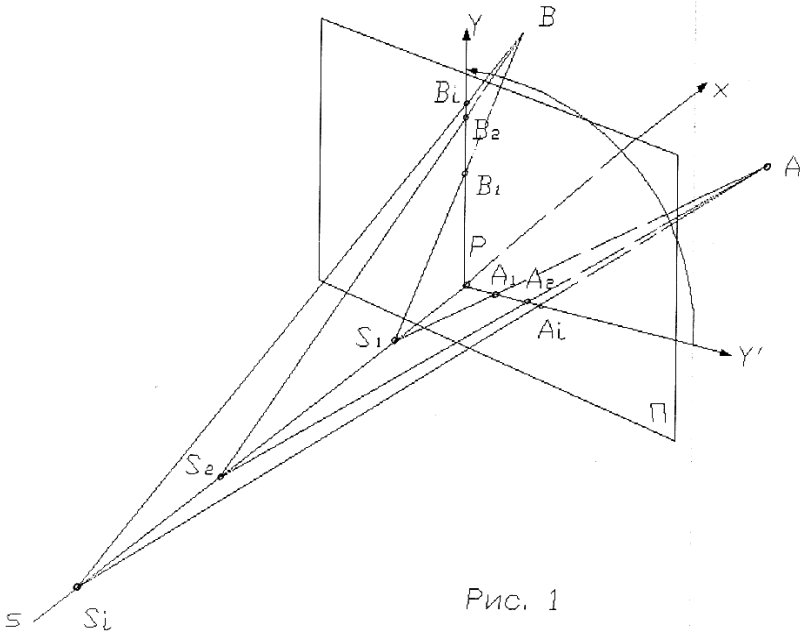


Рис. 1

Після знаходження кратних точок для всіх відповідностей повертаємо систему в початкове положення. При цьому ці точки, в залежності від проєкціуючого апарата, можуть співпадати з точкою P системи, або утворювати на площині Π коло кратних точок. Таким чином, просторова задача зводиться до плоскої на одній із площин пучка s .

Для центральних проєкцій сформульовано твердження: якщо три проєкції точкового простору деяким апаратом проєкціонування в системі зі співпадаючими осями s (рис.1) утворюють на площині Π пучок $P = \Pi \cap s$ прямих – носія проєкцій так, що проєкції пар точок A, B простору знаходяться в проєктивних відповідностях з подвійною точкою P для всіх відповідностей, то таке неперервне відображення простору на площину виконано апаратом центрального проєкціонування.

Це твердження для точкового простору можна вважати деяким аналогом теореми Сгера для лінійчатого простору. Одержано рівняння (1) проєктивної відповідності, утвореного проєкціями пари точок $A(a; \varphi), B(c; d)$ (рис.2):

$$y_3 - C y_2 - D y_1' = 0 \quad (1)$$

де: y_i і y_i' - координати проєкцій $A_i B_i$ цих точок від початку P , $i = 1, 2, 3$;

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{a-c}{ad} \\ D &= \frac{cb}{ad} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

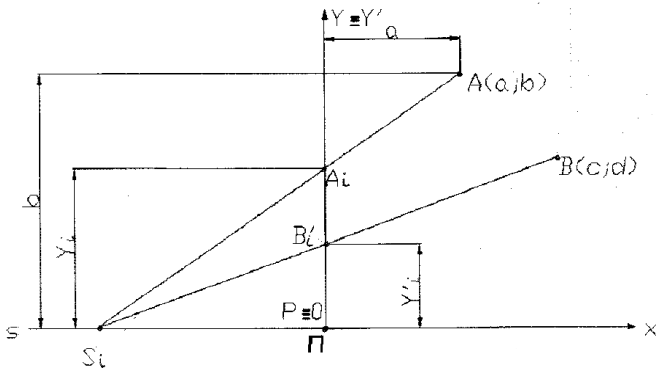


Рис. 2

Для визначення коефіцієнтів C, D за числовими значеннями змінних y_i, y'_i , необхідно скласти систему двох лінійних рівнянь виду (1), для чого необхідні дві пари змінних, відповідних двом проєкціям точкового простору.

Із системи рівнянь (2) слідує неможливість визначення координат a, b, c, d точок A, B при відомих значеннях C, D , так як невідомих чотири, а рівнянь, зв'язуючих їх, два. З цього слідує, що метрика простору для цього виду проєціювання визначається з точністю до проєктивного перетворення. Для повної метричної визначеності необхідно заздалегідь знати які-небудь дві з чотирьох координат.

У наступному випадку побачимо, що в таких допоміжних умовах немає потреби. Розглянемо двосередовищну зйомку [3] конгруенцією заломлених променів при русі центра $S_i \cap \gamma$ перпендикулярно площині Π розділу середовищ, прийняту за площину проєкцій (рис. 3).

У загальному випадку через довільну точку A можливо провести чотири променя, дотичних до каустичної кривої q_4 , що при цьому має місце, але фізичним змістом володіє лише один з них.

Одержано рівняння (3) (4,4)-значної відповідності, що зв'язує координати пари точок $A(a; b)$ і $B(c; d)$ з координатами x_i і x'_i їх проєкцій:

$$\left(\frac{bx}{x_i - a} \right)^2 - \left(\frac{dx'_i}{x'_i - c} \right)^2 = (1 - n^2)(x_i^2 - x_i'^2), \quad (3)$$

де n - показник заломлення середовища R_{11} , що проєціюється відносно середовища R_1 , в якому знаходяться центри S_i проєціювання.

Так як це рівняння має п'ять невідомих a, b, c, d, n , то для його складання за відомими змінними x_i і x'_i , необхідно скласти і розв'язати систему з п'яти нелінійних рівнянь виду (3) ($i=1, 2, 3, 4, 5$). Для вибору необхідного рішення треба обмежитись простором R_{11} , а обертанням навколо осі γ сумістити його в нижню ліву четверть координатних осей x, y . Тоді в дані для вибору необхідного рішення входять тільки від'ємні значення координат a, b, c, d , при цьому $n > 1$.

Зазначимо, що в цій системі проєкцій точка $P = O \cap \gamma$ - двохкратна для всіх відповідностей, утворених проєкціями пар точок простору на прямих пучка $P \supset \Pi$.

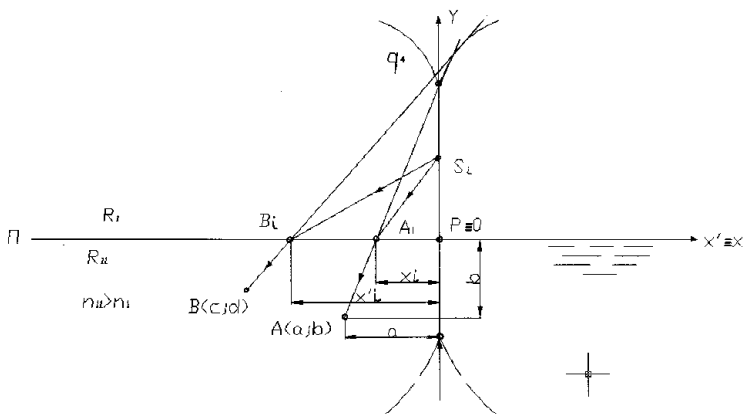


Рис.3

Як і теорема Сгера, системи проєкцій зі співпадшими осями володіють принципом єдиності, тобто для кожного виду проєціювання на спільній площині проєкцій утворюються ознаки притаманні тільки цьому виду. Наприклад, дві конгруенції, що задані колом і фокальною сферою при ортогональному перепроєціюванні зображень з площин, що з ними зв'язані, утворюють на своїх площинах кола подвійних точок для усіх відповідностей. Ці кола являються ортогональними проєкціями фокальних елементів цих конгруенцій, але відповідності точкових рядів будуть різні. В першому випадку – проєктивна, в другому – (2, 2)-значна.

Висновки. Розглянута загальна задача геометричного відображення та моделювання простору на площині, яка об'єднує в собі три елементи: геометричний апарат проєціювання, просторовий об'єкт та його проєкції, яка може бути використана для розвитку нарисної геометрії, фотограметрії в оптично різних середовищах, розпізнавання геометричних образів.

Фотограметрія використовує прийомі різних дисциплін, запозичених з оптики і проєктивної геометрії. У простішому випадку просторові координати точок об'єкту визначаються шляхом вимірів, які виконуються за двома і більше фотографіями, знятих з різних положень. При цьому на кожному зображенні знаходяться загальні точки. Відтак промінь зору проводиться від місцеположення фотоапарату до точки на об'єкті. Перетин цих променів і визначає розташування точки в просторі. Більш складні алгоритми можуть використовувати другу раніше відому інформацію про об'єкт: наприклад симетрію складових його елементів, а у деяких випадках підлягають реконструюванню просторових координат по одному фотографічному зображенню.

Використаний метод з'йомки зі співпадшими осями для різних проєціюючих конгруенцій.

Одержані рівняння відповідностей точкових рядів, утворених проєкціями пар точок простору на площині проєкцій, які містять інформацію про метрику простору, вид проєціюючого апарату та проєкційної системи є дослідницькою частиною науково-дослідної роботи студентів.

Список літературних джерел

1. Jeger M. Das axonometrische Prinzip in Lichte moderner Begriffsbildungen. Elem. Math., 13 №1. Wien, 1958.
2. Улановский В.П. Принцип Шаля и его приложения в геометрии и механике. Сборник статей по алгебраической геометрии. Л. Издательство Военно-транспортной академии РККА, 1938.
3. Слюсаренко В.И. Двусредная съемка при движении фотоаппарата перпендикулярно плоскости раздела сред. Сб. «Прикладная геометрия и инженерная графика». Вып. 27. Киев, «Будівельник», 1978.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ЖИДКИХ СРЕДАХ

И.М. Кузьев, А.Е. Лободенко

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Большой интерес в различных областях техники вызывают процессы взаимодействия газовых пузырьков с жидкой фазой, которые могут оказывать как положительную роль в технологических процессах, так и отрицательно воздействовать на проведение технологического процесса. Наиболее явно выраженное двойное действие наблюдается при воспроизведении режимов кавитации. При этом положительный эффект связан, например, с дроблением или помолом твердых частиц за счет схлопывания газовых пузырьков. Отрицательный же эффект выражается в разрушении внутренних поверхностей рабочих камер при перемещении и переработке жидких сред. Кроме того, значительный интерес также представляют процессы порообразования в полимерных средах при получении вспененных полимерных материалов, качество которых во многом зависит от динамического поведения газовых пузырьков, определяющих структуру пористого материала.

Таким образом, знание поведения газовых пузырьков в жидкой среде и возможность регулирования их размеров играет большую роль при проведении различных технологических процессов. В одном случае это связано с уменьшением их диаметра вплоть до схлопывания пузырьков, а в другом – с ростом их диаметра до фиксации определенного размера с целью получения заданной структуры.

Основная предпосылка при получении определяющих уравнений для моделирования динамического поведения газовых пузырьков является условие сферичности формы газового пузырька, что дает возможность решать задачу в сферической системе координат.

Если предположить, что имеется только одна радиальная составляющая скорости ($V_r \neq 0$), а две другие отсутствуют ($V_\varphi = V_\theta = 0$), то уравнение движения имеет вид [1,2]

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \cdot \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \sigma_{rr} \right) - \frac{\sigma_{\varphi\varphi} + \sigma_{\theta\theta}}{r}. \quad (1)$$

Уравнение неразрывности запишется так

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot V_r \right) = 0. \quad (2)$$

Для радиальной скорости на поверхности пузырька можно записать такое соотношение

$$V_r \Big|_{r=R} = \frac{dR_p}{dt} = \dot{R}_p, \quad (3)$$

где R_p – радиус пузырька.

С учетом двух последних выражения будут справедливыми следующие зависимости

$$V_r = \frac{R_p^2 \cdot \dot{R}_p}{r^2}; \quad (4)$$

$$\frac{dV_r}{dr} = -2 \cdot \frac{R_p^2 \cdot \dot{R}_p}{r^3}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (4) и (5) в уравнение движения (1), получаем

$$\rho \cdot \left(\frac{2 \cdot R_p \cdot \dot{R}_p^2 + R_p^2 \cdot \ddot{R}_p}{r^2} - \frac{2 \cdot R_p^4 \cdot \dot{R}_p^2}{r^5} \right) = - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{2 \cdot (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})}{r},$$

где $\ddot{R}_p = d^2 R_p / dt^2$.

Выражение (6) записано с учетом равенства $\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\varphi\varphi}$.

Если выполнить интегрирование в уравнении (6) по координате Γ в пределах от $r = R_p$ до $r = H$, где H – половина минимального характеристического размера рабочей ячейки, например, ее ширины, то будет справедливым такое выражение

$$\rho \cdot \left[\left(2 \cdot R_p \cdot \dot{R}_p^2 + R_p^2 \cdot \ddot{R}_p \right) \cdot \left(-\frac{1}{H} + \frac{1}{R_p} \right) - \frac{2 \cdot R_p^4 \cdot \dot{R}_p^2}{4} \cdot \left(-\frac{1}{H^4} + \frac{1}{R_p^4} \right) \right] = \\ = P(R_p) - P(H) + \sigma_{rr}(H) - \sigma_{rr}(R) + 2 \cdot \int_{R_p}^H \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} dr. \quad (7)$$

Используя условие $H \gg R_p$ и равенство $\sigma_{rr} = -2 \cdot \sigma_{\theta\theta}$, интегрирование по координате r можно выполнить в пределах от $r = R$ до $r = \infty$. Тогда соотношение (7) переписывается так [3]

$$\rho \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \dot{R}_p^2 + R_p \cdot \ddot{R}_p \right) = P(R_p) - P(\infty) + \sigma_{rr}(\infty) - \sigma_{rr}(R_p) + 3 \cdot \int_{R_p}^{\infty} \frac{\sigma_{rr}}{r} dr. \quad (8)$$

Баланс сил по поверхности раздела жидкость – пузырек, без учета воздействия давления со стороны жидкой среды на газовый пузырек, можно представить так

$$-P(R_p) + \sigma_{rr}(R_p) = -P_g + \frac{2 \cdot \sigma}{R_p}, \quad (9)$$

где P_g – давление внутри пузырька; σ – поверхностное натяжение.

Можно записать такую зависимость

$$-P(\infty) + \sigma_{rr}(\infty) = -P_{\infty}, \quad (10)$$

где P_{∞} – граничное давление в пузырьке, которое в ряде случаев может быть принято равным атмосферному ($P_{\infty} = 0,1013$ МПа) (данную величину также называют статическим давлением в жидкости).

Чтобы конкретизировать уравнение (8), необходимо выбрать соответствующее реологическое уравнение состояния (связывающее компоненты тензора напряжений с компонентами тензора скоростей деформаций), которое адекватно может описать поведение той или иной жидкой среды.

В случае, когда окружающая газовый пузырек жидкая среда будет иметь свойства ньютоновской жидкости, то связь между компонентами тензора напряжений σ_{ij} и компонентами тензора скоростей деформаций d_{ij} (реологическое уравнение состояния) в общем случае будет иметь вид [4]

$$\sigma_{ij} = 2 \cdot \eta \cdot d_{ij}, \quad (11)$$

где η – коэффициент вязкости.

Компоненты тензора скоростей деформаций могут быть определены из зависимости

$$d_{ij} = 0,5 \cdot \left(\partial V_i / \partial x_j + \partial V_j / \partial x_i \right). \quad (12)$$

С учетом того, что в данном случае имеем только одну составляющую тензора напряжений ($\sigma_{rr} = 2 \cdot \eta \cdot d_{rr}$, $d_{rr} = \partial V_r / \partial r$), уравнение (8), принимая во внимание равенства (9) и (10), можно представить в виде

$$\rho \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \dot{R}_p^2 + R_p \cdot \ddot{R}_p \right) = P_g - \frac{2 \cdot \sigma}{R_p} - \frac{4 \cdot \eta \cdot \dot{R}_p}{R_p} - P_\infty. \quad (13)$$

Если в соотношении баланса сил по поверхности раздела жидкость – пузырек учесть воздействие давления со стороны жидкой среды на газовый пузырек, то уравнение (9) можно переписать так

$$-P(R_p) + \sigma_{rr}(R_p) = -P_g + 2 \cdot \sigma / R_p + P(t), \quad (14)$$

где $P(t)$ – давление в жидкой среде, то есть внешнее давление относительно пузырька.

С учетом последнего соотношения уравнение (13) будет иметь вид [5]

$$\rho \cdot \left(3/2 \cdot \dot{R}_p^2 + R_p \cdot \ddot{R}_p \right) = P_g - 2 \cdot \sigma / R_p - 4 \cdot \eta \cdot \dot{R}_p / R_p - P_\infty - P(t). \quad (15)$$

Выражение (15) получило название уравнения Ээля-Плессета.

В уравнение (15) входят три изменяющиеся во времени параметра. Первый параметр – давление в жидкой среде $P(t)$, которое задается или рассчитывается из условий функционирования технологической системы. Второй параметр – радиус пузырька R_p , величина которого должна рассчитываться непосредственно из уравнения (15), при этом также находится и скорость изменения радиуса пузырька (в случае необходимости и ускорение). Третий параметр – давление внутри пузырька P_g , для определения которого необходимо дополнительное уравнение.

В работе [3] получено такое дифференциальное уравнение первого порядка для описания поведения давления внутри пузырька

$$\dot{P}_g = -\frac{3 \cdot P_g}{R_p} \cdot \dot{R}_p + \frac{6 \cdot (\rho \cdot R \cdot T)^2 \cdot D \cdot R_p}{M^2} \cdot \frac{(K_p \cdot P_{g0} - K_p \cdot P_g)^2}{(P_g \cdot R_p^3 - P_{g0} \cdot R_{p0}^3)}, \quad (16)$$

где D – коэффициент диффузии; K_p – диффузионная константа Генри; P_{g0} – начальное давление в пузырьке; R_{p0} – начальное значение радиуса пузырька; M – молекулярная масса газа пузырька; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

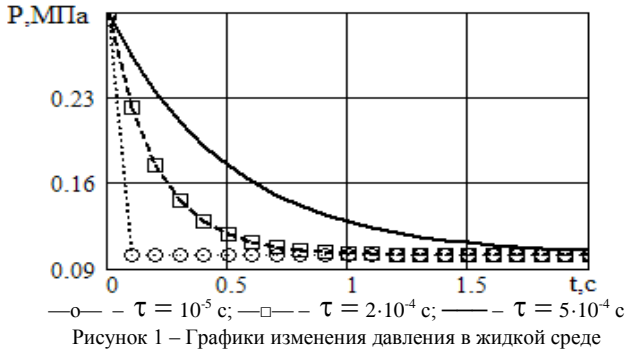
Таким образом, для моделирования динамического поведения газового пузырька в жидкой ньютоновской среде необходимо воспользоваться двумя уравнениями (15) и (16).

Данная система уравнений решалась с помощью математического пакета MathCAD. При этом зависимость для давления в жидкой среде $P(t)$ определялась по формуле

$$P(t) = P_1 - (P_1 - P_\infty) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (17)$$

где τ – параметр, характеризующий степень изменения давления.

На рис. 1 изображены графики $P(t)$, использованные в расчетах для трех значений τ при $P_1 = 0,3 \text{ МПа}$.



На рис. 2 представлены динамические характеристики пузырька при таких параметрах: $P_{\infty} = 0,1013$ МПа; $M = 0,029$ кг/моль; $\rho = 1000$ кг/м³; $T = 473$ К; $K_p = 4,26 \cdot 10^{-9}$ м²/Н; $D = 5,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с; $\sigma = 0,07$ Н/м; $P_{g0} = 0,33$ МПа; $R_{p0} = 2$ мм (обозначение кривых на рис. 2 соответствует обозначениям для рис. 1).

Из анализа приведенных на рис. 2 графиков (в соответствии с изменением давления согласно рис. 1) можно сделать несколько выводов. Во-первых, наблюдается явно выраженный волновой характер изменения, как радиуса пузырька, так и давления внутри его. Во-вторых, значение логарифмического декремента затухания мало, что говорит о низкой степени затухания колебательного процесса. В-третьих, при изменении градиента давления для внешней среды происходят также и изменения частотно-амплитудных характеристик кривых, представленных на рис. 2. В-четвертых, при возрастании параметра τ в первоначальный момент времени величина радиуса пузырька может уменьшаться, в сравнении с его первоначальным значением, а внутреннее давление в пузырьке, наоборот – увеличиваться.

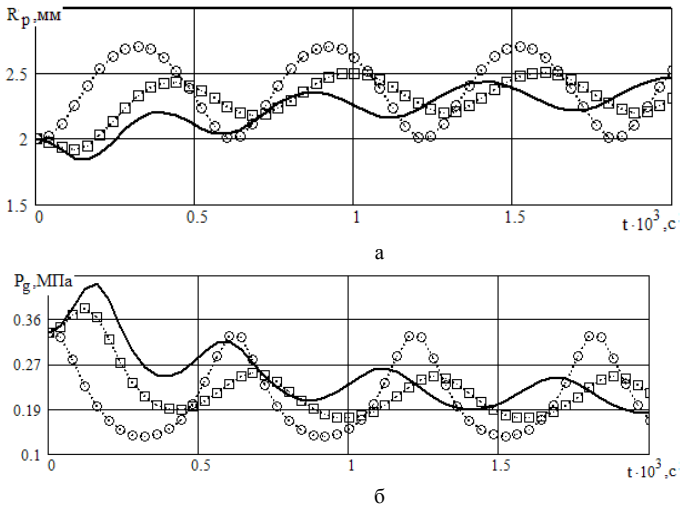


Рисунок 2 – Графики динамических характеристик пузырька при $\eta = 1,002 \cdot 10^{-3}$ Па · с: а – изменение радиуса пузырька; б – изменение давления в пузырьке

Выполняя соответствующие расчеты, можно оценить влияние и других параметров на динамические характеристики газового пузырька. В качестве примера приведем результаты расчета для той же математической модели, но при другом значении вязкости жидкости. Графики приведены на рис. 3 (все другие параметры такие же, как и на рис. 1 и рис. 2). Сравнивая соответствующие графики на рис. 2 и рис. 3, можно сделать вывод о том, что с повышением вязкости процесс затухания колебательного процесса значительно усиливается

При моделировании процессов получения вспененных полимерных материалов, приходится сталкиваться с различными эффектами, возникающими в процессе переработки полимерных материалов. К одному из таких эффектов следует отнести аномалию вязкости, а именно: изменение вязкости от скорости деформации. В таком случае использование реологического уравнения состояния для ньютоновской жидкости (11) приводит к большим погрешностям. Наиболее адекватные результаты в данном случае дает степенная жидкость, для которой справедливо такое выражение

$$\sigma_{ij} = 2 \cdot \mu \cdot |4 \cdot I_2|^{(n-1)/2} \cdot d_{ij}, \quad (18)$$

где n – показатель степени; μ – коэффициент консистенции; I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформаций.

Кроме того, большое количество полимерных сред представляют собой вязкоупругие жидкости, для которых необходимо также использовать соответствующие реологические уравнения состояния. Одно из таких уравнений описывает обобщенную модель Максвелла и может быть представлено так

$$\sigma_{ij} + \lambda \cdot \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = 2 \cdot \eta \cdot d_{ij}. \quad (19)$$

где λ – время релаксации.

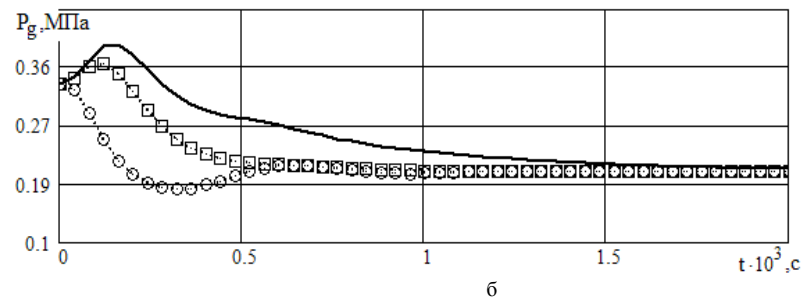
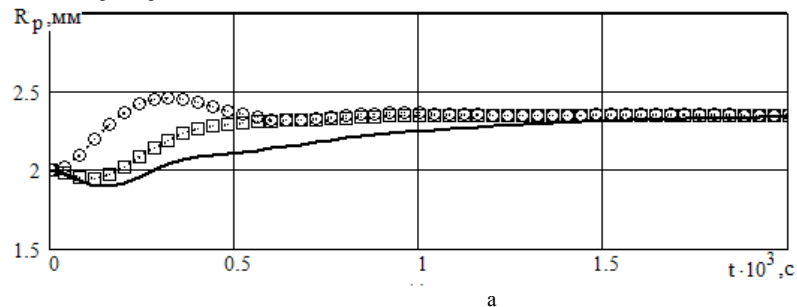


Рисунок 3 – Графики динамических характеристик пузырька при $\eta = 10 \cdot \text{Па} \cdot \text{с}$: а – изменение радиуса пузырька; б – изменение давления в пузырьке

Выводы.

Разработаны математические модели для моделирования динамического поведения газовых пузырьков в жидких средах с использованием различных реологических уравнений состояния, на базе которых построены программные блоки в пакете MathCAD, позволяющие оптимально управлять процессами переработки.

Список литературных источников

1. Han, C.D. Studies on structural foam processing IV. Bubble growth during mold filling [Text] / C.D. Han, H.J. Yoo // Polymer Engineering and Science. – 1981. – Vol. 21, №9. – P. 518 – 533.
2. Кузьев, И.М. Анализ явлений порообразований в полимерных материалах при проведении процессов экструзии [Текст] / И.М. Кузьев // Вопросы химии и хим. технологии. – 2005. – № 2. – С.125-135.
3. Yoo, H.J. Oscillatory behavior of a gas bubble growing (or collapsing) in viscoelastic liquids [Text] / H.J. Yoo, C.D. Han // AIChE Journal. – 1982. – Vol. 28, №6. – P. 1002 – 1009.
4. Кузьев, И.М. Моделирование работи та проектування екструзійних агрегатів з розробкою елементів САПР [Текст]: монографія / І.М. Кузьев – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2008. – 474 с.
5. Маргулис, М.А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция [Текст] / М.А. Маргулис. – М: Химия, 1986. – 288 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В КОНУСНЫХ КАНАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ И.М. Кузьев, Е.И. Попов

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Геометрическая форма рабочего канала, представляющая собой конусную форму, используется в различных типах химического оборудования, среди которых особый интерес представляют центробежные экструдеры для переработки полимерных материалов [1 – 3], в которых перемещение перерабатываемой среды осуществляется преимущественно за счет центробежных сил, вызванных синхронным вращением двух рабочих элементов, образующих конусную форму.

Выполним анализ течения жидких сред под действием центробежных сил в конусных каналах согласно со схемой, представленной на рис. 1.

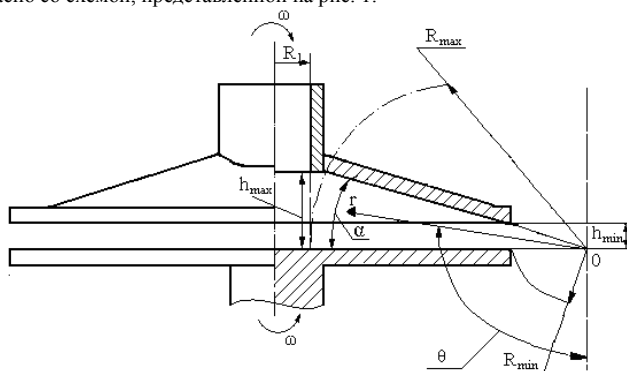


Рисунок 1 – Схема рабочей секции с конусным каналом

Процессы движения материала в конусном канале следует описывать в сферической системе координат. При этом принимаем следующие условия

$$V_\theta = 0; V_\varphi = \omega \cdot r_1; \frac{\partial}{\partial \varphi} = 0; r_1 = (R_1 + R_{\max}) - r. \quad (1)$$

Уравнения движения в конусном канале с учетом условий (1) можно представить таким образом

$$\begin{aligned} \rho \cdot \left[V_r \cdot \frac{\partial V_r}{\partial r_1} - \frac{V_\varphi^2}{r_1} \right] = & \pm \frac{\partial P}{\partial r_1} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r_1} + \frac{1}{r_1} \cdot \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial \theta} \\ & + \frac{2 \cdot \sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r_1} + \frac{ctg(\theta)}{r_1} \cdot \sigma_{r\theta} + F_c; \quad (2) \\ - \rho \cdot ctg(\theta) \cdot \omega^2 \cdot r_1 = & - \frac{1}{r_1} \cdot \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_{r\theta}}{\partial r_1} + \frac{1}{r_1} \cdot \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{3 \cdot \sigma_{r\theta}}{r_1} + \frac{ctg(\theta)}{r_1} \cdot (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{\varphi\varphi}). \end{aligned}$$

где F_c – центробежная сила, отнесенная к единице объема, которую можно определить из выражения

$$F_c = \rho \cdot \omega^2 \cdot r_1. \quad (4)$$

Так как в данной работе рассматривается в качестве рабочей среды неньютоновская жидкость, то следует выбрать одну из имеющихся моделей, которая задается соответствующим реологическим уравнением состояния. Как показал опыт, наиболее оптимальным при переработке полимерных материалов является модель для степенной жидкости [4, 5], реологическое уравнение состояния для которой в общем виде может быть записано таким образом

$$\sigma_{ij} = 2 \cdot \eta_{ef}(I_2) \cdot d_{ij}, \quad (5)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; d_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; $\eta_{ef}(I_2)$ – коэффициент эффективной вязкости, который зависит от второго инварианта тензора скоростей деформации I_2 .

Коэффициент эффективной вязкости можно представить так

$$\eta_{ef}(I_2) = \mu \cdot |4 \cdot I_2|^{(n-1)/2}, \quad (6)$$

где n – показатель степени; μ – коэффициент консистенции.

Для второго инварианта тензора скоростей деформаций с учетом условий (1) будет справедливым выражение

$$I_2 = 2 \cdot \frac{\partial V_r}{\partial r_1} \cdot \frac{V_r}{r_1} + \left(\frac{V_r}{r_1} \right)^2 - \frac{1}{4 \cdot r_1^2} \cdot \left(\frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right)^2. \quad (7)$$

Составляющие тензора напряжений с учетом принятых условий найдутся из таких соотношений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &= 2 \cdot \mu \cdot |4 \cdot I_2|^{(n-1)/2} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial r_1}; \\ \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\varphi\varphi} &= 2 \cdot \mu \cdot |4 \cdot I_2|^{(n-1)/2} \cdot \frac{V_r}{r_1}; \\ \sigma_{r\theta} &= \mu \cdot |4 \cdot I_2|^{(n-1)/2} \cdot \frac{1}{r_1} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial \theta}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Уравнение неразрывности в данном случае запишется так

$$\frac{\partial}{\partial r_1} (r_1^2 \cdot V_r) = 0. \quad (9)$$

Из последнего соотношения получается такое равенство

$$V_r = \frac{\psi(\theta)}{r_1^2}, \quad (10)$$

где $\psi(\theta)$ – функция, зависящая только от координаты θ .

Если предположить, что давление не зависит от координаты θ , а значит и градиент давления по оси r_1 также не зависит от координаты θ , то в дальнейшем можно использовать только уравнение (2).

Подстановка соотношений (8) с учетом равенств (4) и (10) и условия (1) в уравнение (2) приводит к такому уравнению (аргумент для функции Ψ с целью упрощения не записывается)

$$\begin{aligned} \frac{d^2\psi}{d\theta^2} \cdot K_1(\theta) + \frac{d\psi}{d\theta} \cdot K_2(\theta) - \left(\frac{d\psi}{d\theta}\right)^2 \cdot K_3(\theta) + \psi \cdot K_4(\theta) = \\ -\rho \cdot \frac{2 \cdot \psi^2}{r_1^5} - 2 \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot r_1 - \frac{\partial P}{\partial r_1}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{где } K_1(\theta) = \frac{\mu \cdot 4^{n1}}{r_1^{m1}} \cdot A(\theta)^{n3} \cdot \left[3 \cdot \psi^2 + \frac{n}{4} \cdot \left(\frac{d\psi}{d\theta}\right)^2 \right]; \quad K_2(\theta) = \text{ctg}(\theta) \cdot \frac{\mu \cdot 4^{n1}}{r_1^{m1}} \cdot A(\theta)^{n1};$$

$$n1 = \frac{n-1}{2};$$

$$K_3(\theta) = \frac{\mu \cdot 4^{n1}}{r_1^{m1}} \cdot (n-1) \cdot A(\theta)^{n3} \cdot 3 \cdot \psi; \quad K_4(\theta) = 3 \cdot \frac{\mu \cdot 4^{\frac{n+1}{2}}}{r_1^{m1}} \cdot (n-1) \cdot A(\theta)^{n3};$$

$$A(\theta) = 3 \cdot \psi^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{d\psi}{d\theta}\right)^2;$$

$$n3 = \frac{n-3}{2}; \quad m1 = 3 \cdot n + 1.$$

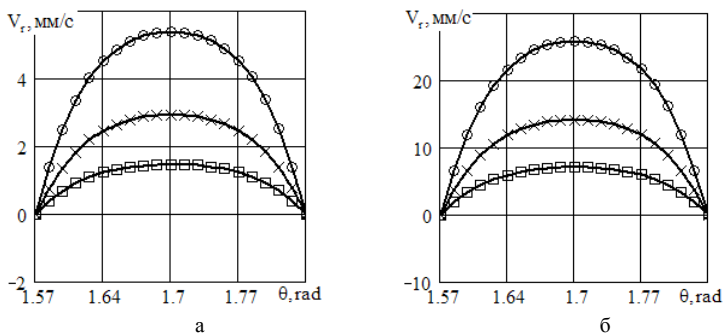
Уравнение (11) представляет собой нелинейное обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка относительно искомой величины $\psi(\theta)$.

Для распределения давления использовано следующее выражение [6] (с учетом нулевого начального избыточного давления)

$$\begin{aligned} P(r) = -\frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot h_p}{A_k} \cdot \left[(R_1 + R_{\max}) - \frac{A_k r - h_p}{A_k} \right] + \exp \left[A_k \cdot \frac{R_1 + R_{\max}}{h_{\max}} - A_k \cdot \frac{r}{h_p} \right] \times \\ \times \left\{ P_0 + \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot h_{\max}}{A_k} \cdot \left[(R_1 + R_{\max}) - \frac{A_k \cdot (R_1 + R_{\max}) - h_{\max}}{A_k} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (12)$$

где A_k – величина конусности канала, h_p – текущее значение высоты конусного канала.

Решение данного уравнения найдено с помощью математического пакета MathCAD. Результаты решения при определенных параметрах приведены на рис. 2.



а – графики при $\Omega = 20\text{c}^{-1}$; б – графики при $\Omega = 30\text{c}^{-1}$;
 —○— $\Gamma = 60\text{мм}$; —×— $\Gamma = 80\text{мм}$; —□— $\Gamma = 100\text{мм}$

Рисунок 2 – Графики распределения скорости в конусном канале под действием центробежных сил для неньютоновских жидкостей при таких общих параметрах:

$$R_{\max} = 200\text{мм}; R_1 = 30\text{мм}; \alpha = 15\text{град}; n = 0,516; \mu = 4,5\text{кПа}\cdot\text{с}^n$$

Выводы.

Разработана математическая модель для моделирования процессов течения неньютоновских жидкостей в конусных каналах под действием центробежных сил, на базе которой построен программный блок в пакете MathCAD, позволяющий оптимизировать режимы работы в соответствии со свойствами перерабатываемой среды и геометрическими характеристиками рабочей зоны.

Список литературных источников

1. А.с. 765000 СССР, МКИ³ В 29 F 3/012. Центробежный экструдер для полимеров [Текст] / Н.М. Климашевич, Ю.И. Пушкарёв. – № 2673572/23-05; Заявлено 16.10.78; Опубл. 23.09.80, Бюл. № 35. – 3 с.
2. Пат. 76553 Україна, МПК⁷ В 29 С 47/36. Відцентровий екструдер для переробки полімерів [Текст] / Кузяєв І.М. (Україна), заявник і патентовласник ДВНЗ «Укр. держ. хім.-тех. у-т» – № 20040705277; заявл. 01.07.2004; опубл. 15.08.2006, Бюл. № 8. – 3 с.
3. Study of solid-plug conveying in a centrifugal extruder [Text] / Z. Jing, W. Daming, I.M. Kuzyayev et al. // Intern. Polymer Processing. – 2008. – Vol. 23, №3. – P.1 – 6.
4. Bird, R.B. Dynamics of polymeric liquids. V.I. Fluid Mechanics [Text] / R.B. Bird, R.S. Armstrong, O. Hassager. – N.-Y.: Wiley, 1977. – 365 p.
5. Кузяєв, І.М. Моделювання роботи та проектування екструзійних агрегатів з розробкою елементів САПР [Текст]: монографія / І.М. Кузяєв – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2008. – 474 с.
6. Кузяєв, І.М. Анализ распределения давлений в полимерном материале, находящемся в конусном зазоре под действием центробежных сил [Текст] / И.М. Кузяев // Вопр. химии и хим. технологии. – 2005. №1. – С.196 – 199.

Київський національний університет технологій і дизайну, Київ

Вступ. Дослідженню питань ефективного обслуговування та функціонування суднової системи валопроводу присвячені праці багатьох вчених. Такі автори як Л.Т. Балицький, В.В. Коливанов, А.А. Хлибів та ін. наголошують у своїх працях на важливість правильного підходу щодо обслуговування деталей суднового валопроводу, які мають ресурс більше 50 000 ходових годин[1-3]. Багато наукових літературних джерел присвячено питанням якісного технічного обслуговування, а саме підшипникових вузлів суднового валопроводу[1,2,4]. Розробці і створенню засобів для технічного обслуговування упорно-опорних підшипників під час експлуатації, присвячені роботи багатьох вчених, зокрема І.А. Куніна, В.А. Максимова, А.К. Нікітіна, І.А. Савіна, А.А. Сручкова та ін. [1,6,7]

Аналіз відомих досліджень показує, що незважаючи на наявність певних методів, інструментів та датчиків по фіксуванню робочих параметрів підшипникових вузлів, а також наявність кваліфікованого обслуговування підшипникових вузлів, фактичний ресурс цих деталей не відповідає вкладеному в них виробником, оскільки основною складовою їх технічного обслуговування є експертний та органолептичний методи.

Покращання процесу технічного обслуговування підшипникових вузлів суднового валопроводу є важливою проблемою кораблебудівної галузі. Комплексний підхід до підвищення якості методів технічного обслуговування підшипників повинен включати як пошук нових конструктивних рішень робочих органів, так і теоретичне обґрунтування конструктивних та технологічних параметрів. Це обумовлює розвиток сучасної теорії по збереженню ресурсних параметрів деталей, які мають ресурс, що перевищує 25 000 тис. робочих годин. Метою такого підходу є синтез оптимальних технологічних параметрів вузлів та обслуговування персоналу для забезпечення високої якості на всіх експлуатаційних етапах. Таким чином, теоретичне узагальнення, моделювання та дослідження техніко-технологічного процесу експлуатаційного обслуговування опорних підшипників валопроводу потребує розвитку існуючих методів та підходів в обслуговуванні вузлів, так і розробку нового підходу, який враховував би усі параметри та сприяв виробітку вкладеного виробником ресурсу, запобігаючи при цьому передчасного руйнування деталей вузла.

Метою даної роботи є визначення принципів моделювання

Експлуатаційного процесу обслуговування підшипників суднового валопроводу шляхом уніфікації процедур побудови моделей складних систем та розробки базових засад щодо вдосконалення методології моделювання експлуатаційних процесів. Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити загальну схему технології обслуговування упорно-опорних підшипників, вивчити особливості моделювання експлуатаційних процесів, визначити мету моделювання та розглянути можливі критерії узагальнити теоретичну базу побудови моделей складних систем та запропонувати принципи моделювання експлуатаційних процесів суднових підшипників системи валопроводу.

Виклад основного матеріалу. Технічне обслуговування суднових підшипників включає перевірку кожні 12 годин рівня температури, якості мастильного матеріалу, наявності вібрації та шуму, візуальний огляд, перевірку обтиснення гвинтів – раз у три місяці, наявності зазорів між кріпильними деталями і багато інших операцій, які виконуються раз в півроку, або в рік [1]. Від правильної та чіткої організації процесу технічного обслуговування, раціонального використання вимірвальних приладів та наявності кваліфікованого спеціаліста залежить якість роботи не тільки підшипникових вузлів, але всієї валопроводної системи в цілому, оскільки невчасний вихід із ладу підшипникового вузла призводить до неповноцінного функціонування морехідного засобу. Математичне моделювання базується на таких загальних принципах, як інформативність, здійсненність, множинність, але при побудові моделей складних експлуатаційних процесів, зокрема технологічних процесів обслуговування підшипників, тому

необхідно враховувати деякі додаткові аспекти. Автором запропоновано розглядати наступні принципи моделювання складних експлуатаційних процесів.

1. Доцільність моделювання – це основоположний принцип побудови будь-яких моделей. Моделювання як процес представлення об'єкта, процесу або явища має бути цілеспрямованим, економічно обгрунтованим та отриманий результат (тобто модель) не повинен підвищувати складність.

2. Наявність достатньої інформації – це принцип інформаційної достатності, тобто для побудови моделі необхідна наявність апріорної інформації, яка дозволяє побудувати адекватну модель. Повнота та невизначеність наявної інформації обумовлюють доцільність, адекватність та ефективність моделювання.

3. Множинність моделювання – це принцип представлення реального об'єкту або процесу множиною моделей, які відображають різноманітні аспекти його функціонування. Вибір типу моделювання, деталізація опису процесу, складність моделі – все це повинно узгоджуватись з цілями та завданнями моделювання.

4. Агрегативність моделі – це принцип моделювання складних систем як сукупності більш простих складових, які об'єднані моделлю більш високого рівня - агрегатом. Ієрархічне уявлення процесу дозволяє суттєво спростити модель складного об'єкту, зосередити увагу на головних аспектах, деталізація яких розглядається на нижчому рівні абстракції.

5. Координованість – це принцип моделювання складної системи через декомпозицію та врахування взаємного впливу автономних підсистем. Будь-який технологічний процес складається з певного набору операцій, що обумовлює цілком природну декомпозицію та моделювання окремих стадій як автономних підсистем, які взаємодіють між собою. Узгодженість параметрів, інформаційних та матеріальних потоків між окремими підсистемами, а також між рівнями агрегування моделі дозволяє ефективно вирішувати складні завдання управління.

Сучасні експлуатаційні процеси мають складну структуру, що обумовлює декомпозицію на взаємопов'язані підсистеми, крізь які проходять матеріальні та інформаційні потоки. Поліпшення техніко-економічних показників функціонування технологічного процесів можливо за умов вирішення завдань координації роботи окремих ланок експлуатаційного процесу. Виділяють три основні варіанти постановки задачі координації експлуатаційного процесу [9]:

- узгодження матеріальних потоків між підсистемами за умов збереження експлуатаційних режимів суміжних підсистем;

- узгодження експлуатаційних режимів суміжних підсистем за умов поліпшення загального показника якості функціонування експлуатаційного процесу;

- визначення таких параметрів матеріальних потоків та експлуатаційних режимів окремих підсистем, які забезпечать найліпші значення техніко-економічних показників функціонування експлуатаційного процесу.

У загальному вигляді математична постановка задачі координації складного експлуатаційного процесу формується наступним чином. Для кожної g -ої підсистеми складного експлуатаційного процесу треба знайти такі значення вектору параметрів експлуатаційного процесу $X_g = \{X_{gn}\}$ та вектору управляючих впливів $U_g = \{U_{gn}\}$, які забезпечать максимальне значення критерію ефективності функціонування g -ої підсистеми:

$$f_g = (X_g, U_g, S_g) \rightarrow \max; U_g \in U, X_g \in X$$

де – S_g зафіксований параметр технологічного процесу, який забезпечує координацію g -ої підсистеми технологічного процесу. Задача координації формалізується наступним чином: знайти такі значення параметрів, $S_g \in S$, які, за умови визначених значень параметрів X_g та управляючих впливів U_g для кожної підсистеми, забезпечать ефективність технологічного процесу, тобто

$$F(s) = \sum_{g=1}^N a_g f_g(\overline{X_g}, \overline{U_g}, S_g) \rightarrow \max, S_g \in S$$

де a_g – коефіцієнт відносної важливості g -ої підсистеми технологічного процесу, $\overline{X_g}$ та $\overline{U_g}$ – рішення відповідних локальних задач для кожної підсистеми, N – загальна кількість підсистем.

З метою формального уявлення та дослідження техніко-технологічного процесу обслуговування упорно-опорних підшипників авторами пропонується розглядати експлуатаційні процеси технічного огляду та обслуговування підшипників суднового валопроводу з точки зору теорії складних систем. Експлуатаційні процеси можна розглядати як складні системи, які характеризуються наступними ознаками [9]:

- велика кількість взаємопов'язаних між собою підсистем та елементів;
- наявність достатньої кількості різноманітних зв'язків та відношень;
- різноманітність цілей та вимог окремих ланок технологічного процесу;
- випадковий характер процесів;
- інваріантність структури;
- неоднорідність фізичної природи, гетерогенність.

Головною метою управління складними експлуатаційними процесами є підвищення ефективності. Поняття ефективності як співвідношення витрат на обслуговування та фактично відпрацьований ресурс є дуже вузьким щодо розглядання функціонування складних систем. Тому будемо розрізняти наступні види ефективності виробничих та експлуатаційних процесів [10]:

1) за рівнем організації експлуатаційного процесу можна виділити: ефективність економіки країни, ефективність аграрного сектору, ефективність суднобудівної галузі;

2) за формою ефекту ефективність може бути загальною або частковою;

3) за організаційним рівнем можна відокремити ефективність на рівні окремої бригади чи ланки, ефективність на рівні мореплавства;

4) за функціональним впливом будемо розглядати економічну, технологічну, соціальну, екологічну та т.п. ефективність;

5) за видами заходів або технологічних процесів можна виділити такі види ефективності як, наприклад, ефективність та кваліфікація обслуговуючого персоналу;

Таким чином, проведена класифікація видів ефективності показує, що необхідні загальні принципи формування моделей оцінювання ефективності незалежно від її виду. Найбільш загальний підхід до оцінювання передбачає виділення критеріїв оцінювання та змінних, які впливають на остаточне значення оцінки. Оцінювати ефективність технічного обслуговування підшипників валопроводу лише за допомогою одного критерію неможливо. Це обумовлено складністю експлуатаційних процесів. Наприклад, для оцінювання експлуатаційного функціонування упорно-опорних підшипників можна виділити такі критерії як зменшення ресурсу за рахунок погіршення властивостей мастильного матеріалу, наявність сторонніх частинок в підшипниковому вузлі та ін.

На значення цих критеріїв впливають різноманітні фактори, серед яких, наприклад, можна виділити, неправильно підібране мастило, наявність вологи в наслідок потрапляння конденсату, сторонні частинки, неправильне обтиснення гвинтів, перекіс кілець підшипника та ін.

Тому слід використовувати багатокритеріальний підхід. Розробка моделей багатокритеріального оцінювання та прийняття рішень є предметом окремого дослідження. Розглянемо лише базові принципи формування моделей багатокритеріального оцінювання. Автором запропоновано у якості базової моделі багатокритеріального оцінювання технічного процесу експлуатаційного обслуговування підшипникових вузлів суднового валопроводу використовувати мережеву модель комплексного оцінювання. Як показано в роботі [12], модель мережевого комплексного оцінювання надає можливість отримати агреговану оцінку; врахувати різні групи показників; порівнювати альтернативні варіанти між собою та вибрати найбільш вигідний з точки зору загальної ефективності. У моделі комплексного мережевого оцінювання для згортки показників у групи можна використовувати різні види згорток та експлуатаційні коефіцієнти [10]. Причому експлуатаційні коефіцієнти визначаються у межах кожної групи окремо, що полегшує роботу експертів і робить механізм оцінки більш гнучким.

Таким чином, оцінка технічних процесів обслуговування упорно-опорних підшипників складається з двох видів показників: експертні та інструментні. Показники «експертні» характеризують певні експлуатаційні умови та технологічні параметри зроблених висновків. Показники «інструменти» відображають певну групу характеристик інструментально вимірювального процесу. Наприклад, можна розглядати групи показників за стадіями

технічнообслуговувально процесу, або за видами машин та робочих органів, які використовуються. Якщо показники ефективності технічного процесуобслуговування підшипників в великим ресурсом неоднорідні за своєю суттю (наприклад, технічні параметри робочих органів та експлуатаційні умови роботи) і мають різні одиниці виміру, то неможливо скласти один агрегований показник шляхом згортання їх значень, а доцільніше сформувати декілька рівнів агрегованих показників, які послідовно будуть згортатися в один. З іншого боку, проміжні агреговані показники дають оцінку різних аспектів технічного процесу обслуговування і можуть використовуватися в процесі оцінювання як самостійні.

Узагальнюючи проведені дослідження можна зробити висновок, що головною метою моделювання технічних процесів обслуговування підшипників є підвищення ефективності за рахунок визначення та обґрунтування параметрів експлуатаційних процесів і технічних засобів вимірювання. Дослідження експлуатаційних процесів на основі моделювання дозволяє визначити технічні змінні, їх взаємозв'язки та взаємовплив, виділити техніко-економічні показники, оцінити вплив на прибутковість, визначити напрямки розвитку та шляхи вдосконалення техніко-технологічної бази вимірювальних засобів. Досягнення поставленої мети та вирішення відповідних задач можливо за умов розробки методичних засад моделювання та оптимізації експлуатаційних процесів стосовно різних умов функціонування.

Висновки.

Таким чином, розглянувши різноманітні аспекти щодо моделювання технічних процесів галузі обслуговування підшипникових вузлів, можна зробити наступні висновки:

- технічні процеси обслуговування відносяться до класу складних систем, які характеризуються наявністю великої кількості параметрів та змінних динамікою, неповнотою інформації, складністю структури, гетерогенністю фізичної природи, взаємним впливом та наявністю зворотних зв'язків між складовими;

- моделювання складних технічних процесів обслуговування підшипників повинно базуватися на певному наборі принципів, що забезпечують методичні засади побудови моделей шляхом уніфікації процедур моделювання, класифікації критеріїв оцінювання та узагальнення технологічних змінних;

- основними принципами моделювання технології обслуговування та правильної експлуатації підшипників суднового валопроводу запропоновано визначити: а) доцільність моделювання; б) наявність достатньої інформації; в) множинність; г) агрегативність; д) координованість.

Список використаних джерел

1. Балацкий Л.Т. Анализ поврежденных гребных валов на крупнотоннажных нефтеналивных судах типа «Прага» / Л.Т. Балацкий и др. // Морской флот, 1970. – 309 с.
2. Кольванов В.В. Поломки гребных валопроводов. Прикладная механика и технология машиностроения. Сборник научных трудов № 2 (13), 2008. – 298 с.
3. Хлыбов А.А. Методика оценки технического состояния гребных валов / Хлыбов А.А., Кольванов В.В. // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. №1 2010. – 239 с.
4. Коровчинский М.В. Теоретические основы работы подшипников скольжения Текст. / М. В. Коровчинский М.: Mashgiz, 1959. – 404 с.
5. Кунин, И. А. Гидродинамическая теория смазки упорных подшипников Текст. / И. А. Кунин М.: Изд-во АН СССР (Сиб. отд.), 1960. – 130 с.
6. Максимов В.А. Трибология подшипников и уплотнений жидкостного трения высокоскоростных турбомашин Текст. / В. А. Максимов, Г. С. Бат-кис Казань : Фэн, 1998. – 428с.
7. Стручков, А. А. Повышение надежности опорных узлов роторов путем совмещения подшипников качения и скольжения Текст. / А. А. Стручков, Л. А. Савин, Р. Н. Поляков // Материалы Международной НТК «Надежность и ремонт машин», Гагры, 2004. – 389 с.
8. Ладанюк А.П. Системный анализ складного объекта в задачах диагностики та координації [Електронний ресурс] / А.П. Ладанюк, Л.О. Власенко, Н.А. Засць. – Режим доступу: http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/1076/1/Sist_anTK.pdf
9. Яценко В. С. Эксплуатация судовых валопроводов.-М.: Транспорт, 1968. – 171 с.
10. Штерензон В.А. Моделирование технологических процессов / В.А. Штерензон. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та. – 2010. – 66 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКТИВНО-НЕОДНОРОДНЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Л.А. Латанская

Национальный университет кораблестроения, Николаев

В современной технике широкое применение получили многослойные конструкции, среди многослойных конструкций выделяются трехслойные конструкции. Особенностью трехслойных конструкций является значительное отличие физико-механических характеристик слоев. В свою очередь этот фактор влечет различие используемых расчетных схем. При разнице физико-механических параметров слоев до порядка широкое распространение имеет подход, основанный на применении гипотез для всего пакета в целом. В этом случае порядок разрешающей системы уравнений не зависит от количества слоев. При значительной разнице физико-механических характеристик слоев (при разнице нескольких порядков) используется теория оболочек с применением гипотез к каждому из слоев. При этом значительно усложняется вид системы уравнений и порядок системы зависит от количества слоев.

Работа посвящена исследованию нестационарных колебаний трехслойных цилиндрических оболочек вращения с кусочно-однородным наполнителем при осесимметричных нагружениях (рисунок 1) с применением независимых кинематических и статических гипотез к каждому слою с учетом поперечных нормальных и сдвиговых деформаций в наполнителе [1,2].

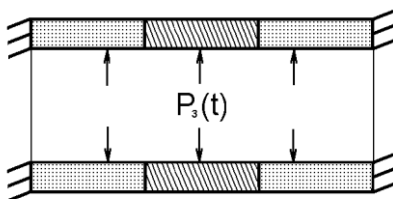


Рисунок 1 – Трехслойная цилиндрическая оболочка с кусочно-однородным наполнителем

На основе вариационного принципа Рейснера для динамических процессов получены уравнения нелинейных колебаний и естественные граничные условия рассматриваемых оболочек. Применение данного вариационного принципа позволяет устранить формальные противоречия в уравнениях обобщенного закона Гука для поперечных нормальных и сдвиговых напряжений соответствующих слоев при принятии независимых гипотез аппроксимаций перемещений и напряжений. При этом независимо варьируются как напряжения, так и перемещения.

Для решения задачи использовался численный метод, который основывается на одном из вариантов разностной аппроксимации исходного вариационного функционала

В основе численного алгоритма лежит явная конечно-разностная схема типа «крест» по временной и пространственной координатам. Используя эту схему, компоненты обобщенного вектора перемещений аппроксимируем в целых точках разностной сетки, а компоненты обобщенного тензора деформаций и усилий в полущелых точках разностной сетки.

На основе численного метода решена задача нелинейного динамического деформирования трехслойных цилиндрических оболочек вращения с кусочно-однородным наполнителем. Исследовано влияние геометрически нелинейных факторов на напряженно деформированное состояние трехслойных оболочек вращения с кусочно-однородным наполнителем при нестационарных осесимметричных нагружениях.

Анализ численных результатов показывает, что учет геометрически нелинейных составляющих при исследованных геометрических и физико-механических параметрах конструкций приводит, в ряде случаев, к значительной разнице в величинах напряженно-деформированного состояния, определенных по нелинейной и линейной теориям.

Список литературных источников

1. Пискунов В.Г., Расказов А.О. Развитие теории слоистых пластин и оболочек // Прикл. механика. 2002. Т.38, N 2. С.22-56.
2. Мейш В.Ф., Кравченко Н.В. Вынужденные колебания многослойных сферических оболочек с подкрепленным отверстием при нестационарном нагружении // Теоретическая и прикладная механика. 2003. Вып. 33. С. 159–163.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ И ДИНАМИКА СМЕНЫ КЛИМАТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕКУРРЕНТНОГО АНАЛИЗА

Н.А. Лысенко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепропетровск

Целью настоящей работы является исследование поведения климатической системы в г. Днепропетровск посредством одной из новейших разработок нелинейного анализа — рекуррентных и кросс рекуррентных графиков.

Климатическая система Земли является довольно сложной динамической системой, процессы которой происходят на различных пространственно-временных масштабах. Климатическая система по природе нелинейная: входные и выходные данные не пропорциональны, изменения происходят резко и эпизодически, чем постепенно.

Важно понимание будущих климатических тенденций, но нелинейное поведение климатической системы приводит к весьма разнообразным, удивительным, и даже не логичным наблюдениям. Таким образом, сложность климатической системы, в том числе ее бесчисленные составляющие компоненты, взаимодействия и обратные связи должны быть дополнительно изучены, чтобы приобрести новые и улучшить нынешние знания.

Математическое моделирование по временным рядам активно развивающееся направление моделирования. Многие исследования были посвящены оценке нелинейных характеристик и свойств естественных и искусственных систем. Однако большинство методов нелинейного анализа требуют либо достаточно длинных, либо стационарных рядов данных, которые далеко не всегда возможно получить на практике при исследовании реальных систем. Лишенным указанных недостатков и одним из наиболее интересных современных методов являются рекуррентные диаграммы, получившие в последнее десятилетие широкое теоретическое развитие и практическое признание. Главнейшим преимуществом инструмента РД является способность визуализировать многомерные фазовые траектории, даже в случае коротких и нестационарных данных, а по виду геометрических структур можно проследить эволюцию во времени выбранного процесса. Данный инструмент применим к коротким и нестационарным рядам, что является неоспоримым преимуществом перед другими способами нелинейного анализа. Рекуррентные графики не накладывают существенных ограничений на данные, а потому позволяют работать практически с любыми рядами. Преимущество предлагаемого графического инструмента состоит в том, что он позволяет исследовать *m*-размерную траекторию фазового пространства посредством двумерного представления его рекуррентности и, следовательно, дает видеть динамическую картину в целом.

В этом исследовании был установлен метод, который позволяет эффективно получать детальную информацию о поведении климатической системы. Результаты этого исследования могут предоставить полезную информацию в процессе принятия решений на региональном уровне. Выводы имеют важные последствия для применения адаптационных мер к изменениям климата. Результаты показывают, что применение рекуррентного анализа к климатической системе обеспечивает эффективный подход к анализу динамических систем. Климатические изменения включают в себя не только повышение температуры, но и изменение сложности климата. Таким образом, смотря на прошлые и текущие резкие перемены климата следует уделять больше внимания будущим тенденциям климатических систем.

ВИКОРИСТАННЯ КВАНТОВО-ХІМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ХІМІЧНИХ РЕАКЦІЙ

В.М. Міхєнко

Донбаська національна академія будівництва і архітектури, Краматорськ

Стрімкий розвиток сучасної обчислюваної техніки сприяє розвитку такої галузі науки, як комп'ютерна хімія, в основі якої лежить квантова хімія.

Фундаментальним рівнянням квантової хімії є рівняння Шредингера:

$$\frac{h^2}{8\pi^2 m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) + U \cdot \Psi = E \cdot \Psi \quad (1)$$

m - маса частки; U - потенційна енергія; E - повна енергія; x, y, z – координати у просторі, Ψ^2 - густина ймовірності (визначає розподіл у просторі електрона в атомі).

В залежності від ступеню апроксимації параметрів, в наближеному рішенні рівняння Шредингера для багатоцентрових, багатоелектронних систем квантово-хімічні методи поділяють на емпіричні – всі параметри отримані з експериментальних та спектроскопічних досліджень, напівемпіричні частина параметрів обнулюється, частина параметрів замінюється чисельними величинами з експерименту і частина інтегралів обчислюється, неемпіричні (*ab initio*) – всі інтеграли, які виникають при рішенні алгебраїчних рівнянь Рутаана після нульового диференційного наближення обчислюються. Вибір того чи іншого методу розрахунків залежить від об'єкту дослідження та того, яку інформацію хоче отримати дослідник. На сьогоднішній день хіміки-органіки у своїх дослідженнях все частіше використовують квантово-хімічні методи розрахунків. За допомогою отриманих даних стає можливо моделювання механізмів хімічних реакцій.

Об'єктом дослідження було обрано реакцію нуклеофільного приєднання роданіду калію до хінонімінів, яка перебігає в кислому середовищі.

В результаті реакції N-арил(бензіліден)ацетил- (**1в**, **г**, **д**, **2в**, **г**, **д**) та N-феноксиацетил-1,4-бензохінонмоноімінів (**3в**, **г**, **д**) з роданідом калію отримано циклічні сполуки (**4а-в** – **8а-в**) (схема 1).

1, X = Ph-CH=CH, **2**, X = Ph-CH₂, **3**, R¹=H, R²=Me (в); R²=H, R¹=R³=Me (г); R¹=H, R³=R²=Me (д), **4**, **7**, X = Ph-CH=CH, **5**, **8**, X = Ph-CH₂, R³=H, **6**, X=PhOCH₂, R¹=R²=Me (а); R²=H, R¹=R³=Me (б); R¹=H, R²=R³=Me (в).

Схема 1

Квантово-хімічні розрахунки були проведені за допомогою програми Gaussian 03W [1]. Молекулярна структура досліджуваних сполук розраховувалась в рамках теорії функціоналу щільності, з використанням функціоналу B3LYP [2-7]. Для розрахунків використовувався стандартний базисний набір 6-31+G(d). Вибір базисного набору обумовлений тим, що у складі досліджуваних молекул присутній атом Сульфуру та необхідно було враховувати d-орбіталі. Кон'югаційні та гіперкон'югаційні взаємодії в молекулах досліджувались в рамках теорії натуральних

зв'язуючих орбіталей (NBO - natural bond orbitals) з використанням програми NBO 5.0 [8].

Програма Gaussian була обрана тому, що є зручною для вивчення тих сполук, які неможливо спостерігати в експериментальних умовах, наприклад такі короткоіснуючі частки, як радикали, аніон-радикали, проміжні сполуки та перехідні структури.

При розрахунках молекул в основному та перехідному стані враховувався заряд та мультиплетність молекули, аніону, радикалу чи аніон-радикалу.

Формула для розрахунку мультиплетності:

$$M = 2S + 1 \quad (2)$$

M – мультиплетність, S – сумарний спин молекули.

Вихідні дані молекули (або іншої частки) записуються у файлі з розширенням *****.gif**, результати розрахунків відповідно у файлі *****.out**.

Аналіз даних квантово-хімічних розрахунків енергій усіх можливих інтермедіатів першого акту реакції роданування N-фенілацетил-1,4-бензохінонмоноіміну (**2a**) показав, що найбільш вигідними є напрямки **v** та **d**, при чому енергії систем, які відповідають інтермедіатам **B** та **D**, відрізняються мало (схема 2, рис.1 [2a]). Тобто, у випадку хінонмоноіміну (**2a**) повинні утворюватися продукти приєднання як атомом Сульфуру, так і атомом Нітрогену, що цілком відповідає експерименту (схема 1).

Схема 2

Аналогічні розрахунки, виконані для N-феноксиацетил-1,4-бензохінонмоноіміну (**3a**), показали, що на першому етапі реакції найбільш вигідним є приєднання роданід-аніону атомом Сульфуру з утворенням більш енергетично вигідного інтермедіату **D** порівняно з частками **A**, **B**, **V** та **Г** (рис. 1б), що повністю узгоджується з експериментальними даними – для N-феноксиацетилпохідних (**3**) отримані лише продукти, які утворюються через первинне приєднання роданід-аніону атомом Сульфуру.

Згідно з результатами квантово-хімічних розрахунків, атом Нітрогену роданід-аніону має більший негативний заряд (**-0,575**) та меншу густину локалізації ВЗМО (вищої зайнятої молекулярної орбіталі) (**0,147**), тоді як атом Сульфуру – навпаки, більшу густину локалізації ВЗМО (**0,546**) та менший негативний заряд (**-0,461**). На основі цих даних можна припустити, що утворення інтермедіату (**B**) відбувається при зарядовому контролі, а інтермедіату (**D**) – при орбітальному. Відповідно, низьке значення енергії НВМО хінонмоноімінів (**3**) сприяє орбітальному контролю реакції (утворюються тільки 1,3-бензоксатіол-2-они), а збільшення позитивного заряду на атомі Карбону C^2 хіноїдного циклу хінонмоноімінів (**1**) веде до зростання вкладу зарядового контролю реакції, що, як наслідок, призводить до утворення як 1,3-бензоксатіол-2-онів, так і 1,3-бензоксазол-2-тіонів. Отримані дані цілком підтверджують

висунуте раніше припущення, що при високому значенні енергії НВМО приєднання роданид-аніону відбувається через атом Нітрогену в умовах зарядового контролю, а при низькому – атомом Сульфуру під орбітальним контролем.

а) б)
Рисунок 1 - Відносне зміння енергії перехідних станів реакції N-фенілацетил- (**2a**) (а) та N-феноксиацетил- (**3a**) (б) 1,4-бензохінонмоноімінів з роданидом калію.

Наступними етапами реакції роданування є протонування атому Нітрогену, ароматизація циклу з утворенням відповідного ізотіоціанату або тіоціанату, в результаті подальшої циклізації яких утворюються продукти реакції – сполуки (**4–6**) та (**7–8**) (схема 1) [9,10].

Наявність донорного замісника PhCH=CH біля групи C=O N-бензиліден-1,4-бензохінонмоноімінів приводить до підвищення їх енергії НСМО, що веде до зростання ролі зарядового контролю в реакції з роданидом калію.

Список літературних джерел

1. Frisch M. J. Gaussian 03, revision C.01 / M. J. Frisch, G. W. Trucks, H. B. Schlegel. – Wallingford : Gaussian Inc, CT, 2004.
2. Becke A. D. Density-functional exchange-energy approximation with correct asymptotic behavior / A. D. Becke // Physical review A. – 1988. – Vol. 38, № 6. – P. 3098–3100.
3. Becke A. D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange / A. D. Becke // Journal of Chemical Physics. – 1993. – Vol. 98, № 7. – P. 5648–5653.
4. Lee C. Development of the Colle-Salvetti correlation-energy formula into a functional of the electron density / C. Lee, W. Yang, R. G. Parr // Physical Review B. – 1988. – Vol. 37, № 2. – P. 785–789.
5. Volko S. H. Accurate spin-dependent electron liquid correlation energies for local spin density calculations: a critical analysis / S. H. Volko, L. Wilk, M. Nusair // Canadian Journal of Physics. – 1980. – Vol. 58, № 8. – P. 1200–1211.
6. Hohenberg P. Inhomogeneous Electron Gas / P. Hohenberg, W. Kohn // Physical Review B. – 1964. – Vol. 136, № 3B. – P. 864–871.
7. Parr R. G. Density functional theory of atoms and molecules / R. G. Parr, W. Yang – New York : Oxford University Press, 1989. – 333 p.
8. NBO 5.0 / E. D. Glendening, J. K. Badenhoop, A. E. Reed [et al.] – Madison : Theoretical Chemistry Institute, University of Wisconsin, 2001.
9. Авдеенко А. П. Взаимодействие N-фенил(бензилиден, фенокси)ацетил-1,4-хинониминов с роданидом калия и азидом натрия / А. П. Авдеенко, С. А. Коновалова, В. М. Васильева // Вопросы химии и химической технологии. – 2012. – Вып. 6. – С. 17–22.
10. Авдеенко А. П. Роданирование N-фенил-(бензилиден, фенокси)ацетилзамещенных 1,4-бензохинонмоноиминов / А. П. Авдеенко, С. А. Коновалова, В. М. Васильева, С. А. Гончарова // Журнал органической химии. – 2014. – Т.50. Вы. 11. – С. 1689 – 1693.

**ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ И ИЗДЕЛИЙ
РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Марченко В. Т., Сазина Н. П., Сюткина-Доронина С. В.

Институт технической механики Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины

Предложен метод математического моделирования неопределенности параметров и переменных, которые являются исходными данными для аналитических соотношений в расчетах показателей эффективности новых образцов ракетно-космической техники (РКТ).

Как правило, научно-технические проекты по созданию новых образцов РКТ обладают высоким уровнем технической сложности, имеют высокую стоимость и относительно большую длительность выполнения опытно-конструкторских работ (ОКР). При выполнении технико-экономического обоснования ОКР используются данные по существующим изделиям-аналогам (ретроспективная информация) и прогнозные данные (с глубиной прогноза не менее 10 лет). Уникальность и техническая сложность ракетно-космических систем, большая глубина прогноза являются основными причинами высокого уровня неопределенности исходных данных.

Принятие решения о целесообразности реализации научно-технического проекта на основе технико-экономических показателей, рассчитанных по предполагаемым усредненным данным (без учета фактора неопределенности), может быть ошибочным, т.к. в итоге фактические затраты на реализацию проекта могут быть значительно выше ожидаемых (запланированных), а экономический эффект от применения результатов ОКР – значительно ниже ожидаемого.

По этой причине необходимо проводить расчеты технико-экономических показателей научно-технических проектов с учетом наличия фактора неопределенности. В виду уникальности и сложности ракетно-космических систем моделирование неопределенности исходных данных вероятностно-статистическими методами практически невозможно, а использование субъективной вероятности нежелательно.

Предложенный метод даёт возможность на более качественном уровне выполнить технико-экономическое обоснование будущей ОКР, так как позволяет количественно оценить уровень риска проекта (величину возможного негативного отклонения показателей эффективности от ожидаемых) и меру возможности такого отклонения (вместо вероятности).

Суть метода заключается в следующем.

По результатам предварительной обработки собранной по изделиям-аналогам технико-экономической информации (оценка уровня достоверности, приведение экономических показателей к условиям Украины на момент начала расчетов) группа экспертов определяет граничные значения возможного изменения параметра (интервал $[a, b]$) и граничные значения наиболее возможного значения рассматриваемого параметра (интервал $[c, d]$), где $a < c < d < b$, т.е. формируется нечеткое числовое множество. Для заданного нечеткого множества автоматически (компьютерной программой) строится функция принадлежности $f_{[a,b]}(x)$, которая будет отражать количественную меру возможности того, что переменная P с уровнем правдоподобия (возможности) $f_{[a,b]}(x)$ будет иметь значение $P = X$. В качестве функции $f_{[a,b]}(x)$ предложено использовать производную от бета-функции $B(\alpha, \beta)$ с неизвестными параметрами α и β .

Предложен способ автоматического определения искомых параметров $\alpha(a, b, c, d)$ и $\beta(a, b, c, d)$.

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ β -КАРОТИНА У BLAKESLEA TRISPORA В УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ
Н.Б. Митина¹, И.М. Зубарева², О.И. Ткаля¹

¹Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

²Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, Днепропетровск

Микробиологический β -каротин в условиях промышленного производства получают периодическим культивированием (+) и (-) форм *Blakeslea trispora*. Одним из путей оптимизации этого процесса является внесение мальтозы в питательную среду для выращивания гриба. Мальтоза содержалась как в маточных, так и в ферментационных средах. Результаты исследований показали, что грибу на начальных этапах его развития необходима глюкоза, находящаяся в составе зеленой патоки в более доступном для усвоения состоянии, чем мальтоза. Исследуемый дисахарид, вероятно, требуется продуценту на более поздних стадиях метаболизма, когда завершились в основном ростовые процессы, и в мицелии начинается синтез каротина. Так как эксперимент по замене зеленой патоки на мальтозу, в качестве источника углеродного питания, имел положительный результат, была проведена оптимизация по оптимальному соотношению компонентов питательной среды (кукурузного экстракта и мальтозы). Изучались варианты сред при концентрации кукурузного экстракта - 2,4,6,8 мас.% и мальтозы - 1,3,5,7 мас.%. По полученным данным построена следующая регрессионная модель (рис. 1)

$$A = -194162 + 936329X_1 + 135668X_2 + 688164X_1^2 - 435987X_1X_2 - 849291X_2^2.$$

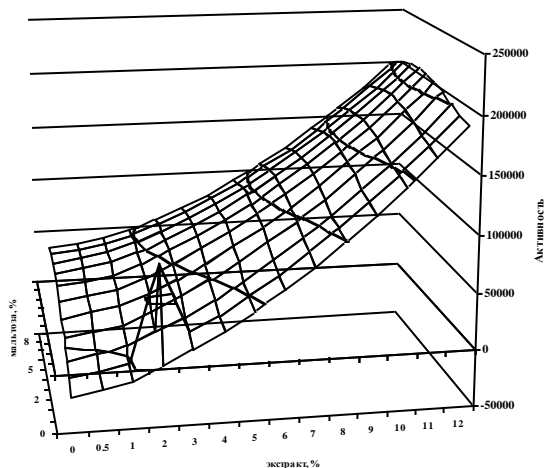


Рисунок 1 – Модель образования β -каротина у *blakeslea trispora* в условиях периодического культивирования

Построенная модель показывает, что в исследованной области оптимальное соотношение экстракта и мальтозы (8% и 6% соответственно) дает ожидаемое среднестатистическое значение активности $A = 129432$. Таким образом, концентрационный оптимум мальтозы и экстракта по максимуму активности гриба следует искать в области более высоких концентраций экстракта (9% и более) и средних концентраций мальтозы (4 – 5%).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА ПРИМЕСЕЙ В ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕМ СЛИТКЕ
Т.Ж. Надрыгайло

Днепродзержинский государственный технический университет, Днепродзержинск

При переходе стали из жидкого состояния в твердое возникает снижение растворимости примесей и образуется химическая неоднородность. Химическая неоднородность стальных слитков и отливок вызвана так называемой избирательной кристаллизацией [1].

Кристаллизующийся расплав – пример среды с фазовыми превращениями. Область затвердевания можно разделить на пять зон [2], различающихся между собой по характеру протекания в них теплофизических процессов: жидкую зону, зону движущихся кристаллов, зону питания, зону вкрапленного расплава, твердую зону. Существенное влияние на процессы формирования структуры слитка и перераспределение в нём примесей оказывает движение кристаллов и примесных фаз в жидкой зоне затвердевающего слитка.

Целью данной работы является математическое и компьютерное моделирование переноса примесей в дендритном каркасе затвердевающего стального слитка. В данной работе на основании одномерной математической модели [3] предложена двумерная модель изучаемого процесса и один из вариантов применения метода расщепления по физическим факторам.

Постановка задачи. Рассматривается слиток цилиндрической формы. Расчетная область представляет собой половину осевого сечения слитка. С боковой поверхности и дна слитка происходит отдача тепла за счет конвективного теплообмена. При кристаллизации слитка происходит перенос примесей. Будем рассматривать существование только одной примесной фазы b .

В основу модели положены следующие уравнения, относящиеся к отдельным зонам затвердевающего слитка:

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = -(\delta_f - \varepsilon) [\Phi_S - \bar{\nabla} \cdot (\zeta \bar{v}_{S1}^c - D_S \bar{\nabla} \zeta)] - (1 - \zeta) \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -(\bar{v} \cdot \bar{\nabla}) \bar{v} + \nu_e \Delta \bar{v} + [\zeta \delta_f + (1 - \zeta) \varepsilon] \bar{g} - \bar{\nabla} \tilde{p}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\bar{\nabla} \cdot [\zeta (\bar{v} + \bar{v}_{S1}^c)] + \bar{\nabla} \cdot (D_S \bar{\nabla} \zeta) + \Phi_S, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \beta_b}{\partial t} = -\bar{\nabla} \cdot (\beta_b \bar{v}_b^c) + \bar{\nabla} \cdot \left[(1 - \zeta) D_b \bar{\nabla} \frac{\beta_b}{(1 - \zeta)} \right] - \frac{k_b \beta_b}{(1 - \zeta)} \Phi_S, \quad (4)$$

$$\bar{v}_{S1}^c = -\frac{d_S^2}{C_{1D} \nu_L} (\varepsilon - \delta_f) \bar{g}, \quad (5)$$

$$\bar{v}_b^c = -\frac{K_b \zeta}{R_b (1 - \zeta) + \nu_L x_b \zeta} \left(\frac{2 - \zeta}{1 - \zeta} \bar{\nabla} \zeta + \zeta \bar{\nabla} \ln \beta_b \right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{C_L (1 - \zeta)}{C} \bar{v}_L \cdot \bar{\nabla} T - \frac{C_S \zeta}{C} \bar{v}_S \cdot \bar{\nabla} T + \\ & + \frac{1}{C} \bar{\nabla} \cdot \{ [\lambda'_L (1 - \zeta) + \lambda'_S \zeta] \bar{\nabla} T \} + \frac{L_e}{C} \Phi_S. \end{aligned} \quad (7)$$

Данные уравнения дополняются граничными условиями: на твердых поверхностях и оси симметрии для перпендикулярных составляющих скорости – условия непротекания; на скорости параллельные поверхности – условие свободного скольжения; для давления на всех границах

задаются граничные условия второго рода; для температуры на оси симметрии и верхней поверхности формы – условие теплоизоляции; на боковой поверхности и дне формы – условие конвективного теплообмена; для примесей и твердой фазы на всех границах – условие непротекания.

Для решения системы (1)–(7) будем использовать метод расщепления по физическим факторам для несолоноидального движения [3]:

$$02 \quad u_{S1}^c = 0; \quad w_{S1}^c = -\frac{d_s^2}{C_{1D} \nu_L} (\varepsilon - \delta_f) g \quad (8)$$

I

$$1,2 \quad \tilde{u} = u^n + \tau \left[-u^n \frac{\partial u^n}{\partial r} - w^n \frac{\partial u^n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_e^r}{r} \frac{\partial (ru^n)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_e^z \frac{\partial u^n}{\partial z} \right) \right], \quad (9)$$

$$\tilde{w} = w^n + \tau \left[-u^n \frac{\partial w^n}{\partial r} - w^n \frac{\partial w^n}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(v_e^r r \frac{\partial w^n}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_e^z \frac{\partial w^n}{\partial z} \right) + [\zeta^n \delta_f + (1 - \zeta^n) \varepsilon^n] g \right], \quad (10)$$

$$1-5 \quad \lambda^m = \lambda'_L (1 - \zeta^n) + \lambda'_S \zeta^n, \quad (11)$$

$$1-5 \quad C^n = C_L (1 - \zeta^n) + C_S \zeta^n, \quad (12)$$

$$1-5 \quad \tilde{T} = T^n + \frac{\tau}{C^n} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda^m \left(\frac{\partial T^n}{\partial r} \right) \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\lambda^m T^n) + L_e \Phi_S^n \right], \quad (13)$$

$$1,2 \quad \tilde{\zeta} = \zeta^n + \tau \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_S \frac{\partial \zeta^n}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_S \frac{\partial \zeta^n}{\partial z} \right) + \Phi_S^n \right], \quad (14)$$

1-3

$$\begin{aligned} \tilde{\beta} = \beta^n + \tau & \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r (1 - \zeta^n) D_b \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\beta^n}{1 - \zeta^n} \right) \right) + \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left((1 - \zeta^n) D_b \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\beta^n}{1 - \zeta^n} \right) \right) - \frac{k_b \beta^n}{(1 - \zeta^n)} \Phi_S^n \right] \end{aligned} \quad (15)$$

II

$$1,2 \quad T^{n+1} = \tilde{T} - \tau \left(u^n \frac{\partial T^n}{\partial r} + w^n \frac{\partial T^n}{\partial z} \right), \quad (16)$$

$$1,2 \quad \zeta^{n+1} = \tilde{\zeta} - \tau \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \zeta^n (u^n + u_{S1}^c) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\zeta^n (w^n + w_{S1}^c) \right) \right], \quad (17)$$

$$3 \quad A^{n+1} = -\frac{k_b \zeta^{n+1}}{R_b (1 - \zeta^{n+1}) + \nu_L x_b \zeta^{n+1}}, \quad (18)$$

$$3 \quad B^{n+1} = \frac{2 - \zeta^{n+1}}{1 - \zeta^{n+1}} \left(\frac{\partial \zeta^{n+1}}{\partial r} + \frac{\partial \zeta^{n+1}}{\partial z} \right), \quad (19)$$

$$1-3 \quad \beta^{n+1,0} = \tilde{\beta}, \quad p^{n+1,0} = p^n, \quad u^{n+1,0} = u^n, \quad w^{n+1,0} = w^n, \quad (20)$$

$$\text{III } 1,2 \quad \tilde{p}^{n+1,k+1} = \tilde{p}^{n+1,k} + \omega \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{p}^{n+1,k}}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \tilde{p}^{n+1,k}}{\partial z^2} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r\tilde{u})}{\partial r} + \frac{\partial \tilde{w}}{\partial z} + \Phi_s^{n+1,k} \right) / \tau \right], \quad (21)$$

IV

$$u_b^{c \ n+1,k} = A^{n+1} \left(B^{n+1} + \zeta^{n+1} \frac{\partial (\ln \beta^{n+1,k})}{\partial r} \right), \quad (22)$$

3

$$w_b^{c \ n+1,k} = A^{n+1} \left(B^{n+1} + \zeta^{n+1} \frac{\partial (\ln \beta^{n+1,k})}{\partial z} \right).$$

$$1-3 \quad \beta^{n+1,k+1} = \tilde{\beta} - \tau \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial (r \beta^{n+1,k} u_b^{c \ n+1,k})}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial (\beta^{n+1,k} w_b^{c \ n+1,k})}{\partial z} \right) \right]. \quad (23)$$

$$u^{n+1} = \tilde{u} - \tau \frac{\partial \tilde{p}^{n+1}}{\partial r}, \quad (24)$$

1,2

$$w^{n+1} = \tilde{w} - \tau \frac{\partial \tilde{p}^{n+1}}{\partial z}.$$

Здесь n – номер временного слоя, k – номер итерации. Слева возле каждой формулы указаны номера зон, в которых эти формулы справедливы: 1 – жидкая зона; 2 – зона движущихся кристаллов; 3 – зона питания; 4 – зона вкрапленного расплава; 5 – твердая зона. Процесс расчета условно разбивается на 4 этапа. Разностная аппроксимация уравнений схемы (8)–(24) и граничных условий к ним получена на равномерной шахматной сетке.

По данной математической модели разработана программа на языке C# в среде Microsoft Visual Studio 2008. С помощью программы получена графическая визуализация процесса затвердевания слитка с учетом переноса примесей. В начальный момент предполагается, что примеси распределены равномерно по всему объему формы. При затвердевании слитка примеси вытесняются в центр слитка. Проведенные численные исследования показали, что место максимальной концентрации примесей зависит от теплофизических параметров, например, коэффициента теплоотдачи α , и от способа задания граничных условий для температуры. На рисунке 1 представлены результаты компьютерной реализации математической модели. Изолиниями показаны распределение концентрации примесей на последнем этапе кристаллизации слитка.

Из рисунка видно, что на дне слитка в направлении к центру постепенно накапливаются примеси, а с боков слитка они исчезают. Остаются только небольшие части. Максимальное значение концентрации примеси располагается в центральной части слитка.

При теплоизоляции дна формы характер распределения примесей иной. Примеси равномерно вытесняются к оси симметрии слитка.

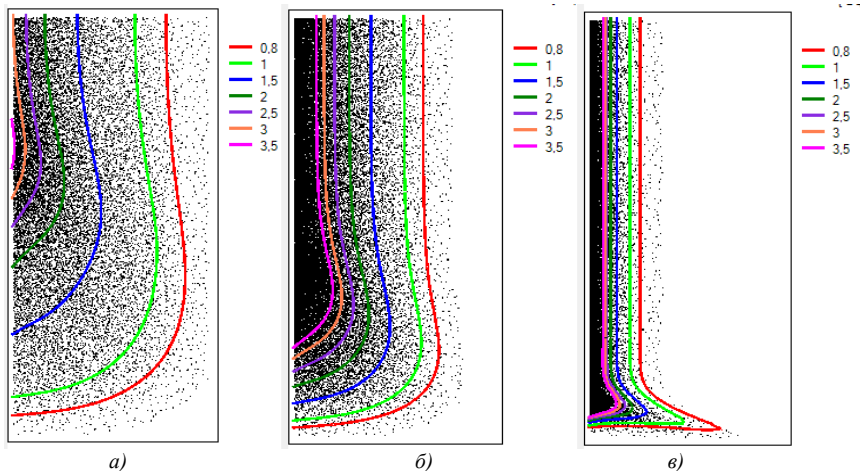


Рисунок 1 — Распределения примесей при значениях коэффициента теплоотдачи:
 $a - \alpha = 0,05$; $б - \alpha = 0,1$; $в - \alpha = 2$

Выводы. В работе рассмотрена неравновесная теория многофазной зоны кристаллизации, учитывающая возможное движение кристаллов и перераспределение примесей. Приведена двумерная математическая модель кристаллизации слитка с учетом переноса примесей в дендритном каркасе. По данной модели разработана программа на языке C# для проведения тестовых расчетов.

Список литературных источников

1. Лейбензон В.А. и др. Затвердевание металлов и металлических композиций. – Киев: Наукова думка, 2009, – 411 с.
2. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. – Ленинград: Машиностроение, 1976, – 216 с.
3. Самохвалов С.Е. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: Теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994, – 172 с.

РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ НАФТОПРОДУКТІВ

С. С. Насонова

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ

Вступ. Більшість відомих моделей експлуатаційного стану нафтових резервуарів, в цілому правильно відбиваючи вплив чинників початкової дефектності та експлуатаційної пошкодженості на міцність, стійкість і герметичність цих споруд, не враховують чинник відновлення і орієнтовані, головним чином, на прогнозування змін технічного стану резервуарних конструкцій до моменту першого відновлення [1].

У статті пропонуються моделі експлуатаційного стану резервуарних конструкцій, які комплексно враховують чинники початкової дефектності, експлуатаційної пошкодженості і відновлення. Усі моделі формуються в термінах випадкових функцій і з урахуванням чинних нормативних документів [2]. Початкова дефектність і експлуатаційна пошкодженість резервуарних конструкцій розглядаються як об'єктивні чинники, властиві монтажу і процесу експлуатації нафтових резервуарів, а відновлення розуміється як контрольований чинник управління експлуатаційним станом цих споруд.

Основний матеріал. При проектуванні в прообраз резервуару закладаються певні запаси міцності, стійкості і герметичності [3]. Після виготовлення і монтажу резервуар, як правило, має ті або інші дефекти, обумовлені недосконалістю існуючих технологій. В процесі експлуатації відбувається фізичний знос резервуарних конструкцій, періодично робляться ремонтно-відновні заходи. Ці чинники початкової дефектності, фізичного зносу і відновлення впливають на формування проектних запасів функціональних якостей резервуару і повинні враховуватися в моделях його експлуатаційного стану.

Початкова дефектність нафтових резервуарів пов'язана в основному з недосконалістю геометричної форми конструктивних елементів, локальними дефектами в зварних швах, використанням в конструктивних елементах сталевих листів з від'ємними допусками на товщину прокату, а також з можливими осіданнями основи. Уся ця початкова недосконалість завжди знижує проектну несучу здатність резервуарів. Фізичний знос проявляється головним чином в розвитку і накопиченні корозійних і втомних ушкоджень і нерівномірних осідань основи, поступово погіршуючи технічний стан резервуару в процесі експлуатації. Корозія далі розглядається як чинник, що змінює переріз конструктивних елементів та їх характеристики міцності. При цьому розрізняється безповоротний корозійний знос, що регламентується залишковою товщиною конструктивних елементів, і локальний корозійний знос, визначуваний глибиною місцевих корозійних ушкоджень. Втомні ушкодження розглядаються в контексті можливого підростання трещиновидних дефектів, гіпотетично наявних в корпусі резервуару. Усунення безповоротного корозійного зносу і втомних ушкоджень вимагає капітальних ремонтів, а усунення локальних корозійних ушкоджень можливе на основі нескладних поточних ремонтів. Виникнення нерівномірних осідань не має прямого зв'язку з часом, але сам по собі цей чинник зустрічається настільки часто, що в прогностичних оцінках їх вплив на несучу здатність резервуару завжди треба враховувати.

Сталевий вертикальний циліндричний резервуар можна розглядати як систему чотирьох основних конструктивних елементів : циліндричної стінки, вузла сполучення стінки з дном (уторного вузла), днища і покрівлі. Міцність резервуару визначається спільною міцністю його циліндричної стінки і уторного вузла. Стійкість резервуару зазвичай розглядається в контексті загальної стійкості циліндричної стінки, а його герметичність обумовлюється герметичністю перелічених вище конструктивних елементів.

Циліндрична стінка резервуару, що знаходиться в експлуатації, повинна відповідати вимогам міцності, стійкості і герметичності. Міцність стінки обумовлюється міцністю усіх її поясів. Тому умова міцності цього конструктивного елементу в процесі експлуатації можна записати у вигляді наступної системи нерівностей

$$\eta_i \xi_{1i}(t) \xi_{2i}(t) \xi_{3i}(t) R_{yi} \delta_{i0} - p_i r \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

де η_i – поправка, яка враховує можливе зниження проектної несучої здатності і-го поясу внаслідок його початкової дефектності;

$\xi_{1i}(t)$ – поправка, яка враховує можливу зміну проектної несучої здатності і-го поясу в результаті корозійного зносу;

$\xi_{2i}(t)$ – поправка, що враховує можливу зміну міцнісних властивостей і-го поясу внаслідок його ушкоджень корозією;

$\xi_{3i}(t)$ – поправка, що враховує можливу зміну проектної несучої здатності і-го поясу внаслідок втомних ушкоджень, що виникають під впливом циклічного заповнення резервуару нафтопродуктом.

Герметичність циліндричної стінки резервуару обумовлюється герметичністю її поясів, а можливе порушення герметичності пов'язане, як правило, з корозійним зносом у вигляді появи наскрізних пір в зварних швах. Усунення таких ушкоджень не пов'язане з повним відновленням і здійснюється на основі поточних ремонтів. Умову герметичності стінки приблизно можна записати у вигляді наступної системи нерівностей

$$\delta_{i0} - v_i(t) - \Delta_i^- \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де $V_i(t)$ – поправка, яка визначається глибиною локальних корозійних ушкоджень i -го поясу, що утворилися за час t ;

Δ_i^- – величина від'ємного допуску на товщину листового прокату, який використовується при виготовленні i -го поясу.

Упродовж усього терміну служби нафтових резервуарів у рамках діючої системи технічного обслуговування і ремонтів робиться періодичне відновлення працездатності їх сталевих конструкцій. У моделях експлуатаційного стану резервуарних конструкцій що обставину можна врахувати за допомогою належної корекції наведених вище поправок, що відбивають вплив чинника експлуатаційної пошкоджуваності на їх працездатність [4].

Висновки. Запропоновані моделі (1)-(2) дозволяють дати кількісну оцінку комплексного впливу чинників початкової дефектності, експлуатаційної пошкоджуваності і відновлення на міцність і герметичність нафтових резервуарів. Усі моделі сформульовані в термінах випадкових функцій, а їх параметри можуть коригуватися за даними натурних обстежень, що підвищує точність прогнозу у кожному окремому випадку. У результаті розглянуті моделі можуть використовуватися як прогнозні моделі на стадії проектування резервуарів і як моделі управління надійністю в процесі експлуатації цих споруд.

Список літературних джерел

1. Егоров Е.А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации [Текст]: монография / Е.А. Егоров. – Днепропетровск: Навчальна книга – 2002. – 95с.

2. Правила технічної експлуатації резервуарів та інструкції по їх ремонту. Доповнення та зміни. – К.: Укрнафтопродукт – 1997. – 297с.

3. СНиП 11-23-81. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП Госстроя СССР – 1990. – 96с.

4. Семенец С.Н. Оценка фактора восстановления нефтяных резервуаров в процессе эксплуатации / С.Н. Семенец, С.С. Насонова // Інформаційні технології в освіті, науці та управлінні. Збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, ПДАБА – 2015. – С.72-78.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕЧІЇ ГАЗУ КРИЗЬ ТОРЦЕВІ СТИКИ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИ ПРУЖНОМУ КОНТАКТІ МІКРОНЕРІВНОСТЕЙ

І.І. Начовний¹, І.М. Кузяєв, Ів.І. Начовний²

¹ Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ

² Національний гірничий університет, Дніпропетровськ

У поршневих компресорах широко застосовуються сальникові ущільнення для герметизації місця виходу штока з циліндра. Сальникові ущільнення являють собою багатокамерні конструкції (рисунок 1). У кожній камері 4 знаходяться ущільнювальні елементи, які складаються з плоских (у більшості випадків) замикаючого 1, ущільнювального 2 та захисного 3 кілець. Працюють такі елементи за принципом самоущільнення, тобто тиск робочого середовища притискає елементи до штока.

Плоскі ущільнювальні елементи в сучасних компресорах виготовляють з полімерних матеріалів і шерсткість їх поверхонь становить не нижче Ra 0,63 мкм. Як відомо [1], для полімерних матеріалів деформації мікроступів для типових навантажень носять пружний характер, що не приймається до уваги при визначенні параметрів стиків, через які відбувається виток газу.

Для конструкції, згідно з рисунком 1, можливими шляхами витoku газу будуть: стик між штоком та ущільнювальним елементом $M_{шт}$, стик між торцевими поверхнями замикаючого та ущільнювального кілець M_p , стик між торцевими поверхнями ущільнювального й захисного кілець $M_{зп}$ та стик між торцевими поверхнями захисного кілець і сусідньої камери $M_{зк}$. Усі ці

стики утворено шорсткостями контактуючих поверхонь. Таким чином, у загальному випадку сумарна масова витрата газу через ущільнювальний елемент складе

$$M = M_{шт} + M_{зу} + M_{уз} + M_{жк} . \quad (1)$$

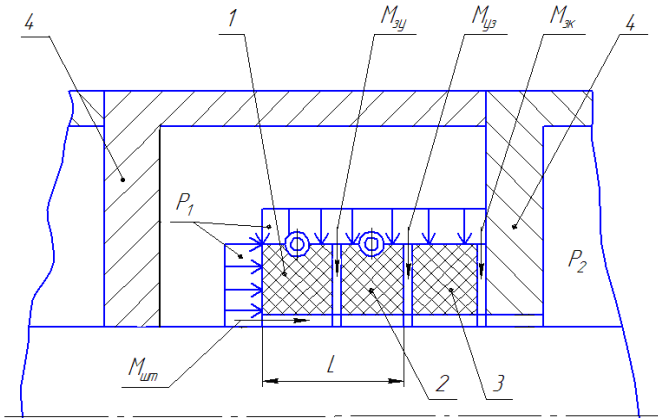


Рисунок 1 – Розрахункова схема сальникового ущільнення

Задачею роботи є визначення складових частин $M_{шт}$, $M_{зу}$ і $M_{жк}$.

Розглядаємо стики контактуючих поверхонь як пористе тіло, утворене шорсткостями, а процес витoku газу крізь стик як процес фільтрації.

Під дією тиску газу пакет стискається в осьовому напрямку, утворюючи зони контакту. Одночасно газ проникає через мікроканали у зону контакту й разом з пружною силою мікронерівностей намагається розкрити стик. При цьому приймаємо, що висота стикy на вході газу відповідає умові – під дією тиску в стикy висота мікронерівностей повністю відновлюється. Таким чином, у зв'язку з тим, що тиск уздовж довжини зони контакту змінюється, утворюється пористий стик із змінними по довжині висотою і коефіцієнтом проникності. На виході газу висота стикy визначається зусиллям стиснення кілець.

Приймаємо наступні припущення: процес течії сталий одномірний; силами інерції нехтуємо; процес течії ізотермічний; висота стикy, коефіцієнт проникності й в'язкість газу лінійно змінюється по довжині контакту від тиску; рух газу в стикy ламінарний.

На рисунку 2 приведено схему до виведення рівняння нерозривності.

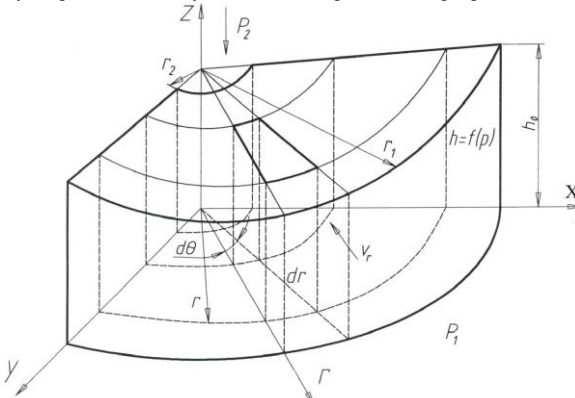


Рисунок 2 – Схема до виведення рівняння нерозривності

Система рівнянь, яка описує процес течії газу між ущільнювальними кільцями, запишеться у вигляді:

– рівняння нерозривності

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d(\rho \cdot r \cdot h \cdot V_r)}{dr} = 0; \quad (2)$$

– рівняння руху

$$V_r = \frac{k(p)}{\mu(p)} \cdot \frac{dP}{dr}; \quad (3)$$

– рівняння стану

$$\frac{P}{\rho} = R_T T; \quad (4)$$

– висота стику

$$h = h_0 \cdot [1 - a \cdot (P_1 - P)]; \quad (5)$$

– коефіцієнт проникності

$$k = k_0 \cdot [1 - b \cdot (P_1 - P)]; \quad (6)$$

– коефіцієнт динамічної в'язкості

$$\mu = \mu_0 \cdot [1 - c \cdot (P_1 - P)]. \quad (7)$$

У рівняннях (2) – (7) входять такі величини: r – поточний радіус; ρ – густина; k – коефіцієнт проникності; P – поточний тиск; R_T – газова постійна; h_0 , k_0 , μ_0 – значення висоти стику, коефіцієнтів проникності й динамічної в'язкості на вході в стик відповідно; a , b , c – характеристичні коефіцієнти; P_1 – тиск на вході в стик.

Провівши необхідні перетворення отримуємо наступне рівняння

$$\frac{d^2 P}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dP}{dr} + (A + B - C + D) \cdot \left(\frac{dP}{dr} \right)^2 = 0, \quad (8)$$

з граничними умовами

$$\begin{aligned} P &= P_1 \quad \text{при} \quad r = r_1; \\ P &= P_2 \quad \text{при} \quad r = r_2. \end{aligned}$$

У рівнянні (8) коефіцієнти А, В, С визначаються за формулами

$$A = \frac{a}{1 - a \cdot (P_1 - P)}; \quad B = \frac{b}{1 - b \cdot (P_1 - P)}; \quad C = \frac{c}{1 - c \cdot (P_1 - P)}; \quad D = \frac{1}{P}. \quad (9)$$

Рівняння (8) описує процес течії газу крізь торцеві зони контакту кілець при врахуванні стискування газу, змінення висоти стику та коефіцієнту проникності внаслідок пружного характеру контактування мікронерівностей взаємно контактуючих деталей і дозволяє дослідити вплив окремих параметрів на характер змінення тиску та його градієнта по довжині зони контакту в напрямку течії газу.

Розв'язання рівняння (8) відносно розподілу і градієнта тиску по довжині зони контакту для різних видів середовищ здійснювалось за допомогою математичного пакету MathCAD.

Знання градієнта тиску дозволяє розрахувати величину витoku газу за формулою

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot h \cdot \frac{k}{\mu} \cdot \frac{dP}{dr}, \quad (10)$$

де h , k , μ , $\frac{dP}{dr}$, – значення параметрів на виході.

Існують декілька різних умов розв'язання рівняння (8), а саме:

– рідина нестислива: $\rho = const$, $h = const$, $k = const$, $\mu = \mu_0 \cdot [1 - c \cdot (P_1 - P)]$

$$\frac{d^2P}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dP}{dr} - C \cdot \left(\frac{dP}{dr}\right)^2 = 0; \quad (11)$$

– рідина нестислива: $\rho = const, \mu = const, h = h_0 \cdot [1 - a \cdot (P_1 - P)],$
 $k = k_0 \cdot [1 - b \cdot (P_1 - P)]$

$$\frac{d^2P}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dP}{dr} + (A + B) \cdot \left(\frac{dP}{dr}\right)^2 = 0; \quad (12)$$

– ідеальний газ ($P \leq 10$ МПа): $\rho = \frac{P}{R_r \cdot T}; \mu = const, h = const, k = const$

$$\frac{d^2P}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dP}{dr} + D \cdot \left(\frac{dP}{dr}\right)^2 = 0; \quad (13)$$

– ідеальний газ ($P \leq 10$ МПа): $\rho = \frac{P}{R_r \cdot T}; h = h_0 \cdot [1 - a \cdot (P_1 - P)];$

$k = k_0 \cdot [1 - b \cdot (P_1 - P)]; \mu = \mu_0 \cdot [1 - c \cdot (P_1 - P)]$

$$\frac{d^2P}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dP}{dr} + (A + B - C + D) \cdot \left(\frac{dP}{dr}\right)^2 = 0. \quad (14)$$

Висновки. Розроблено математичну модель течії газу крізь стики при пружному контакті мікронерівностей стосовно сальникових ущільнень поршневих компресорів, яка дозволяє оптимізувати технологічні й конструктивні параметри ущільнювальних систем.

Список літературних джерел

1. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин [Текст] / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

ОБОБЩЕННАЯ ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ОБЪЕМЕ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА ФЕРРОСПЛАВНОЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ В.И. Нежурин, В.Ю. Куваев, М.Ю. Каряка

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

Введение. Опыт эксплуатации ферросплавных электропечей (ФП) показывает, что поддержание оптимального шихтового, электродного и электрического режимов конкретного технологического процесса является основой достижения максимальной технико-экономической эффективности выплавки сплава.

Решение этой задачи обеспечивается выбором оптимальных параметров ванны печи, печного контура и поддержанием рационального электрического режима плавки, что создает требуемое, с точки зрения термодинамики, распределение энергии, вводимой в рабочее пространство ванны печи.

Данные о распределении активной мощности, плотности тока, потенциалов и температур в объеме рабочего пространства ванны получены в результате инструментальных исследований действующих печей [1, 2], что дало возможность сформировать картину строения рабочего пространства ванны печи при выплавке разных сплавов и решить ряд задач по оптимизации их выплавки. Результаты исследований позволили разработать обобщенную схему замещения электрической цепи ФП, что обеспечило возможность эффективного управления электрическим и технологическим режимами работы печи с использованием АСУ ТП [2].

Однако громоздкость и трудоемкость методов инструментального исследования ванны

действующих печей не позволяет оценить ожидаемое распределение энергии в проектируемых или реконструируемых ФП.

Известен ряд математических моделей распределения энергии в объеме ванны, позволяющих прогнозировать его для осваиваемых и проектируемых электропечей.

Авторами была сделана попытка решения задачи разработки обобщенной осесимметричной математической модели распределения плотности тока в сечении самообжигающегося электрода и удельной активной мощности в объеме рабочего пространства ванны ФП по методу вторичных источников в форме интегральных уравнений Фредгольма II рода с привлечением экспериментальных данных действующих печей [3].

Цель работы. Преимущество метода вторичных источников состоит в возможности построения эффективных численных алгоритмов расчета полей, ориентированных на применение современной вычислительной техники и пригодных для неоднородных сред и сложных форм границ раздела сред, характерных для ФП. Предложенная методика моделирования распределения энергии в ванне печи позволяет полностью решать задачи проектирования, реконструкции и рациональной эксплуатации шлаковых ферросплавных электропечей.

Материал и результаты исследований. Структура реакционной зоны рабочего пространства круглой трехэлектродной ФП, выплавляющей силикомарганец, модель которой была разработана, симметрична оси каждого электрода. Исходя из условий осевой симметрии, рассматривалось радиальное сечение самообжигающегося электрода и реакционной зоны с подводом тока через сверхпроводящий контакт электрода, находящегося в неоднородной среде, и отводом через сверхпроводящую ванну сплава.

При построении модели принимались следующие допущения:

1. Ванна круглая с тремя круглыми симметрично расположенными электродами.
2. Объем шихтовых материалов ванны состоит из реакционной зоны с проводимостями γ_5 и γ_6 , и объема шихты с проводимостями γ_3 и γ_4 .
3. Жидкий расплав (поверхность S_5) и поверхности S_1, S_2, S_3, S_4 сверхпроводящие ($\gamma = \infty$).

4. Электроды состоят из двух зон с проводимостями γ_1 и γ_2 .

5. Дуговой разряд не учитывался, поскольку технологический процесс выплавки силикомарганца является шлаковым; жидкий токопроводящий шлак шунтирует дуговой промежуток, вследствие чего на долю дугового разряда приходится, как известно, не более 10 % энергии, выделяемой в ванне печи.

6. Правая цилиндрическая система координат имеет начало в центре ванны на уровне колошника.

7. Ввиду незначительного влияния поверхностного эффекта влияние магнитного поля не учитывалось.

С учетом принятых допущений и условий разработанная модель представлена на рис. 1а.

Алгоритм расчета поля плотности тока и удельной активной мощности следующий:

1. Рассчитывается распределение вторичных источников на поверхности раздела сред с разной проводимостью $\gamma_1 - \gamma_6$.

2. По распределению вторичных источников рассчитывается напряженность поля в выбранных точках сечения электрода и рабочего пространства ванны печи.

3. Рассчитывается плотность тока (\vec{j}_i) и удельная активная мощность (p_i) в выбранных точках рабочего пространства ванны печи $\vec{j} = \gamma_i \vec{E}_i$ и $p_i = \gamma_i E_i^2$, где E_i - напряженность электрического поля в i -той точке объема.

На рисунке 1б представлены результаты математического моделирования распределения энергии в рабочем пространстве ванны круглой силикомарганцевой печи типа РКГ-75 со

следующими параметрами: активная составляющая тока электрода $I_{a3}=100$ кА; диаметр ванны печи $D_n=12600$ мм; высота шихтовых материалов $H_n=3500$ мм; диаметр распада электродов $D_p=5600$ мм; диаметр электрода $D_s=2000$ мм, полусферическая форма торца электрода и глубина его погружения в ванну печи 1 м, а также кривые распределения плотности тока в сечении электрода и линии равной удельной активной мощности в рабочем пространстве в предположении, что мощность сосредоточена в центре выбранных элементарных площадок радиального сечения ванны по оси ванны и электрода.

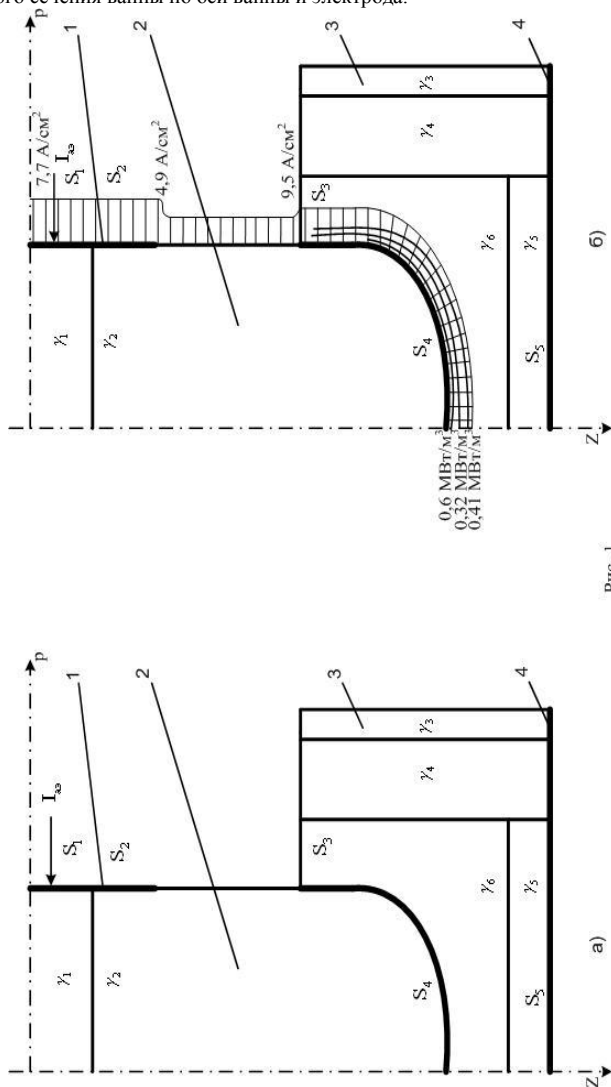


Рис. 1
 а - расчетная математическая модель распределения мощности в ванне ФП
 б - математическая модель распределения энергии в ванне печи РКГ-75
 (1 - кольцо электрододержателя, 2 - самообжигающийся электрод,
 3- рабочее пространство печи с зонами неоднородности, 4 - сплав (силикомартанец)

Результаты моделирования проверены на адекватность на электролитической ванне печи РКГ-75, где выполнялось соотношение проводимостей зон неоднородности и геометрии ванны в соответствие с критериями теории подобия. Потенциалы точек объема ванны измерялись

методом двойного зонда, после чего рассчитывалась активная мощность в каждом элементарном объеме ванны.

Анализ полученных результатов показывает, что значение удельных активных мощностей в выделенных точках, полученные расчетным и экспериментальным путем и представленные в относительных единицах, совпадают с инженерной точностью.

Выводы. Практическое использование предлагаемой модели возможно при расчете параметров проектируемой или реконструируемой ферросплавной печи и выглядит следующим образом:

1. Определение основных электрических и геометрических параметров печи с помощью известных инженерных методов расчета.

2. Расчет с помощью математической модели проектируемой печи для выявления оптимальной геометрии ванны, распределения мощности в объеме ванны печи и нахождение оптимального значения диаметра распада и глубины погружения электродов. Критерием оптимальности служат известные соотношения рудной электротермии [4].

3. Уточнение предварительных проектных геометрических параметров ферросплавной печи на основе результатов моделирования.

Для действующих ФП предлагаемая модель может быть использована для совершенствования системы управления технологическим процессом выплавки ферросплавов в случае непрерывного контроля распределения энергии в ванне печи для различных значений посадки электродов.

Список литературных источников

1. Карманов Э.С. Исследование скорости и характера схода шихтовых материалов при выплавке марганцевых сплавов в закрытых руднотермических электропечах / Э.С. Карманов, В.И. Нежурин // Сталь, 1991. - № 7. – С. 37-40.

2. Кузьменко С.Н. Определение параметров и характеристик элементов схем замещения ванн рудовосстановительных электропечей / С.Н. Кузьменко, А.В. Николенко //Сталь, 2005. - N12 - С. 35-38.

3. Ольдзиевский С.А. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электротермии / С.А. Ольдзиевский, В.А. Кравченко, В.И. Нежурин, И.А. Борисенко // – М. – Metallurgia. – 1990. – 112 с.

4. Струнский Б.М. Руднотермические плавильные печи // – Л. – Metallurgia. – 1972. – 368 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОРРОЗИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ШАРНИРНО-СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Л.В. Новикова

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Шарнирно-стержневые конструкции (ШСК) широко используются в различных отраслях промышленности, что обуславливает повышенные требования к их надёжности и долговечности. Часто такие конструкции эксплуатируются в условиях контакта с агрессивными технологическими средами (АС), которые вызывают коррозию поверхностного слоя металла, изменение начальных геометрических размеров и, как следствие, снижение несущей способности. В общем случае механические напряжения существенно влияют на скорость коррозионного процесса, что усложняет задачу моделирования поведения конструкции в АС.

Для исследования процессов коррозионного деформирования ШСК, изготовленных из стандартных профилей, установления закономерностей и прогнозирования их поведения, обоснованного назначения геометрических параметров при проектировании необходимо наличие математической модели процесса деформирования конструкции в агрессивной среде и эффективных методов, алгоритмов и программных средств её реализации, позволяющих получить результат с заданной точностью.

Математическая модель процесса коррозионного деформирования конструкции состоит из двух групп уравнений: системы уравнений механики и системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс изменения геометрических параметров конструкции во времени. Размерность СДУ обусловлена расчётной схемой конструкции. В частности, для шарнирно-стержневых конструкций, она соответствует количеству элементов. Скорость коррозии является функцией напряжений, которая не имеет аналитического представления и задается в виде алгоритма. Таким образом, СДУ может быть решена только численно. Погрешность получаемого решения зависит от многих факторов, в том числе – параметров вычислительных алгоритмов и геометрических характеристик сечений. Последние во многом будут определяться принятыми моделями корродирующих сечений, что определяет актуальность построения таких модели.

Модель корродирующего сечения должна адекватно описывать процесс изменения площади, периметра и момента инерции сечения во времени и быть удобной в использовании. В работе предлагается методика построения математических моделей корродирующих сечений элементов ШСК, изготовленных из стандартных прокатных профилей (двутавр, швеллер, уголок).

Для анализа поведения таких ШСК в [1] были использованы модели сечений, которые представлялись в виде совокупности прямоугольных фрагментов (модель (А)). К их преимуществам следует отнести небольшое количество параметров (не более четырёх) и удобство вычисления геометрических характеристик. Недостатком является то, что, при внешнем подобии с реальными, модельные профили не учитывают радиусы закругления и углы наклона полок. Вследствие этого при непосредственном переносе размеров реального профиля на модельный, значения некоторых параметров сечений будут отличаться уже в начальный момент времени (от 11% до 25% для различных типоразмеров). Из этого следует, что погрешность расчётов заложена на начальном этапе вычислений.

Уточнённая модель сечения (модель (В)) представляет собой совокупность треугольных фрагментов [2] и описывается семью параметрами. В этом случае обеспечивается практически точное соответствие характеристик модельного сечения с реальным. С другой стороны определение геометрических характеристик требует реализации громоздких вычислительных алгоритмов.

Автором предложена методика определения вектора параметров \bar{X} для модели сечения (А) таким образом, чтобы процесс коррозии в нём протекал так же, как в сечении, описываемом моделью (В) с заданным вектором параметров \bar{y} .

Параметры сечения \bar{x} предлагается определять из условия равенства периметров, площадей и минимальных моментов инерции в начальный момент времени и производных по времени двух последних характеристик. Таким образом, имеет место задача идентификации модели (А) по параметрам \bar{X} . Задача формулировалась, как задача безусловной оптимизации и решалась методом случайного поиска.

Предложенная методика позволяет применять при решении прикладных задач более удобную модель (А) при обеспечении той же точности вычислений, что и при использовании модели (В).

Поведение конструкции исследуется путём решения задачи Коши для систем дифференциальных уравнений, описывающих процесс коррозии в её элементах. В связи с этим становится актуальной проблема создания новых надёжных и эффективных вычислительных алгоритмов решения таких систем, позволяющих проводить расчёты с заданной гарантированной точностью. Решение данной проблемы может быть достигнуто, путём создания обоснованных методик и процедур определения параметров численных методов, которые обеспечивали бы достижение требуемой точности вычислений при минимальных вычислительных затратах.

Предлагается описание нейросетевого алгоритма выбора рациональных значений параметров численного решения СДУ, то есть таких значений, при которых решение может быть получено с заданной точностью при минимальных вычислительных затратах.

Точность численного решения СДУ зависит от величины шага интегрирования, а также алгоритма его изменения в процессе решения задачи. Решение задачи предполагает определение

такого наименьшего количества точек разбиения интервала, чтобы погрешность численно-аналитического алгоритма не превышала предельно допустимого значения.

Для определения рациональных параметров решения СДУ предлагается использовать нейронные сети с целочисленными функциями активации для выходного элемента.

Выход из строя отдельного элемента конструкции может определяться ограничениями по прочности, сплошности сечения и устойчивости. В первых двух случаях на точность решения СДУ будут оказывать влияние площадь и периметр сечения, величина начального напряжения σ_0 и скорость коррозии v_0 . В последнем случае важными факторами являются также минимальный момент инерции сечения и длина элемента, которая определяет величину критического напряжения потери устойчивости σ_0^* . С учётом вышесказанного для решения поставленной задачи использовались ИНС с разным количеством входных и скрытых элементов (рис. 1).

Так как размеры сечений регламентируются стандартами, то в качестве входного параметра ИНС принимается нормализованное значение типоразмера профиля, а их конкретные значения определяются, как элементы строк соответствующих каждому профилю матриц. Для каждого из типов сечений (двутавр, швеллер, уголок) момент инерции определяется с использованием различных формул и моделей корродирующих сечений, приведенных в [1].

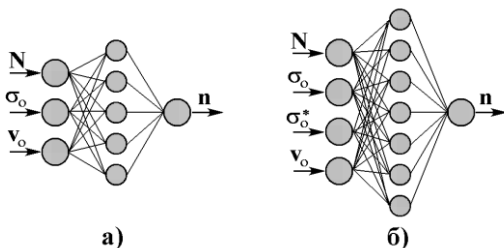


Рисунок 1 - Архитектура ИНС для растянутых (а) и сжатых (б) элементов

В качестве функции активации скрытого слоя использовалась сигмоидальная функция. Для выходного элемента принималась кусочно-непрерывная функция. Необходимое число образцов N для обучения сети определялось на основании рекомендаций, приведенных в [3, 4].

Для обучения сети был применён вещественный генетический алгоритм [5]. Применительно к данной задаче генетический алгоритм использовался для минимизации (по коэффициентам матриц весов) функции средней ошибки сети.

Результатом обучения ИНС является набор матриц весовых коэффициентов, полученные для разных типов профилей и обеспечивающих разную точность решения СДУ.

Схема решения задачи с использованием нейросетевого алгоритма приведена на рис. 2.

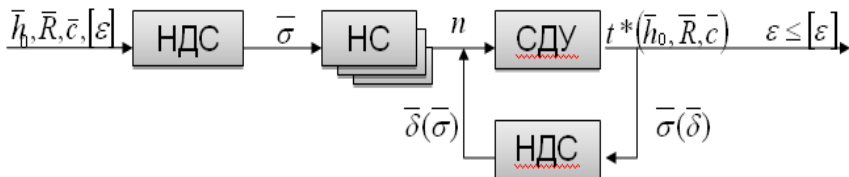


Рисунок 2 - Схема решения задачи

Для иллюстрации возможностей нейросетевого алгоритма была решена задача определения долговечности статически неопределимой шарнирно-стержневой конструкции. Для определения погрешности использовалось эталонное значение долговечности конструкции, которое определялось с помощью численно-аналитического алгоритма при последовательном

увеличении количества шагов интегрирования. Нейронная сеть обучалась для предельно-допустимого значения погрешности $\varepsilon^* = 0,05$. Погрешность численно-аналитического решения, полученного при восьми итерациях, составила $\varepsilon = 0,0449$.

Выводы. Приведенные результаты численного эксперимента подтверждают высокую эффективность предложенного численно-аналитического метода решения СДУ, описывающих коррозионный процесс, и нейросетевого алгоритма определения его параметров. Предложенный подход к моделированию коррозионных процессов, в отличие от известных, позволяет получать решения с заданной точностью. Разработанные процедуры могут использоваться при создании информационных систем для расчетов корродирующих конструкций.

Список литературных источников

1. Зеленцов Д.Г. Информационное обеспечение расчетов корродирующих объектов. Математические модели и концепция проектирования системы [Текст] / Д.Г. Зеленцов, О.А. Ляшенко, Н.Ю. Науменко – Днепропетровск: УГХТУ, 2012. – 264 с.
2. Мясенков В.И. Расчет составных оболочечных конструкций на ЭВМ [Текст] / В.И. Мясенков, И.В. Григорьев – М.: Машиностроение, 1981. – 111 с.
3. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский // М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
4. Калан Р. Основные концепции нейронных сетей. / Роберт Калан; пер с англ. А.Г. Сивак. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 287 с.
5. Емельянов В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. М. Курейчик, В. В. Курейчик // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБОЛОЧЕК НУЛЕВОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ В.И. Олевский¹, Ю.Б. Олевская²

¹Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

²Национальный горный университет, Днепропетровск

Наиболее широким классом оболочек, используемых в машиностроении и строительстве, является класс оболочек нулевой гауссовой кривизны. Постоянный интерес исследователей к задаче деформирования оболочек нулевой гауссовой кривизны не привел к настоящему времени к ее корректному решению. Поэтому сегодня возникает необходимость применения новых схем экспериментальных исследований, позволяющих рассмотреть задачу в усложненной постановке, наиболее адекватной реальному поведению конструкций.

При решении современных задач разработки и совершенствования тонкостенных элементов машин, работающих в условиях интенсивного технологического процесса, перспективным является использование метода голографической интерферометрии [1-5]. Он позволяет провести наиболее точное и полное исследование оболочечных конструкций при сложном напряженно-деформированном состоянии. Точность расшифровки голографических интерферограмм в основном определяется количеством опорных точек поверхности конструкции, используемых для построения полей перемещений и напряжений. Повышение точности требует большого объема рутинной подготовительной работы по вводу координат точек и соответствующих им порядков полос при обработке данных на компьютере, что особенно существенно при проведении эксперимента. Существующие методы автоматизированного ввода и обработки интерферограмм [3] рассчитаны, как правило, на конкретные конфигурации оптической схемы и типы деформированного состояния (плоского, одномерного и т.д.), что затрудняет их использование в рассматриваемом случае. Кроме того, предлагаемые рядом авторов методики расшифровки [1, 3, 4] не учитывают в полной мере статистического характера вводимых данных. Для цилиндрических оболочек была предложена методика автоматизированной обработки результатов голографического исследования, которая устраняет указанные недостатки [5]. Предлагается развитие этой методики для изучения перемещений оболочечных конструкций нулевой гауссовой кривизны, базирующееся на современных средствах интерактивной обработки данных.

Поверхность нулевой гауссовой кривизны можно с достаточной точностью аппроксимировать системой плоских прямоугольных панелей, боковыми сторонами которых являются отрезки близких по положению образующих. Для определения всех компонент вектора перемещений точек конструкции используется трехголограммная схема интерферометра, основанная на одном опорном пучке. Схема интерферометра показана на рис.1.

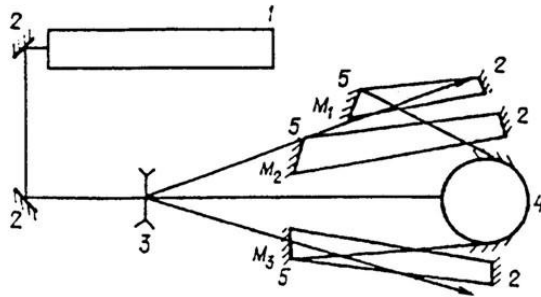


Рисунок 1 – Схема интерферометра. 1 - лазерный генератор, 2 – зеркала, 3 – расширяющая линза, 4 – изучаемый объект, 5 – фотопластины

После регистрации двух экспозиций - при ненагруженном и нагруженном состоянии объекта - получают плоские изображения интерференционной картины, соответствующие наблюдению из точек $M_i(x_{ni}, y_{ni}, z_{ni})$, $i = \overline{1,3}$. Ввод линий порядка с помощью компьютера осуществляется следующим образом. Полученные фотографии интерферограмм сканируются и заносятся в память компьютера в виде графических файлов с расширением, например, jpg, являющимся самым популярным вариантом сжатия графической информации на всех платформах, или в виде файлов другого формата. Далее файл воспроизводится на экране в специально созданном окне на панели обработки изображения. Снятие информации производится путем последовательного нажатия клавиши мыши на соответствующих точках изображения по запросу специально созданной СУБД. Алгоритм дальнейшей обработки полученных данных в основном изложен в [5]. В системе координат $X'O'Y'$ (рис.2), связанной с панелью обработки изображений, задается базовая точка $M_B(x'_B, y'_B)$ и отрезок

оси OY системы координат XOY , направление которой совпадает с направлением проекции вертикальной оси. Дальнейшие вычисления производятся в системе XOY , для чего введенные координаты точек линий равного порядка преобразуются по формулам

$$x = x' \cos \varphi + y' \sin \varphi - x_B, \quad y = y' \cos \varphi - x' \sin \varphi - y_B,$$

где φ - угол поворота системы XO относительно $X'O'Y'$,

$$x_B = x'_B \cos \varphi + y'_B \sin \varphi, \quad y_B = -x'_B \sin \varphi + y'_B \cos \varphi$$

При вычислении физических координат используется упоминавшаяся аппроксимация поверхности оболочки системой складок (рис.2). В этом случае физические координаты точки $M(r, z, \theta)$, расположенной в i -той складке ($i = \overline{1, n}$), определяются по формулам

$$\theta = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} (x - x_{i-1}) + \theta_{i-1},$$

$$z = z_1 + \frac{y - \left[y_{2,i-1} + (y_{2,i} - y_{2,i-1})(x - x_{2,i-1}) / (x_{2,i} - x_{2,i-1}) \right]}{y_{1,i} - y_{2,i}} (z_2 - z_1),$$

где r, θ, z - координаты точки в цилиндрической системе координат, связанной с осью оболочки, форма поверхности аналитически задается уравнением $r = r(\theta, z)$, r_i, θ_j, z_k - физические координаты угловых точек рассматриваемой складки, $(x_{1,i}; y_{1,i}), (x_{2,i}; y_{2,i})$ - координаты угловых точек проекции складки в системе XOY (рис.2).

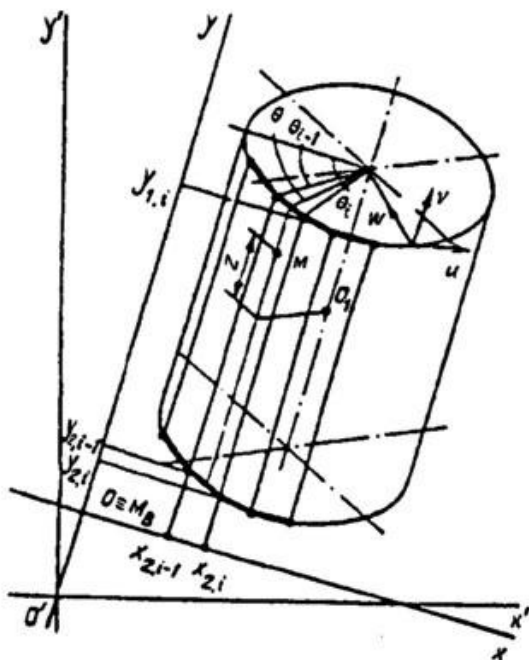


Рисунок 2 – Схема приближения поверхности системой складок

Полученные таким образом массивы координат точек линий равного порядка, соответствующие трем некомпланарным направлениям наблюдения, позволяют аппроксимировать поверхности порядков полос. Наиболее приемлемым для этого представляется метод структурно-экстраполяционного анализа (МСЭА) [6] с пошаговым выбором наилучшей модели. Действительно, формализация ввода исходных данных при неоднородном напряженно-деформированном состоянии требует ввода большого числа точек.

Вышеописанная методика позволяет определять координаты точек центров полос с точностью до 0,1 мм [3] без каких-либо дополнительных приспособлений, что дает возможность существенно увеличить число вводимых точек (до 200-400 на каждое направление наблюдения). Метод позволяет формализовать процесс выбора оптимального порядка аппроксимирующего полинома на основе оценки значимости коэффициентов модели и адекватности ее исходным данным. Отметим, что в данном случае число точек значительно больше числа определяемых

параметров, что позволяет говорить о значительной мощности используемых статистических критериев (Стьюдента, Фишера, Дурбина-Ватсона) и обоснованности принимаемых гипотез при выборе наилучшей модели. С увеличением числа точек характеристики регрессионной модели улучшаются; возникающая при этом возможность потери точности при суммировании может быть успешно преодолена на основе стандартизации данных по известным методикам [7, 8].

Поскольку форма поверхности аналитически задается уравнением $r = r(\theta, z)$, то можно получить двумерные регрессионные модели порядков полос для i -того направления наблюдения в виде

$$N_i = \sum_{j=0}^{n(i)} \sum_{k=0}^{n(j)} b_{jki} \theta^j z^k.$$

Определение перемещений производится по известным формулам [4].

Дальнейшее преобразование перемещений в соответствии с соотношениями Коши и уравнениями состояния среды позволяет получить также напряженное состояние в точке. Производя вычисление параметров напряженно-деформированного состояния для образующих и направляющих оболочки с определенным шагом, можно получить данные для построения графиков распределения перемещений и напряжений.

Предложенный алгоритм был использован для изучения перемещений чана дешламатора МД-9А. Была разработана и изготовлена экспериментальная установка, которая представляла собой нагружающее устройство винтового типа и силоизмеритель (рис. 3а).

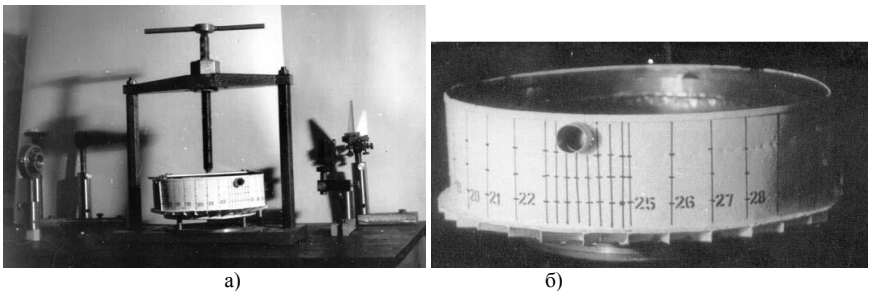


Рисунок 3 – Экспериментальная установка (а) и модель чана (б)

Она позволяла воссоздать усилия, действующие на несущие конструкции дешламатора вследствие тяжести механизма вращения граблей и технологического моста. Соответствующая ей модель (рис. 3б) имитировала в выбранном масштабе 1: 40 жесткостные характеристики чана, днища, силового набора и условия опирания реальной конструкции.

В эксперименте варьировалось соотношение осевой T и гидростатической q нагрузок. Максимальная величина гидростатического давления q определялась уровнем воды в чане H , измеренным от плоскости сочленения цилиндрической и конической частей. Для фиксации изображения использовались фотопластинки марки ВР-Л. Эксперимент проводился в отраженных лучах. Пример автоматизированного ввода приведен на рис 4.

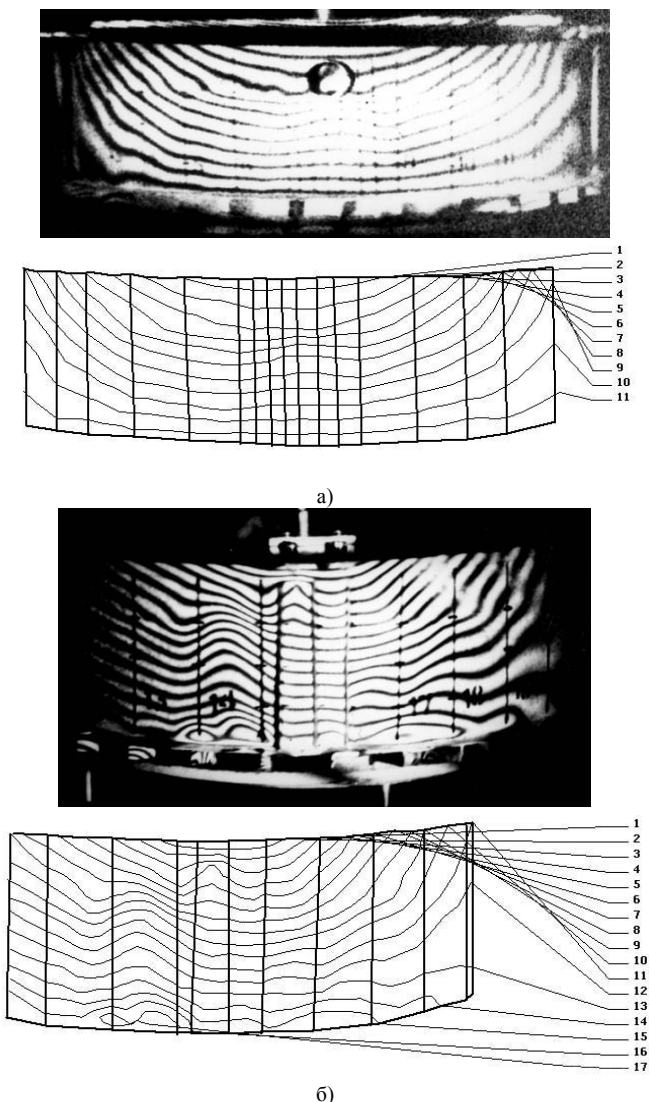


Рисунок 4 – Результаты автоматизированного ввода интерферограмм со стороны патрубка (а) и зоны опоры моста (б).

Анализ полученных полей радиальных перемещений (рис. 5-8) позволяет сделать следующие выводы.

Во всех исследуемых случаях поле прогибов оболочки чана неосесимметрично и неоднородно как в осевом (L), так и в окружном (A, B, C) направлениях. Хорошо видно упругое взаимодействие цилиндрической оболочки с радиальным силовым набором нижней части чана, со стрингерами в зоне опирания моста, с отверстиями для слива и со сливным желобом.

Для случая чистого осевого сжатия (рис. 5) поле радиальных перемещений чана W можно разделить на пять подобластей: две области прогиба от центра, локализованные у патрубков, две области прогиба от центра, расположенные в зоне опоры моста и зона влияния упругой заделки у нижней границы чана.

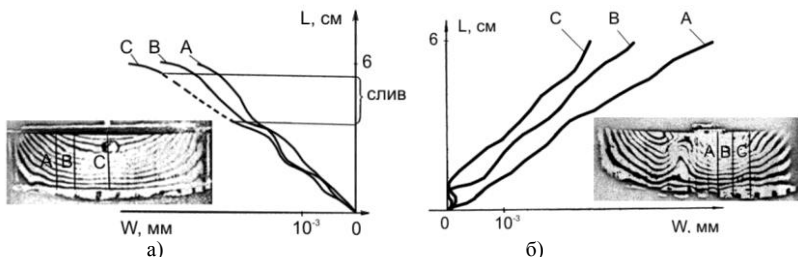


Рисунок 5 – Прогибы при осевом сжатии в зоне патрубка (а) и опоры моста (б).

При действии гидростатического внутреннего давления (рис. 6) оболочка чана вплоть до уровня жидкости деформируется как ансамбль панелей, размеры которых определяются силовым набором нижней части.

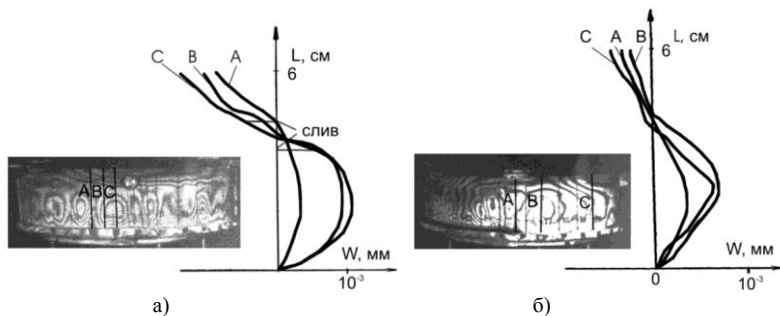


Рисунок 6 – Прогибы при гидростатическом внутреннем давлении в зоне патрубка (а) и опоры моста (б).

Анализ полей перемещений показывает, что расчет прочности чана дешламатора должен производиться по уточненным моделям, учитывающим неоднородность поля перемещений и локальные эффекты подкрепляющего набора. Такой расчет позволит оптимизировать расположение силового набора и уточнить потребную толщину стенки чана, что позволит создать менее материалоемкую и одновременно более надежную и долговечную конструкцию.

Список литературных источников

1. Вест Ч. Голографическая интерферометрия// М.: Мир, 1982. -504 с.
2. Моссаковский В.И., Мильцын А.М., Олевский В.И. Деформирование и устойчивость технологически несовершенных цилиндрических оболочек при неоднородном напряженном состоянии // Проблемы прочности. – 1990. - N12. - С.28-32.
3. Кудрин А.Б., Бахтин В.Г. Прикладная голография (исследование процессов деформации металлов)// М.: Металлургия, 1988. - 248 с.
4. Козачок А.Г. Голографические методы исследования в экспериментальной механике// М.: Машиностроение, 1984. - 176 с.
5. Моссаковский В.И., Мильцын А.М., Селиванов Ю.М., Олевский В.И. К вопросу автоматизации обработки результатов голографического эксперимента // Проблемы прочности.–

1994. – N 5. – С.78-85.

6. Пилов П.И., Мильцын А.М., Олевский В.И. Многофакторный структурно-экстраполяционный анализ в задачах управления эффективностью обогащительных процессов// Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 36(77)-37(78). – С. 204 – 217.

7. Филаретов Г.Ф. К вопросу о построении нелинейной регрессионной модели по данным пассивного эксперимента/ В кн.: Проблемы планирования эксперимента// М.: Наука, 1969. - с. 5 - 10.

8. Пилов П.И., Мильцын А.М., Олевский В.И. Нелинейный анализ эффективности обогащения и прочности тонкостенных элементов машин на основе стандартизованных многофакторных моделей // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 39(80). – С. 202 – 214.

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ В ФОТОАПАРАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ **Д.О. Півторак**

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», Київ

Вступ. В сучасних цифрових фотокамерах з метою зниження втрат інформації, які викликані невідповідністю динамічного діапазону вхідного сигналу (інтервал яскравості об'єкту фотографування) динамічному діапазону реєстратора зображення, широко використовується попередня фільтрація оптичного сигналу. Функції найпростіших фільтрів виконують експонетричні пристрої, які забезпечують подавлення низьких просторових частот зображення, в основному, які не несуть корисної інформації. При зйомці в умовах великого інтервалу яскравостей в межах кадру, експонетричні пристрої повинні забезпечувати керування експозиції кожної елементарної ділянки кадру, тобто, забезпечити локальне керування експозицією.

Відомі експонетричні пристрої з локальним керуванням експозицією умовно поділяються на мультиплікативні, адитивні та комбіновані [1, 2, 3].

Розробка фізико-математичної моделі процесу формування зображення в фотоапаратах при використанні комбінованого способу. Під цифровою фотографічною системою розуміється сукупність всіх елементів, розташованих між об'єктом фотографування і його зображенням та які беруть участь у його передачі [2].

Денні фотоапарати відносяться до пасивних іконічних систем і мають справу з некогерентним власним і відбитим випромінюванням об'єкта фотографування. Вхідним сигналом для них є оптичне поле, яке визначається просторовим (за трьома координатами

x, y, z), спектральним (за довжинами хвиль λ) і часовим (t) розподілом його амплітуди A , фази φ та кута ϕ , який визначається площиною поляризації випромінювання

$$A, \varphi, \phi(x, y, z, t).$$

У фотографічних системах усі інформаційні параметри не реєструються з наступних причин:

1. Через некогерентність природного сонячного випромінювання (при денній зйомці) та випромінювання штучних джерел (наприклад, імпульсних ламп), які використовуються при нічному фотографуванні, не можуть бути зареєстровані фазові зміни оптичного поля.

2. Через неселективну реакцію світлочутливого сенсору на зміну площини поляризації падаючого оптичного випромінювання не може бути зареєстровано поточне значення кута поляризації випромінювання.

3. У більшості випадків технічної зйомки (наприклад, аерофотозйомка), фотографування здійснюється з відстаней (висот), які значно перевищують розмір об'єктів в поздовжньому напрямку, тому найчастіше можна знехтувати розподілом інформаційного параметра за координатою z .

4. Залежність інформаційного параметра $L(t)$ звичайно не встигає істотно проявитися за малий час спостереження (визначається часом експонування світлочутливого шару фотосенсору), що дозволяє знехтувати і часовим розподілом $L(t)$.

5. В роботі розглядається монохромний сенсор (чорно-біла плівка), або сенсор, який працює у широкому діапазоні довжин хвиль (наприклад, видима або ближня ІЧ-область). У зв'язку з цим можна знехтувати розподілом інформаційного параметра за вісью λ , розглядаючи тільки інтегральні оптичні характеристики.

Виходячи з цього, вхідний сигнал фотографічної системи в роботі розглядається тільки у вигляді двовірного статичного поля яскравості $L(x, y)$.

Комбінований спосіб реєстрації зображень з великим інтервалом яскравості може бути реалізований на основі використання різних технічних рішень, наприклад, за допомогою фотоапарата, що має частотно-вибірковий фільтр, керований за допомогою додаткового оптико-електронного каналу [6], або за допомогою цифрового фотоапарата, з встановленими перед світлочутливими елементами мікролінзами із змінним коефіцієнтом пропускання [7].

Розглянута в роботі фізико-математична модель процесу формування зображення у фотоапаратах, що використовують комбінований спосіб реєстрації зображень, і що мають оптичний елемент з фотохромного матеріалу, на якому за допомогою додаткового оптико-електронного каналу будеться частотно-вибірочна фільтр-маска, показана на рис. 1. Світловий потік, що несе інформацію про просторовий розподіл яскравості об'єкту фотографування, спотворений атмосферою і частотно-обмежений світлофільтром, пройшовши через об'єктиви фотоапарата і оптико-електронного каналу, створює частково розфокусоване зображення на чутливій площадці сенсора оптико-електронного каналу і, у разі відкритого затвора - у площині світлочутливого сенсора апарату.

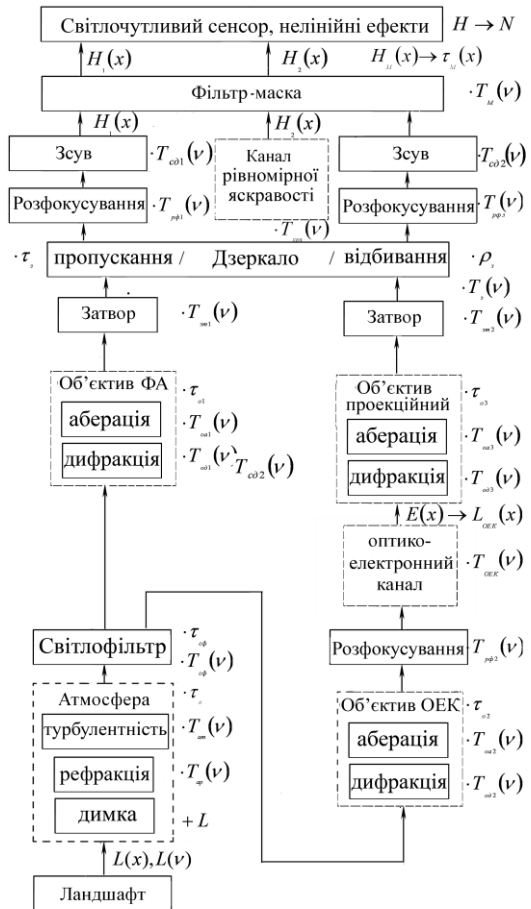


Рисунок – Фізико-математична модель процесу формування зображення в фотоапаратах, який використовує комбінований спосіб реєстрації зображення

На екрані оптико-електронного каналу з'являється розподіл яскравості, аналогічне розподілу яскравості об'єкта фотографування, але яке знаходиться в спектральній зоні чутливості фотохромного елементу. Даний розподіл за допомогою проєкційного об'єктива, відбившись від діхроїчного дзеркала, проєкується на оптичну пластину, що має лінійну залежність оптичної щільності від експозиції, створюючи на ній розподіл освітленості.

У результаті фізико-хімічних реакцій, на оптичній пластині з'являється розподіл коефіцієнта пропускання, аналогічного негативного розподілу освітленості на поверхні світлочутливого сенсору, створюваного об'єктивом фотоапарата. Після чого через побудовану маску на світлочутливий шар світлочутливого сенсору в будь-якій послідовності експонують зображення об'єкта фотографування сформоване об'єктивом та зображення рівномірної яскравості. У результаті цього в світлочутливому шарі світлочутливого сенсору з'являється розподіл діючих експозицій [4, 5].

Висновок. Запропоновано фізико-математична модель процесу формування зображення у фотоапаратах, які використовують комбінований спосіб реєстрації зображень з великим інтервалом яскравості.

Список літературних джерел

1. Колобродов В.Г. Комбінований спосіб реєстрації зображення об'єкта з широким динамічним діапазоном яскравостей / В.Г. Колобродов, Д.О. Півторак // Наукові вісті НТУУ «КПІ»: зб. ст. / Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2009. – №4. – С. 97-101.
2. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации / Х. Фризер. – М.: Мир, 1978. – 672 с.
3. Ллойд Дж. М. Системы тепловидения: Пер. с англ. / Дж. М. Ллойд. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
4. Куштин И.Ф. Рефракция световых лучей в атмосфере / И.Ф. Куштин. – М.: Недра, 1971. – 129 с.
5. Марр Д. Зрение. Информационный подход изучения представления и обработки зрительных образов / Д. Марр. – Москва: Радио и связь, 1987. – 400 с.
6. Пат. 87415 України, МПК G03 7/08. Спосіб фотозйомки й пристрій для його здійснення / В.Г. Колобродов, Д.О. Півторак, С.В. Пудрій, Ю.К. Ребрин; заявник та патентовласник «НПІП КиАТОН». – №а200805221; заявл. 22.04.2008; опубл. 10.07.2009, Бюл. №13.
7. Пат. 107113 України, МПК G03 7/08. Світлочутливий сенсор цифрової камери та спосіб формування HDR-зображення / В.Г. Колобродов, Д.О. Півторак; заявник та патентовласник В.Г. Колобродов, Д.О. Півторак. – №а201214983; заявл. 27.12.2012; опубл. 10.04.2014, Бюл. №7.

ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗОБРАЖЕННЯ У ФОТОАПАРАТАХ ПРИ ВИКОРИСТАННІ КОМБІНОВАНОГО СПОСОБУ

Д.А. Півторак

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», Київ

Попередня просторово-частотна обробка реєстрованого оптичного сигналу широко застосовується в сучасних цифрових камерах, що працюють в умовах широкого діапазону яскравостей об'єкта фотографування. Функції найпростіших фільтрів при цьому виконують експонетричні пристрої, що забезпечують подавлення низьких просторових частот зображення, в основному, які не несуть корисної інформації. При зйомці в умовах великого інтервалу яскравостей в межах кадру, експонетричні пристрої повинні забезпечувати управління експозицією кожної елементарної ділянки кадру, тобто, забезпечувати локальне управління експозицією.

Відомі експонетричні пристрою з локальним управлінням експозицією умовно діляться на мультиплікативні, адитивні і комбіновані. Кожен вид експонетричних пристроїв з локальним управлінням експозицією мають переваги і недоліки, які визначають можливість їх застосування в конкретних умовах цифрової відео-, фотозйомки [1].

Використання мультиплікативного методу призводить до енергетичних втрат в оптичному каналі, що потребує корекції регулюючих експозицій параметрів. Збільшення світлочутливості веде до зростання шумів, а збільшення ефективної витримки до появи зсуву при зйомці з рухливих носіїв. Використання ж адитивного методу дає можливість зменшити ефективну витримку затвора, але призводить до зниження контрасту дрібних зображень. Тому викликає інтерес можливість одночасного використання і мультиплікативного, і адитивного методу в одному фотоапараті (комбінований спосіб локального управління експозиції) [1].

Для визначення параметрів комбінованого способу локального управління експозиції необхідно розробити просторово-частотну модель процесу ресстрації зображення.

Просторово-частотна модель процесу формування зображення у фотоапаратах, оснащених експонетричними системами з локальним управлінням експозицією, що використовують комбінований спосіб просторової фільтрації зображення, може бути розроблена на основі просторово-частотної моделі процесу формування зображення в фотографічних системах, розглянутих в [2].

Формування зображення на фотографічній системі, оснащеної експонетричним пристроєм локального управління експозицією, припускають процес проходження інформаційного сигналу від елемента розділення до площини світлочутливого сенсора.

У роботі розглянута просторово-частотна модель процесу формування зображення в цифрових фотокамерах, що використовують комбінований спосіб локального управління експозиції. Аналіз моделі показує, що експонетрична система локального управління експозицією безпосередньо впливає на процес формування зображення, змінюючи свою модуляційну передатну функцію, і опосередковано, змінюючи параметри, що входять у вирази для модуляційних передавальних функцій більшості ланок, які приймають участь у формуванні даного зображення.

Список літературних джерел.

1. Колобродов В.Г. Комбінований спосіб ресстрації зображення об'єкта з широким динамічним діапазоном яскравостей / В.Г. Колобродов, Д.О. Півторак // Наукові вісті НТУУ «КПІ»: зб. ст. / Нац. техн. ун-т України «КПІ». – Київ, 2009. – №4. – С. 97-101.

2. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов / Ю.К. Ребрин. – Киев: КВВАИУ, 1988. – 450 с.

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНТРОПИЙНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ **В.А. Подольская, А.И. Федорович**

Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, Днепропетровск

Трудность обработки измерений при контроле многопараметрических объектов состоит в том, что не известны статистические закономерности многомерных законов распределения вероятностей, информативность их параметров. Для преодоления этих трудностей необходимо преобразовать без потери информации многомерные выборки измерений в одномерные.

Для этого можно использовать энтропийные преобразования. Энтропия – математическое ожидание логарифма законов распределения вероятностей случайных процессов и служит для оценки их информативности. Ее изменение характеризует различие выборок измерений и может использоваться для распознавания и оценки состояния объекта по экспериментальным данным.

Рассматривались модели двух объектов с различными математическими ожиданиями, дисперсиями и корреляционными связями и нормальными распределениями измерений трех параметров. Энтропия измерений одномерной выборки случайных независимых нормальных параметров оценивается по формуле

$$L_n(x) = \ln\left(\sqrt{2\pi D}\right) + \frac{(x-a)^2}{2D}, \quad (1)$$

где a и D - математическое ожидание и дисперсия измеряемого параметра.

Для двух измерений статистически зависимых нормальных параметров формула энтропийных преобразований запишется в виде

$$L(x_1x_2) = \ln\left(2\pi\sqrt{D_1D_2(1-r^2)}\right) + \frac{1}{2(1-r^2)} \times$$

$$\times \left[\frac{(x_1 - a_1)^2}{\sqrt{D_1}} - \frac{2r(x_1 - a_1)(x_2 - a_2)}{\sqrt{D_1D_2}} + \frac{(x_2 - a_2)^2}{\sqrt{D_2}} \right]. \quad (2)$$

где r коэффициент корреляции измерений x_1, x_2 .

Для трех параметрических выборок энтропию можно оценить тремя способами

$$L(x_1x_2x_3) = L(x_1) + L(x_2x_3), \quad (3)$$

$$L(x_1x_2x_3) = L(x_2) + L(x_1x_3), \quad (4)$$

$$L(x_1x_2x_3) = L(x_3) + L(x_1x_2). \quad (5)$$

Таким образом, многопараметрические выборки измерений преобразуются в однопараметрические.

На основе обработки этих преобразований и статистического анализа представляется возможность подготовить визуально-аналитические данные для поддержки принятия решений о дефектности контролируемых объектов.

Эффективность таких преобразований можно проверить путём проведения вычислительных экспериментов на модели двух объектов контроля с заданными параметрами.

В результате проведения вычислительного эксперимента были оценены гистограмм энтропийных преобразователей и влияния на преобразование изменения коэффициента корреляции исходных данных. Использовались программы формирования выборок коррелированных двумерных нормальных случайных величин. По выборкам трёхмерных нормальных случайных величин $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$ путем проведения вычислительных экспериментов исследованы статистические закономерности преобразований $L_1(x_1, x_2, x_3), L_2(x_1, x_2, x_3)$ и $L_3(x_1, x_2, x_3)$ оценены их математические ожидания и дисперсии, построены гистограммы.

Для этих исследований была разработана компьютерная модель состоящая из блока формирования выборок случайных величин $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$; блока преобразования в выборки $L_1(x_1, x_2, x_3), L_2(x_1, x_2, x_3), L_3(x_1, x_2, x_3)$ и блока статистического анализа $L_1(x_1, x_2, x_3), L_2(x_1, x_2, x_3)$ и $L_3(x_1, x_2, x_3)$.

На рисунках 1-4 представлены гистограммы энтропийных преобразований в состоянии нормы (рис.1а, рис.2а, рис.3а, рис.4а) и брака (рис.1б, рис.2б, рис.3б, рис.4б) при различных коэффициентах корреляции.

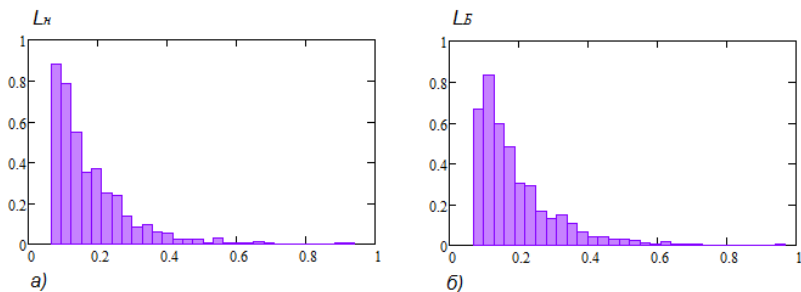


Рисунок 1 – Гистограммы энтропийных преобразований а) в состоянии нормы и б) в состоянии брака при значениях коэффициента корреляции $r_{12}=0.9, r_{13}=0.8, r_{23}=0.7$;

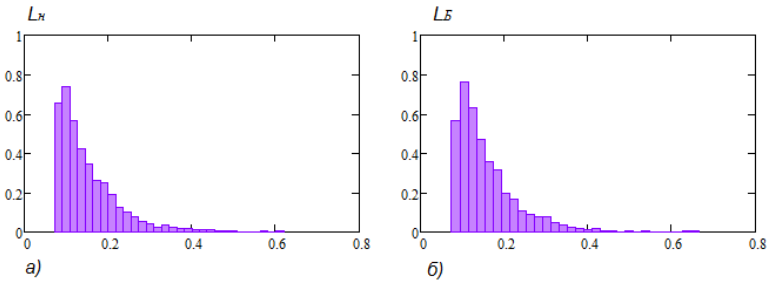


Рисунок 2 – Гистограммы энтропийных преобразований а) в состоянии нормы и б) в состоянии брака при значениях коэффициента корреляции $r_{12}=0.8$, $r_{13}=0.7$, $r_{23}=0.6$;

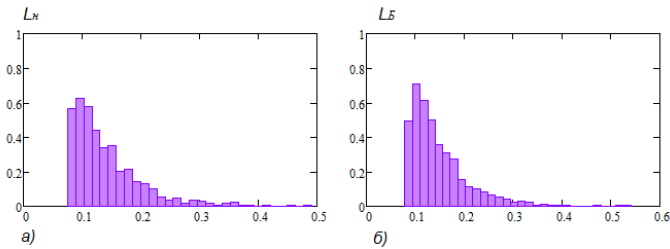


Рисунок 3 – Гистограммы энтропийных преобразований а) в состоянии нормы и б) в состоянии брака при значениях коэффициента корреляции $r_{12}=0.7$, $r_{13}=0.6$, $r_{23}=0.5$;

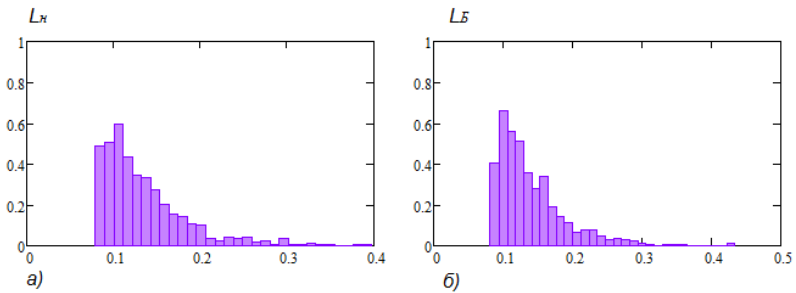


Рисунок 4 – Гистограммы энтропийных преобразований а) в состоянии нормы и б) в состоянии брака при значениях коэффициента корреляции $r_{12}=0.6$, $r_{13}=0.4$, $r_{23}=0.3$;

Результаты исследования влияния изменения коэффициента корреляции на статистические закономерности энтропийного преобразования можно представить в виде таблиц.

Таблица 1 – Статистические закономерности энтропийного преобразования для состояния нормы

$r_{12}=0.9$, $r_{23}=0.7$	$r_{13}=0.8$	$r_{12}=0.8$, $r_{23}=0.6$	$r_{13}=0.7$	$r_{12}=0.7$, $r_{23}=0.5$	$r_{13}=0.6$	$r_{12}=0.6$, $r_{23}=0.3$	$r_{13}=0.4$
\bar{L}	$\sqrt{D^*}$	\bar{L}	$\sqrt{D^*}$	\bar{L}	$\sqrt{D^*}$	\bar{L}	$\sqrt{D^*}$
5.426	4.655	4.5	3.12	4,222	2,525	4,033	2,083

Таблица 2 – Статистические закономерности энтропийного преобразования для состояния брака

$r_{12}=0.9,$ $r_{23}=0.7$	$r_{13}=0.8,$	$r_{12}=0.8,$ $r_{23}=0.3$	$r_{13}=0.7,$	$r_{12}=0.7,$ $r_{23}=0.5$	$r_{13}=0.6,$	$r_{12}=0.6,$ $r_{23}=0.3$	$r_{13}=0.4,$
\bar{L}	$\sqrt{D^*}$	\bar{L}	$\sqrt{D^*}$	\bar{L}	$\sqrt{D^*}$	\bar{L}	$\sqrt{D^*}$
5.623	4.717	4.729	3.131	4.41	2.523	4.203	2.082

Из данных таблиц и рисунков следует, что изменение коэффициента корреляции приводит к изменениям статистических закономерностей энтропийных преобразований. Можем сказать, что изменение корреляционных связей между параметрами может повлиять на принятие решения о его состоянии.

РАЗРАБОТКА НЕЛИНЕЙНЫХ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВ НЕАТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

С.Б. Приходько, А.А. Луценко

Национальный университет кораблестроения, им.адмирала Макарова, Николаев

Современные неатомные подводные лодки (НАПЛ) – сложные дорогостоящие сооружения с достаточно длительными сроками проектирования, строительства и службы. Длительные сроки проектирования и строительства НАПЛ (около 10 лет в случае нового проекта) требуют корректности основных исходных данных – тактико-технических характеристик (ТТХ), определяющих их качества. Ошибка в оценке требуемых проектных характеристик по сравнению с общемировыми может вызвать увеличение как стоимости, так и сроков проектирования и строительства. Также при этом весьма вероятно получение корабля с низкой боевой эффективностью [1]. Соответствие ТТХ мировым показателям на момент вступления в строй – важнейшая задача всего цикла проектирования и строительства.

В классической схеме проектирования на этапе формирования требуемых тактико-технических характеристик, проверка их адекватности может быть успешно решена путем использования результатов анализа статистических данных [2]. Так же, результаты анализа ТТХ, вошедшим в состав флотов мира проектам НАПЛ имеют прикладное значение в прогнозировании тенденций изменения ТТХ, оценке боевого потенциала, в разработке имитационных динамических моделей функционирования флота, определения приоритетных направлений научных исследований и инженерных проектно-конструкторских проработок. Анализ статистических данных позволяет выявлять в их составе сомнительные значения, которые в силу ряда причин присутствуют в открытой литературе по военной технике [2]. Многочисленные графики и диаграммы тенденций развития ТТХ, приводимые в открытой научно-технической и учебной литературе [1, 3-5] и отражающие статистические данные проектов подводных лодок (ПЛ), носят лишь информативный характер, как правило без разработки соответствующих регрессионных моделей.

В связи с вышеизложенным задача разработки нелинейных регрессионных моделей динамики изменения качеств НАПЛ является актуальной.

На сегодняшний день для построения нелинейных регрессионных моделей известны три метода: метод простого перебора, метод линеаризирующих преобразований и метод нормализующих преобразований. Метод простого перебора требует первоначального задания разных видов уравнения регрессии и выбора наилучшего приближения из них без наличия четкого алгоритма такого задания. Это требует большого количества вычислений и не всегда приводит к получению наилучшего уравнения. Метод линеаризирующих преобразований также не решает проблему поиска наилучшего приближения, а лишь позволяет в некоторых случаях перейти от нелинейной к линейной модели. И только метод нормализующих преобразований имеет четкий алгоритм построения нелинейного уравнения регрессии без применения простого перебора. Суть этого метода заключается в следующем. Сначала осуществляется нормализация

данных: данные с негауссовским распределением с помощью нормализующих преобразований превращают в данные имеющие гауссовское распределение. Далее по нормализованным данным строят линейное уравнение регрессии. И наконец, подставив в линейное уравнение те нормализующие преобразования, которые были использованы при нормализации данных, получают нелинейное уравнение регрессии. Заметим, что применение нормализующих преобразований также позволяет для нелинейной регрессии строить доверительные интервалы и интервалы предсказания, которые дают возможность проверить данные на наличие аномальных значений [6]. Поэтому для построения нелинейных регрессионных моделей лучше применять метод на основе нормализующих преобразований.

Важнейшими ТТХ проектов НАПЛ, для которых в работе осуществлялось построение регрессионных моделей, являются водоизмещение, максимальная длина, скорость максимального подводного хода, рабочая глубина погружения, автономность, максимальная дальность хода под водой, дальность хода под РДП (работа дизеля под водой), число торпедных аппаратов, запас единиц боезапаса (торпед, ракет), число членов экипажа. В целях получения достоверного результата анализа собраны данные по 80-ти проектам НАПЛ вступившие в строй с 1950 года и по настоящее время [3, 7, 8], включая перспективные проекты с планируемым вводом в строй в 2020 году. Заметим, что данные по всем рассмотренным ТТХ имели негауссовский закон распределения.

В работе для построения нелинейных регрессионных моделей в качестве нормализующего преобразования было выбрано преобразование Джонсона семейства S_B , которое для негауссовской случайной величины x имеет вид

$$z_x = \gamma_x + \eta_x \ln \left(\frac{x - \varphi_x}{\lambda_x + \varphi_x - x} \right). \quad (1)$$

На основе (1) в работе была получена следующая нелинейная регрессионная модель:

$$y = \frac{e^{c_1(\lambda_y + \varphi_y) + \varphi_y}}{1 + e^{c_1}}, \quad (2)$$

где: $c_1 = (b_1 \cdot z_x + b_0 - \gamma_y) / \eta_y$; γ_y , η_y , φ_y , λ_y – параметры преобразования Джонсона семьи S_B , для случайной величины y ; b_0 и b_1 – коэффициенты линейного уравнения регрессии для нормализованных данных

$$z_y = b_1 z_x + b_0. \quad (3)$$

(1- α)% доверительный интервал нелинейного уравнения регрессии построен с использованием преобразования (1), регрессионной модели (3) и t -распределения Стьюдента и определяется зависимостью

$$[\bar{y}] = \frac{e^{k_1(\lambda_y + \varphi_y) + \varphi_y}}{1 + e^{k_1}}, \quad (4)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{1}{\eta_y} \cdot \left(b_1 \cdot z_x + b_0 - \gamma_y \pm t_{(\alpha/2, n-2)} \cdot S_{z_y} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(z_x - \bar{z}_x)^2}{\sum_{i=1}^n (z_{xi} - \bar{z}_x)^2}} \right); \quad t_{(\alpha/2, n-2)} - \text{квантиль } t -$$

распределения Стьюдента с уровнем значимости $\alpha/2$ и числом степеней свободы $n-2$; S_{z_y} – выборочное среднеквадратичное отклонение значений случайной величины z_y .

Границы интервала предсказания нелинейной регрессии строятся на основе [6] с использованием преобразования (1) и регрессионной модели (3) и определяются как

$$[y] = \frac{e^{k_2(\lambda_y + \varphi_y) + \varphi_y}}{1 + e^{k_2}}, \quad (5)$$

$$\text{где } k_2 = \frac{1}{\eta_y} \cdot \left(b_1 \cdot z_x + b_0 - \gamma_y \pm t_{(\alpha/2, n-2)} \cdot S_{z_y} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(z_x - \bar{z}_x)^2}{\sum_{i=1}^n (z_{xi} - \bar{z}_x)^2}} \right); \bar{z}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{xi}.$$

В качестве примера приведены полученные в работе нелинейная регрессия надводного водоизмещения средних НАПЛ в зависимости от года вступления в строй, ее доверительные интервалы и интервалы предсказания (рис.1). На рис.1 нелинейная регрессия показана сплошной линией, а границы ее доверительных интервалов и интервалов предсказания – соответственно пунктирными и штрих-пунктирными линиями; треугольниками также отмечены данные по 36-ти проектам средних НАПЛ. Указанные результаты были получены на основе (2)-(5) для значения доверительной вероятности 0,95. При этом в (2)-(5) y – надводное водоизмещение в тоннах, а x – год вступления в строй; $\gamma_y = 0,135677$; $\eta_y = 1,00155$; $\varphi_y = 982,286$; $\lambda_y = 1077,93$; $\gamma_x = -0,175003$; $\eta_x = 0,917293$; $\varphi_x = 1946,27$; $\lambda_x = 78,3560$; $b_1 = 0,5932$; $b_0 = 0$; $n=36$. Применение моделей (2) и (5) позволило в ходе построения группировать данные по классам с характерными конструктивными признаками.

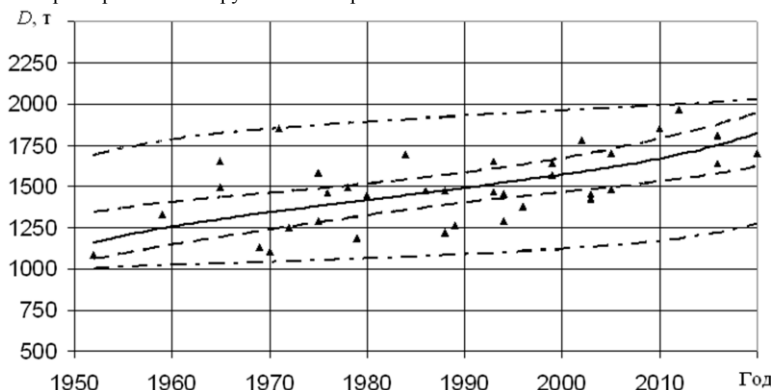


Рисунок 1 – Нелинейная регрессия надводного водоизмещения средних НАПЛ в зависимости от года вступления в строй, ее доверительные интервалы и интервалы предсказания

В работе было также выполнено сравнение результатов моделирования ТТХ НАПЛ по (2), (4) и (5) с результатами, которые получаются с использованием нормализующего преобразования в виде десятичного логарифма. Получено: по критерию R^2 качество регрессии (2) на 1,5% лучше, а ширина интервала предсказания (5) более чем на 20% меньше по сравнению с найденными с использованием десятичного логарифма.

Выводы. При построении нелинейных уравнений регрессии динамики изменения качеств НАПЛ лучше применять нормализующее преобразование Джонсона.

Список использованной литературы

1. Кормилицин Ю.Н. Проектирование подводных лодок [Текст] / Ю. Н. Кормилицин, О. А. Хализев. – СПб: Изд. СПбГМТУ, 1999. – 344 с.
2. Вашедченко А.Н. Начальное проектирование подводной техники. Часть 1. Дизель-электрические подводные лодки [Текст] / А. Н. Вашедченко, П. Г. Стеблин. – Николаев: АЛРО ПРЕСС, 2000. – 196 с.
3. Александров Ю.И. Боевые корабли мира на рубеже XX-XXI века. Часть 1. Подводные лодки. Справочник [Текст] / Ю. И. Александров, А. Н. Гусев. – СПб: Галяя принт, 2000. – 302 с.

4. Torkelson K.O. Comparative Naval Architecture Analysis of Diesel Submarines. [Text] / K. O. Torkelson. Massachusetts institute of technology. June 2005. – 91 p.
5. Худяков Л.Ю. Исследовательское проектирование кораблей [Текст] / Л. Ю. Худяков. – Л.: Судостроение, 1980. – 240 с.
6. Prykhodko S.B. Statistical anomaly detection techniques based on normalizing transformations for non-Gaussian data / S. B. Prykhodko // Computational Intelligence (Results, Problems and Perspectives): Proceedings of the International Conference, May 12-15, 2015, Kyiv-Cherkasy, Ukraine / Taras Shevchenko National University of Kyiv and [etc]; Vitaliy Ye. Snytyuk (Editor). – Cherkasy: editor July Chabanenko, 2015. – p.286-287.
7. Тарас А.Е. Дизельные подводные лодки 1950-2005 [Текст] / А. Е. Тарас. – М.: АСТ, Мн.: Харвест, 2006. – 272 с.
8. Jane's Fighting Ships.2004-2005.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПО КОНТУРУ ОБЪЕКТА А.П. Савчук, А.А. Фоков, С.В. Хорошилов

Институт технической механики НАНУ и ГКАУ, Днепропетровск

Введение. Рассматривается технология удаления космического мусора больших размеров с низких околоземных орбит, которая именуется "Пастух с ионным пучком" [1], [2] Технология предполагает смещение объекта космического мусора с орбиты за счет воздействия на него ионного потока. Поток создается электрореактивным двигателем (ЭРД), на борту космического аппарата (пастух), который находится в непосредственной близости от объекта космического мусора (мишень). Для обеспечения эффективности воздействия ионного пучка на движение мишени необходимо поддерживать определенное расстояние между пастухом и мишенью. При известном механизме воздействия ионного потока на элементарную площадку поверхности мишени [3] и при известном ее относительном положении для определения воздействия на мишень необходимо произвести интегрирование по ее поверхности. Такой подход оправдан при моделировании движения системы, но не оправдан в процессе выработки сигналов системы управления ввиду вычислительных затрат и неполноты информации о положении и, возможно, форме мишени. В [4] был предложен упрощенный подход к определению величины воздействия ионного потока на мишень, который основан на информации о контуре ее центральной проекции на картинную плоскость фотокамеры пастуха. В рамках этого подхода предполагается при определении воздействия рассматривать не поверхность мишени, а ее центральную проекцию на перпендикулярную оси луча вспомогательную плоскость. В настоящем докладе обосновывается допустимость такого подхода, анализируются погрешности метода определения воздействию факела ЭРД на мишень по ее известному контуру и возможность использования полученной таким образом величины воздействия в формировании управления относительным движением системы "пастух - мишень".

Расчет силового воздействия при интегрировании по поверхности мишени. Для расчета силового воздействия, оказываемого факелом ЭРД на мишень необходимо учитывать модель взаимодействия ионного луча с поверхностью мишени, а также – модель ионного луча ЭРД. Пренебрегая эффектами покидания ионов плазмы поверхности мишени, распыления ее материала, а также давления электронов элементарная сила $d\mathbf{F}_s$, передаваемая мишени, может быть вычислена следующим образом [5]:

$$d\mathbf{F}_s = mm(-\mathbf{v} \cdot \mathbf{u})ds, \quad (1)$$

где m – масса частицы ионного потока; \mathbf{u} – вектор ее скорости; ds – площадь элементарной площадки поверхности мишени, ее расположение характеризуется радиус-вектором \mathbf{r}_s некоторой ее средней точки; \mathbf{v} – единичный вектор нормали к элементарной площадке; n –

плотность плазмы. Сила и момент, передаваемые мишени ионным лучом, могут быть вычислены путем интегрирования сил (1) по облучаемой поверхности мишени S

$$\mathbf{F}_{surface} = \int_S d\mathbf{F}_s, \quad \mathbf{M}_{surface} = \int_S \mathbf{r}_s \times d\mathbf{F}_s. \quad (2)$$

В качестве модели ионного луча будем использовать так называемую автоподобную модель [6] распространения плазмы, согласно которой ионный пучок в так называемой дальней области (мишень расположена в этой области) имеет форму конуса, и плотность плазмы в произвольной точке этой области может быть определена следующим образом:

$$n = n_0 R_0^2 / (z^2 tg^2 \alpha_0) \cdot \exp(-3r^2 / (z^2 tg^2 \alpha_0)), \quad (3)$$

где r , z - соответственно радиальная (расстояние от средней точки площадки до оси конуса луча) и аксиальная (расстояние от вершины конуса вдоль оси конуса луча) координаты точки; R_0 - радиус луча в начале дальней области (на срезе сопла ЭРД, $z = R_0 / tg^2 \alpha_0$); n_0 - плотность плазмы в начале дальней области луча; α_0 - угол расхождения конуса луча.

Аксиальная u_z и радиальная u_r составляющие скорости ионов плазмы могут быть представлены следующим образом

$$u_z = u_{z0} = const, \quad u_r = u_{z0} r / z. \quad (4)$$

где u_{z0} - аксиальная составляющая скорости ионов плазмы в начале дальней области луча.

В процессе моделирования при определении интегральной силы $\mathbf{F}_{surface}$ передаваемой мишени ионным лучом, ее поверхность разбивается на элементарные площадки. Соответственно в связанной системе координат (СК) мишени задаются координаты площадок и единичные нормали к ним. Далее координаты площадок и их нормали пересчитываются в связанную СК пастуха. Точнее, в систему координат, начало которой находится в вершине конуса пучка ионов ЭРД, в качестве упрощения можно принять, что эта система совпадает со связанной СК пастуха. Для каждой площадки по соотношению (1) и с учетом ее "видимости" со стороны ЭРД и попадания в конус луча определяется элементарная сила. Интегральная сила определяется в соответствии с (2).

Расчет силового воздействия на основе контура мишени на картинной плоскости фотокамеры. Упрощенный подход [4] к определению величины воздействия ионного потока на мишень основан на информации о контуре центральной проекции мишени на некоторую плоскость. Поскольку площадь сечения луча конуса возрастает пропорционально квадрату расстоянию от источника потока, а его плотность убывает пропорционально этому расстоянию, сила, действующая на элементарную площадку мишени, приблизительно равна силе, действующей на центральную проекцию этой площадки на плоскость, перпендикулярную оси конуса луча, например на картинную плоскость фотокамеры пастуха, установленной рядом с ЭРД.

Введем систему координат фотокамеры $O_c x_c y_c z_c$, начало O_c которой находится на оси фотокамеры, плоскость $x_c y_c$ расположена в картинной плоскости камеры, ось z_c совпадает с осью конуса пучка ионов ЭРД. Для упрощения будем считать, что O_c , совпадает с центром масс пастуха, тогда координаты некоторой точки мишени, спроецированной на картинную плоскость, определяются равенствами

$$x_c = f \cdot x / z, \quad y_c = f \cdot y / z, \quad (5)$$

где x_c , y_c - координаты точки в СК фотокамеры; x , y , z - координаты точки в СК пастуха; f - фокусное расстояние камеры.

В рассматриваемом случае соотношение (1) для определения силы $d\mathbf{F}_\sigma$, передаваемой через элементарную площадку поверхности объекта космического мусора, может быть переписано следующим образом [5]

$$d\mathbf{F}_\sigma = mm_c \mathbf{u}_c^2 \mathbf{e}_u d\sigma, \quad \mathbf{u}_c = u_{z_0} (x/f \quad y/f \quad 1)^T, \quad (6)$$

$$n_c = n_0 R_0^2 / (f^2 tg^2 \alpha_0) \cdot \exp(-3(x^2 + y^2) / (f^2 tg^2 \alpha_0)), \quad (7)$$

где $d\sigma$ - площадь элементарного участка фигуры проекции мишени на картинной плоскости фотокамеры; \mathbf{e}_u - единичный вектор направления скорости потока \mathbf{u} .

Соответственно, передаваемая мишени ионным лучом интегральная сила $\mathbf{F}_{contour}$

$$\mathbf{F}_{contour} = \int_{\Sigma} d\mathbf{F}_\sigma, \quad (8)$$

где Σ - часть картинной плоскости фотокамеры, охватываемая контуром.

Анализ погрешности упрощенного подхода. Рассмотрим более подробно утверждение о равенстве действующей на некоторую элементарную площадку поверхности мишени силы воздействия ионного потока силе, действующей на центральную проекцию этой площадки на плоскость, перпендикулярную оси конуса луча. Вначале ограничимся рассмотрением случая, когда площадка ds поверхности расположена перпендикулярно направлению падающего на нее луча ионного потока, то есть в соответствии с (4), перпендикулярна вектору скорости ионов плазмы. Для такой площадки соотношения (1), (3), (4) могут быть переписаны в виде:

$$d\mathbf{F}_s = mm_c^2 \mathbf{e}_u ds, \quad \mathbf{u}^2 = u_{z_0}^2 (1 + tg^2 \theta), \quad (9)$$

$$n = n_0 R_0^2 / (z^2 tg^2 \alpha_0) \cdot \exp(-3 \cdot tg^2 \theta / tg^2 \alpha_0), \quad ds = z^2 (tg \theta / \cos \theta) d\theta d\varphi \quad (10)$$

где θ - угол между направлением распространения луча и осью Z конуса ионного пучка, $\mathbf{e}_u = \mathbf{e}_u(\theta, \varphi)$. Из соотношений (9), (10) следует, что величина $d\mathbf{F}_s = dF_s(\theta, \varphi)$ является функцией переменных θ и φ , и не зависит от координаты Z элементарной площадки. В случае произвольной ориентации площадки поверхности ее "видимая" площадь меняется в зависимости от угла наклона площадки к плоскости перпендикулярной направлению падающего на нее луча ионного потока. В соотношении (1) изменение площади учитывается введением множителя $(-\mathbf{v} \cdot \mathbf{u})$, что равносильно использованию ортогональной проекции площадки на оговоренную перпендикулярную плоскость. При вычислении силового воздействия по контуру мы имеем дело не с ортогональной проекцией, а с центральной проекцией. Иначе говоря, при вычислении воздействия по контуру вносится погрешность, для оценки которой рассмотрим следующий пример, проиллюстрированный рисунком 1.

Будем рассматривать часть конуса пучка ионов в виде малого конуса, назовем его элементарным, с углом раствора α . На рисунке показано сечение конуса вертикальной плоскостью. Элементарный конус "вырезает" на поверхности мишени элементарную площадку в виде конического сечения - эллипса (на рисунке - отрезок AB). Пусть плоскость эллипса наклонена к плоскости, перпендикулярной оси ζ элементарного конуса, под углом β . Определим отношение k_S площади S_{cone} перпендикулярного сечения элементарного конуса, проходящего через среднюю точку M площадки, к площади S_{body} площадки. Отличие величины этого отношения от величины $\cos \beta$ характеризует погрешность при применении

соотношений (9), (10). Введем так называемый коэффициент совпадения, определенный соотношением $k_{совп} = 1 - (k_S - \cos\beta) / \cos\beta$.

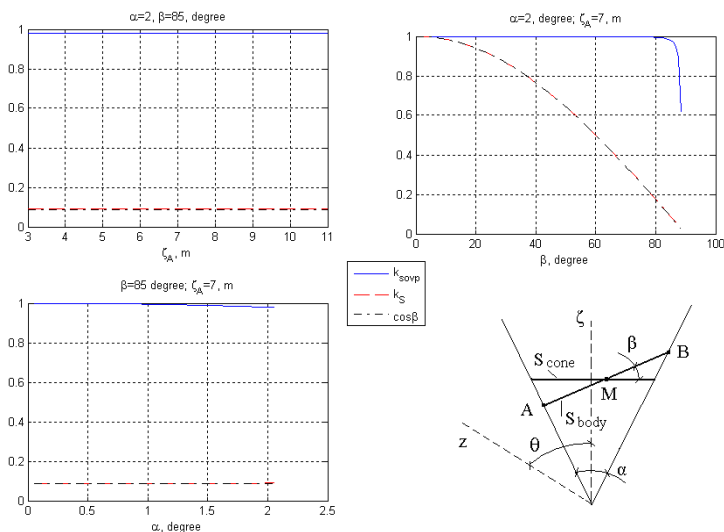


Рисунок 1

На рисунке приведены графики изменения коэффициента совпадения от переменных: координаты z_A крайней точки площадки; угла раствора α элементарного конуса; угла наклона β площадки. При варьировании одной из переменных значения двух других фиксированы. Графики показывают независимость коэффициента совпадения от расстояния площадки до вершины конуса; исследуемая погрешность проявляется только при значениях β , близких к 90° ; уменьшая угол раствора α можно добиться приемлемых результатов и при значениях β , близких к 90° .

Возможность использования упрощенного подхода к определению воздействия факела ЭРД в законе управления относительным движением мишени. На основе моделирования движения системы, когда ("реальная") величина воздействия вычисляется непосредственным интегрированием по поверхности мишени, а величина воздействия факела ЭРД двигателя на мишень, используемая в законе управления относительным движением, определяется по информации о геометрии контура мишени, определим возможность использования упрощенного подхода к определению воздействия факела ЭРД на мишень применительно к управлению относительным движением мишени.

При моделировании угловое положение мишени в виду ее неконтролируемого движения во избежание вырожденности кинематических соотношений описывалось параметрами Родрига-Гамильтона. При описании углового движения относительно центра масс использовались динамические уравнения Эйлера и соответствующие кинематические соотношения. Орбитальное движение не учитывалось, и движение системы рассматривалось в некоторой инерциальной СК, а оси орбитальных СК пастуха и мишени считались параллельными осям инерциальной СК. Было принято, что при идеальной ориентации пастуха и мишени их связанные СК совпадают с соответствующими орбитальными СК.

В концепции "Пастух с ионным пучком" предусмотрено наличие двух ЭРД, основного и компенсирующего с противоположно направленными тягами. Необходимо, чтобы результат воздействия на движение центра масс пастуха был таким же, как результат воздействия на

движение мишени. При использовании ЭРД с управляемой тягой это условие возможно реализовать регулированием тяги компенсирующего ЭРД. В качестве простейшего алгоритма управления был выбран закон изменения тяги \mathbf{F}_{E2} компенсирующего ЭРД

$$\mathbf{F}_{E2} = (m_S / m_T) \cdot \mathbf{F}_{contour} - \mathbf{F}_{E1}, \quad (11)$$

где \mathbf{F}_{E1} – тяги основного ЭРД, m_T и m_S – массы мишени и пастуха.

Результаты моделирования. При проведении расчетов предполагалось, что на пастух действуют только две силы, оси действия которых проходят через его центр масс – силы со стороны основного и компенсирующего ЭРД. За номинальное положение мишени в виде цилиндра диаметром 2,2 м и высотой 2,6 м было принято такое, при котором расстояние до центра масс пастуха вдоль оси z_c СК камеры равно 7 м. Результаты интегрирования при начальном расположении центра масс мишени на оси луча дает расхождение между номинальным и расчетным расстояниями мишени до пастуха составляет менее 1 см за 800 с интегрирования. Результаты интегрирования при начальном расположении центра масс мишени в 1 м в стороне от оси луча и первоначальном развороте мишени на 45° относительно оси Y связанной СК мишени представлены на следующих рисунках. На рисунках 2, 3 представлены графики изменения сил, действующих на пастуха и на мишень соответственно. В идеале эти графики должны совпадать с точностью до масштаба. Отклонение (рисунок 4) положения мишени от номинального не превышает 5 см в течении 800 с.

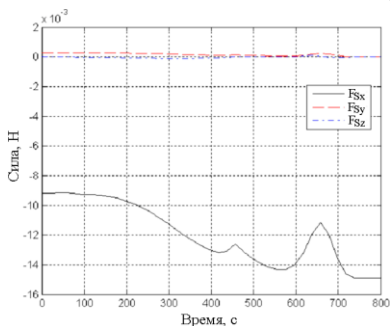


Рисунок 2. Сила, действующая на пастух

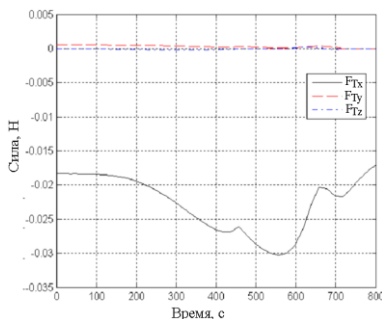


Рисунок 3. Сила, действующая на мишень

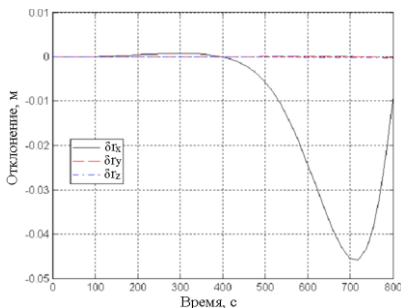


Рисунок 4. Отклонение расстояния мишени от номинального

Напомним, что этот результат получен при использовании простейшего закона управления (11), который не включает в себя информацию об истинном расстоянии между мишенью и пастухом или его оценку.

Выводы. Приведенные в докладе результаты обосновывают допустимость в рамках автотоподобной модели распространения плазмы факела электроракетного двигателя [6] применения упрощенного подхода к определению воздействия на объект космического мусора со стороны электрореактивного двигателя специализированного космического аппарата (пастуха) при удалении космического мусора по технологии "Пастух с ионным пучком" [1], [2]. Результаты исследований позволяют сделать предварительный вывод о возможности применения оговоренного упрощенного подхода в процессе управления относительным движением системы "пастух-объект космического мусора". Более детальный анализ такой возможности требует учета орбитального движения, возмущающих факторов, погрешностей принятой модели взаимодействия ионного потока с поверхностью объекта космического мусора и погрешностей реализации исследуемого упрощенного подхода.

Представленные в докладе результаты получены при выполнении проекта LEOSWEEP, финансируемого в рамках 7-й Европейской рамочной программы (грант № N.607457).

Список литературных источников

1. Claudio Bombardelli and Jesus Pelaez. "Ion Beam Shepherd for Contactless Space Debris Removal", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 34, No. 3 (2011), pp. 916-920. doi: 10.2514/1.51832
2. Бомбарделли К. Проект «Космического Пастуха» с ионным лучом. Идеи и задачи / К. Бомбарделли, А.П. Алпатов, А.В. Пироженко, Е.Ю. Баранов, Г.Г. Осинский, А.Е. Закржевский // *Космічна наука і технологія*, Т. 20, № 2, С. 55–60, 2014.
3. *Progress in Propulsion Physics 4* (2013) 789-802. Ion beam shepherd satellite for space debris removal. M. Merino, E. Ahedo, C. Bombardelli, H. Urrutxua and J. Peláez. Universidad Politécnica de Madrid Madrid 28040, Spain
4. Алпатов А.П. Расчет воздействия факела электрореактивного двигателя на объект космического мусора / А.П. Алпатов, А.Е. Закржевский, М. Мерино, А.А. Фоков, С.В. Хорошилов, Ф. Чичокки // *Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее»*. Тезисы докладов, – Днепропетровск, 2015. – С.35.
5. C. Bombardelli, M. Merino, E. Ahedo, J. Pelaez, H. Urrutxua, and A. Iturri-Torreyay J. Herrera-Montoyo. Ariadna call for ideas: Active removal of space debris ion beam shepherd for contactless debris removal. Technical report, 2011.
6. C. Bombardelli, H. Urrutxua, M. Merino, E. Ahedo, and J. Pelaez. Relative dynamics and control of an ion beam shepherd satellite / *Spaceflight mechanics 2012*, volume 143, 2012, P. 2145-2158.

РІВНЯННЯ МАКРОСЕГРЕГАЦІЇ В НЕРІВНОВАЖНІЙ ТЕОРІЇ БАГАТОФАЗНОЇ ЗОНИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ СТАЛІ

С.Є. Самохвалов

Державний технічний університет, Дніпродзержинськ

Якість сталевого зливка в значній мірі визначається розподілом домішок, який формується на етапі тверднення зливка завдяки механізму їх сегрегації, тобто розподільчої дифузії, що має місце на межі поділу твердої та рідинної фаз. В даній роботі розглянуто рівняння, яке описує макросегрегацію домішок в нерівноважній теорії багатофазної зони кристалізації сталі, запропонованої в роботах [1,2]. Це рівняння враховує як рух дрібнодисперсних кристалів у плинній зоні кристалізації, так і сумісний фільтраційний рух розплаву та розчинених у ньому домішок крізь дендритний каркас. Крім того, наше рівняння дає змогу враховувати незалежний рух домішок крізь дендритний каркас, який має місце внаслідок механізму, виявленого в експериментальних дослідженнях і обумовленого різною ступінню змочуваності ліквантами дендритного каркасу [5], отже узагальнює рівняння макросегрегації, запропоновані в роботах [3,4].

Будемо користуватись позначеннями, прийнятими в роботах [1,2]. Крім об'ємних густин домішок у рідинній фазі β_b^L (підрхованих відносно об'єму рідинної фази), будемо розглядати

об'ємні густини цих же домішок у твердій (кристалічній) фазі β_b^S (підрахованих відносно об'єму твердої фази).

Хай ζ - об'ємна густина кристалічної фази, $\varphi_L = 1 - \zeta$, $\varphi_S = \zeta$. Об'ємні густини рідинної та твердої складових домішки b в середовищі визначаються формулами:

$$\beta_b = \varphi_L \beta_b^L, \quad \tilde{\beta}_b = \varphi_S \beta_b^S, \quad (1)$$

а повна масова густина домішки b в середовищі – формулою:

$$\rho_b^h = \rho_b^o \beta_b + \tilde{\rho}_b^o \tilde{\beta}_b, \quad (2)$$

де ρ_b^o та $\tilde{\rho}_b^o$ – істинні масові густини домішки b в рідинній та твердій фазах.

Припускаючи, що домішка b в процесі тверднення не утворюється і не розкладається, а лише перерозподіляється між розплавом та кристалічною фазою (що і називається сегрегацією), закон збереження маси для неї можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial \rho_b^h}{\partial t} + \bar{\nabla}(\rho_b^o \beta_b \bar{v}_b + \tilde{\rho}_b^o \tilde{\beta}_b \bar{v}_S) = 0. \quad (3)$$

При отриманні цього рівняння було використано позначення \bar{v}_b для повної швидкості рідинної компоненти домішки b , а також прийнято, що дифузія домішки в твердій фазі практично відсутня, а тому її швидкість збігається з повною швидкістю твердої фази \bar{v}_S . Якщо використати вираз для істинної густини твердої домішки через коефіцієнт її фазової усадки δ_{fb} :

$$\tilde{\rho}_b^o = (1 + \delta_{fb}) \rho_b^o, \quad (4)$$

рівнянню (3) можна надати такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\beta_b + (1 + \delta_{fb}) \tilde{\beta}_b] + \bar{\nabla} [\beta_b \bar{v}_b + (1 + \delta_{fb}) \tilde{\beta}_b \bar{v}_S] = 0 \quad (5)$$

або

$$\frac{\partial \beta_b}{\partial t} + \bar{\nabla}(\beta_b \bar{v}_b) = -(1 + \delta_{fb}) \left[\frac{\partial \tilde{\beta}_b}{\partial t} + \bar{\nabla}(\tilde{\beta}_b \bar{v}_S) \right]. \quad (6)$$

Отже, для об'ємного джерела рідинної компоненти домішки b при сегрегації отримуємо:

$$\Phi_b = -(1 + \delta_{fb}) \left[\frac{\partial \tilde{\beta}_b}{\partial t} + \bar{\nabla}(\tilde{\beta}_b \bar{v}_S) \right]. \quad (7)$$

Конкретизуємо цей вираз з урахуванням коефіцієнта розподілу k_b , вважаючи його сталим. При цьому існує дві крайні можливості. В першій, з нашої точки зору більш послідовній, припускається, що через відсутність дифузії в твердій фазі (при максимальній мікросегрегації [3]) коефіцієнт розподілу k_b визначає відношення концентрацій домішки b -ї фази в безпосередній близькості від межі фазового перетворення. У цьому разі, з використанням (1), отримуємо:

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\beta}_b = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi_S \beta_b^S) = k_b \beta_b^L \frac{\partial \varphi_S}{\partial t}, \quad (8)$$

$$\bar{\nabla}(\tilde{\beta}_b \bar{v}_S) = k_b \beta_b^L \bar{\nabla}(\varphi_S \bar{v}_S). \quad (9)$$

При повній відсутності мікросегрегації відразу можна покласти $\tilde{\beta}_b = k_b \beta_b^L$, що дає такі формули:

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\beta}_b = k_b \left(\beta_b^L \frac{\partial \varphi_S}{\partial t} + \varphi_S \frac{\partial \beta_b^L}{\partial t} \right), \quad (10)$$

$$\bar{\nabla}(\tilde{\beta}_b \bar{v}_S) = k_b \left[\beta_b^L \bar{\nabla}(\varphi_S \bar{v}_S) + \varphi_S \bar{v}_S \bar{\nabla} \beta_b^L \right]. \quad (11)$$

Проміжний варіант з наведених двох крайніх можливостей можна утворити за допомогою параметрів $\xi, \eta \in [0,1]$:

$$\frac{\partial}{\partial t} \tilde{\beta}_b = k_b \left(\beta_b^L \frac{\partial \varphi_S}{\partial t} + \xi \varphi_S \frac{\partial \beta_b^L}{\partial t} \right), \quad (12)$$

$$\bar{\nabla}(\tilde{\beta}_b \bar{v}_S) = k_b \left[\beta_b^L \bar{\nabla}(\varphi_S \bar{v}_S) + \eta \varphi_S \bar{v}_S \bar{\nabla} \beta_b^L \right] \quad (13)$$

Якщо, крім наведених формул, врахувати ще рівняння переносу кристалічної фази

$$\frac{\partial \varphi_S}{\partial t} + \bar{\nabla}(\varphi_S \bar{v}_S) = \Phi_S, \quad (14)$$

шукане джерело рідинних домішок набуває вигляду:

$$\Phi_b = -(1 + \delta_{fb}) k_b \left(\beta_b^L \Phi_S + \varphi_S \frac{\delta \beta_b^L}{\delta t} \right), \quad (15)$$

де введено позначення:

$$\frac{\delta \beta_b^L}{\delta t} = \xi \frac{\partial \beta_b^L}{\partial t} + \eta \bar{v}_S \bar{\nabla} \beta_b^L. \quad (16)$$

При максимальній мікросегрегації $\xi = \eta = 0$, а тому $\delta \beta_b^L / \delta t = 0$. В цьому разі джерело рідинної домішкової фази визначається інтенсивністю фазового перетворення розплав-кристалічна фаза і при твердненні має від'ємний знак. При $k_b = 0$, очевидно, $\Phi_b = 0$.

З врахуванням виразу (15) рівняння макросегрегації (6) набуває вигляду:

$$\frac{\partial \beta_b}{\partial t} + \bar{\nabla}(\beta_b \bar{v}_b) = -(1 + \delta_{fb}) k_b \left(\beta_b^L \Phi_S + \varphi_S \frac{\delta \beta_b^L}{\delta t} \right). \quad (17)$$

В літературі рівняння макросегрегації частіше зустрічається у вигляді рівняння відносно β_b^L . Для його отримання перетворимо ліву частину рівняння (17)

$$\frac{\partial \beta_b}{\partial t} + \bar{\nabla}(\beta_b \bar{v}_b) = \beta_b^L \left[\frac{\partial \varphi_L}{\partial t} + \bar{\nabla}(\varphi_L \bar{v}_b) \right] + \varphi_L \frac{d_b \beta_b^L}{dt} \quad (18)$$

та врахуємо рівняння переносу розплаву:

$$\frac{\partial \varphi_L}{\partial t} + \bar{\nabla}(\varphi_L \bar{v}_L) = -(1 + \delta_f) \Phi_S. \quad (19)$$

Тоді замість (18) отримуємо:

$$\varphi_L \frac{d_L \beta_b^L}{dt} = \beta_b^L \left[(1 + \delta_f) \Phi_S - \bar{\nabla}(\varphi_L \bar{w}_{bL}) \right] + \Phi_b, \quad (20)$$

або, враховуючи, що $\bar{v}_b = \bar{v}_L + \bar{w}_{bL}$, маємо:

$$\varphi_L \frac{d_L \beta_b^L}{dt} = -\bar{\nabla}(\beta_b^L \varphi_L \bar{w}_{bL}) + \beta_b^L (1 + \delta_f) \Phi_S + \Phi_b. \quad (21)$$

Якщо тепер підставити сюди вираз для джерела Φ_b (15), отримаємо:

$$\varphi_L \frac{d_L \beta_b^L}{dt} = -\bar{\nabla}(\beta_b^L \varphi_L \bar{w}_{bL}) + \beta_b^L \left[(1 + \delta_f) - k_b (1 + \delta_{fb}) \right] \Phi_S - (1 + \delta_{fb}) k_b \varphi_S \frac{\delta \beta_b^L}{\delta t}. \quad (22)$$

Нагадаємо, що в загальному випадку швидкість фази b відносно розплаву \bar{w}_{bL} складається з двох компонент:

$$\bar{w}_{bL} = \bar{w}_{bL}^c + \bar{w}_{bL}^d, \quad (23)$$

які дещо відрізняються за фізичним змістом. Остання з них \bar{w}_{bL}^d є дифузійною складовою, або ефективною дифузійною складовою (тобто вона має вигляд дифузійної складової, але має не молекулярне, а скажімо, турбулентне походження):

$$\bar{w}_{bL}^d = -\frac{1}{\beta_b^L} D_b \bar{\nabla} \beta_b^L. \quad (24)$$

Але набагато більше значення в двофазній зоні зливка, що твердне, має перша складова – колективна \bar{w}_{bL}^c , окремим випадком якої є відносна швидкість домішок зумовлена їх фільтрацією. Ця складова, на жаль, не враховується в існуючих моделях кристалізації сталі (наприклад, [3, 4] та ін.), хоча, як показують експериментальні дослідження [5], має важливе значення для формування остаточного розподілу домішок з зливку.

З врахуванням формул (23) та (24) рівняння сегрегації (22) набуває свого кінцевого і найбільш загального вигляду:

$$\begin{aligned} \varphi_L \frac{d_L \beta_b^L}{dt} = & \bar{\nabla}(\varphi_L D_b \bar{\nabla} \beta_b^L) - \bar{\nabla}(\beta_b^L \varphi_L \bar{w}_{bL}^c) + \\ & + \beta_b^L \left[(1 + \delta_f) - k_b (1 + \delta_{fb}) \right] \Phi_S - (1 + \delta_{fb}) k_b \varphi_S \frac{\delta \beta_b^L}{\delta t}. \end{aligned} \quad (25)$$

Крім зазначеної вище дуже важливої можливості врахування фільтраційних швидкостей \bar{w}_{bL}^c , в рівнянні (25) врахована також можливість різної фазової усадки розплаву δ_f та домішок δ_{fb} . Рівняння макросегрегації, отримане в роботі [3], а отже, і рівняння макросегрегації, які воно узагальнює, є окремими випадками рівняння (25).

Висновки. Рівняння макросегрегації нерівноважної теорії багатофазної зони кристалізації сталі враховує основні фізичні фактори переносу домішок в зливку і може бути покладене в основу вивчення процесів формування хімічних неоднорідностей сталевих зливок.

Список літературних джерел

1. Самохвалов С.Є. Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 1994. – 172 с.
2. Огурцов А.П., Самохвалов С.Є. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах. – К.: Наук. думка. 2001. – 410 с.

3. Килимник И.А., Самойлович Ю.А. Обобщенное уравнение макросерегаии в затвердевающем слитке // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 6. – С.107–109.
4. Flemings M.S., Nereo G.E. // Trans. Metallurg. Soc. of AIME. – 1967. – V. 239. – P.1449–1461.
5. Вихляев В.Б., Ефимов В.А., Ишук Н.Я. К вопросу о структуре двухфазной зоны и механизме массопереноса в ней // Проблемы стального слитка. – М.: Металлургия, 1976. – Вып. VI. – С.122–128.

**ТОПОЛОГІЧНО НЕЕКВІВАЛЕНТНІ СИСТЕМИ З ПРАВОЮ РАЦІОНАЛЬНОЮ
ЧАСТИНОЮ**
Д.В. Семенюта

Дніпропетровський Національний університет ім. Олеся Гончара, Дніпропетровськ

Хоча всі необхідні умови алгеброїчної структури звичайних диференційних рівнянь, які забезпечують хаотичний розв'язок, були дослідженні, не вистачає нумерації прикладів різних наборів рівнянь та їх класифікації, які мають хаотичний розв'язок. Як відомо у трьохмірному просторі існує не так багато типів хаосу. Не велика кількість типів хаотичних результатів пов'язана з тим, що в трьохмірному просторі існує багато обмежень. Тому не дивно, що топологічний аналіз використовує граничні тори для характеристик та класифікації хаотичних атракторів, які належать до трьохмірного простору.

Мета даної роботи – дослідити існуючі динамічні системи в трьохвимірному просторі, зрозуміти природу їхньої поведінки та топологічні властивості. На основі цих досліджень класифікувати за топологічними властивостями хаотичні системи, а також спробувати віднайти нові системи, які патологічно відрізняються від озглянутих.

В роботі розглядаються системи, які містять праву раціональну та ірраціональну частину. За інструмент дослідження були взяті фазові траєкторії для кожної топологічно несхожої системи. Фазові траєкторії дають можливість відстежити послідовну зміну станів системи, а також визначити кількість торів, що являється ключовою ознакою при дослідженні топологічних властивостей атракторів. Наступним із інструментів, який був використаний для дослідження хаотичних систем – рекурентний аналіз. Основним результатом рекурентного аналізу є візуальне відображення досліджуваного процесу у формі рекурентної діаграми, яка містить інформацію про рекурентну поведінку системи. Важливою характеристикою, яка дозволяє відрізнити детермінований процес від випадкового є рекурентність, тобто повторюваність траєкторії досліджуваної динамічної системи у фазовому просторі.

За допомогою рекурентних діаграм виявлені бифуркації ні переходи. Були відновлені фазові траєкторії системи за часовим рядом у різні моменти часу для того, щоб краще зрозуміти природу та характер хаосу.

В результаті були отримані атрактори з різними топологічними властивостями, які можна віднести до різних класів. Основні атрактори, винайдені в цій роботі приведені на наступних рисунках.

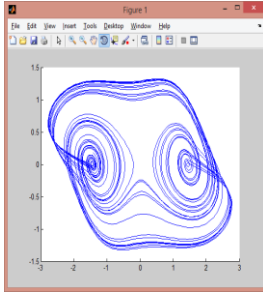


Рисунок 1 - Система, яка має праву ірраціональну частину

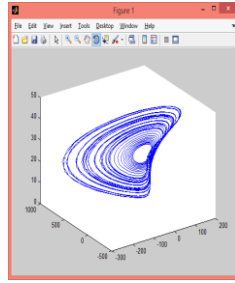


Рисунок 2 - Система, яка містить корінь квадратний у правій частині

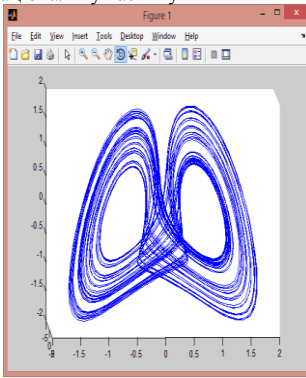


Рисунок 3 - Система, яка має праву раціональну частину

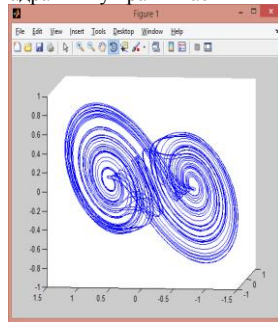


Рисунок 4 - Система, яка має праву раціональну частину

Список літературних джерел

1. Arrowsmith D.K., Cplac .M.«Dynamical Systems (differential equations, mas and chaotic behaviour)»;
2. Каток А.Б., Хасселблат Б.: «Введение в теорию динамических систем с обзором последних достижений».

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ОБ'ЄМНИХ ДЖЕРЕЛ ТЕПЛА ЗА ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ ТРУБ

І.В. Сербулова

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ

Високочастотне зварювання металів засноване на використанні законів електромагнітної індукції і повного струму, а також наступних явищ: поверхневого ефекту, ефекту близькості, кільцевого ефекту, впливу мідних екранів на розподіл струму в провіднику, електромагнітних сил [1].

Ці закони та явища необхідно враховувати при виборі параметрів процесу і конструюванні пристроїв для передачі зварювального струму до виробів.

Для вивчення індукційного нагріву провідникових виробів необхідно знання закономірностей розподілу питомої потужності об'ємних джерел тепла, які з'являються за індукційного нагріву труб внаслідок збудження в них вихрових струмів.

Розглянемо розрахунок розподілу питомої потужності об'ємних джерел тепла для сталеві трубно заготовки (Рис.1)

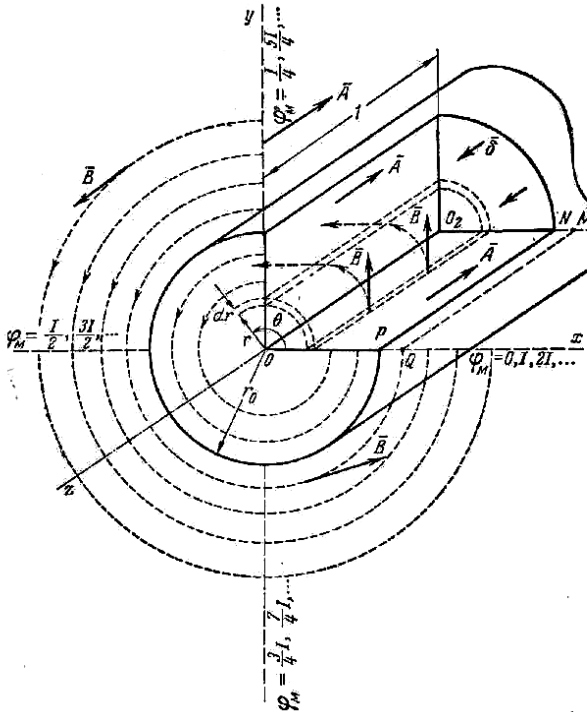


Рисунок 1 Схема розрахунку розподілу питомої потужності об'ємних джерел тепла для сталеві трубно заготовки

Згідно з теорії електромагнітного поля кількість тепла, яка виділяється в одиницю часу в елементарній кільцевій поверхні труби під індуктором [2].

$$g_n = |I_a / \sqrt{2}|^2 R_k = |J_a / \sqrt{2}|^2 \rho l S, \quad (1)$$

де I_a, J_a - комплексні амплітуди сили і густини струму, збудженого в елементарному кільці індуктором; ρ - питомий електричний опір матеріалу труби; l - периметр кільця.

Або

$$J_a = \sigma E = J \omega \sigma A, \quad (2)$$

де $\sigma = 1/\rho$ - питома електрична провідність; ω - кругова частота струму живлення індуктора; A - векторний потенціал; E - комплексна амплітуда напруженості електричного поля, створеного індуктором в розглянутій точці заготовки; μ - магнітна проникність матеріалу заготовки.

Звідси питому потужність джерел тепла представимо виразом

$$g_{n\partial} = 0,5\sigma\omega^2|A|^2. \quad (3)$$

Розрахунок векторного потенціалу A електромагнітного поля, збудженого індуктором, виконано в циліндричній системі координат за неоднорідним диференціальним рівнянням Гельмгольца в комплексній формі

$$\Delta A + k^2 A = -\mu_T J_{CT}, \quad (4)$$

де $k^2 = -j\omega\sigma_T\mu_T$; σ_T і μ_T - питома електрична провідність і магнітна проникність в розглянутій точці; J_{CT} - комплексна амплітуда густини сторонніх струмів.

Через кругову симетрію задачі сторонній струм має тільки φ -ту складову, а тому векторний потенціал є функцією тільки r і z . Тому рівняння Гельмгольца є

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A}{\partial r} \right) + \left(k^2 - \frac{1}{r^2} \right) A + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} = -\mu_T J_{CT}, \quad (5)$$

а граничні умови

$$A_i(R_i, z) = A_{i+1}(R_{i+1}, z); \quad \frac{1}{\mu_i} \frac{\partial(rA_i)}{\partial r} \Big|_{r=R_i} = \frac{1}{\mu_{i+1}} \frac{\partial(rA_{i+1})}{\partial r} \Big|_{r=R_i}, \quad (6)$$

де $i=1,2$ та відноситься до векторних потенціалів і магнітних проникностей двох граничних шарів.

Для розв'язання рівняння використано інтегральне перетворення Фур'є [3].

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\bar{A}(\lambda, r)}{dr} \right) - \left(q^2 + \frac{1}{r^2} \right) \bar{A}(\lambda, r) = -\mu_T \bar{J}_{CT}, \quad (7)$$

де $q = \sqrt{\lambda^2 - k^2}$, λ - параметр інтегрального перетворення, $\bar{J}_{CT} = \int_{-\infty}^{\infty} J_{CT} \cos(\lambda(z' - z)) dz'$ - перетворення густини тока.

Граничні умови для перетвореного векторного потенціалу мають вигляд

$$\bar{A}_i(\lambda, R_i) = \bar{A}_{i+1}(\lambda, R_i),$$

$$\frac{1}{\mu_i} \frac{d}{dr} (r\bar{A}_i(\lambda, r)) \Big|_{r=R_i} = \frac{1}{\mu_{i+1}} \frac{d}{dr} (r\bar{A}_{i+1}(\lambda, r)) \Big|_{r=R_i}. \quad (8)$$

Розв'язок цього рівняння

$$\bar{A}(\lambda, r) = C_1 I_1(\lambda r) + C_2 K_1(\lambda r) + \mu_0 \int_{R_i}^{\infty} \bar{J}_{CT} (I_1(\lambda \xi) K_1(\lambda r) - I_1(\lambda r) K_1(\lambda \xi)) \xi d\xi, \quad (9)$$

C_1 і C_2 – довільні константи, $I_1(x), K_1(x)$ - модифіковані циліндричні функції першого та другого роду.

Враховуючи умову обмеження векторного потенціалу $\overline{A}_i(\lambda, r)$ на нескінченності та граничні умови

$$C_1 = \mu_0 I_{CT} R_3 K_1(\lambda R_3) \varphi(gr) \cos(\lambda(z' - z_0)) . \quad (10)$$

Для векторного потенціалу $A(r, z)$, створеного одношаровим індуктором радіуса R_3 в будь-якій точці трубно́ї поверхні одержано вираз, використовуючи обернене перетворення Фур'є [3].

$$A(r, z) = \frac{\mu_0 I_m R_3}{\pi} \int_0^{\infty} K_1(\lambda R_3) \varphi(gr) \cos(\lambda(z - z_0)) d\lambda . \quad (11)$$

Аналіз цього виразу дає змогу визначити основні закономірності розподілу питомої потужності об'ємних джерел тепла на поверхні від розмірів і властивостей матеріалу трубно́ї заготовки [4].

Список літературних джерел.

1. Шамов А.Н. Высокочастотная сварка металлов. –Л.:Машиностроение,1991.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. –М.: Высшая школа,1973.
3. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа,1970.
4. Сербулова І.В. „Розрахунок параметрів перемагнічувальних імпульсів для контролю якості феритових кілець”. -Матеріали XIV Міжнародній науковій конференції ім. акад. М.Кравчука.-Київ, 2012

ВИКОРИСТАННЯ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ХАРАКТЕРИСТИК АНТЕН О.М. С'янов, О.С. Косухіна

Дніпродзержинський державний технічний університет, Дніпродзержинськ

Проблема випромінювання електромагнітних хвиль антенами, розташованими в різних природних та штучних неоднорідних середовищах, а також створення адекватних теоретичних моделей розрахунку характеристик таких антен, як і раніше, залишається сьогодні однією з актуальних задач радіотехніки. Цікавість до цієї проблеми виникла давно й постійно стимулювалася потребами та перспективами різних практичних додатків.

Інтегральне рівняння електричного поля, що описує щільність поверхневого струму на поверхні S записується у вигляді:

$$J_k = \sum_{m=1}^M I_m f_m , \quad (1)$$

де J_k – щільність поверхневого потоку струму на поверхні S , I_m – коефіцієнти розширення, що формують вектор-струму I , f_m – базисні функції, що покладаються на краї m елементів.

При розв'язанні поставленої задачі використовувався метод моментів. В цьому випадку вважалося, що поверхня металу антени складається з окремих трикутників. Кожна пара трикутників, що мають спільне ребро, представляє відповідні граничні RWG елементи, один із яких має знак плюс, а другий мінус. Припускаємо, що підінтегральна функція Гріна для області трикутника g постійна в межах кожного трикутника.

Оскільки коефіцієнти розширення I_m формують вектор I , то вони можуть бути знайдені з рівняння повного опору або рівняння моменту:

$$Z \cdot I = V, \quad (2)$$

де Z – квадратна матриця опору, що визначає електромагнітну взаємодію між різними граничними елементами. Розмір матриці опору вважаємо рівним числу граничних елементів.

Елемент матриці Z з індексом mn визначається значенням дотичної складової електричного поля в m -й точці на антені, що обумовлена n -ю базисною функцією струму, який розподілений по всій області антени. Матрицю опору Z можна обчислити шляхом використання інтегрального рівняння електричного поля:

$$Z_{mn} = l_m \left[j\omega \left(\frac{A_{mn}^+ \cdot p_m^+}{2} + \frac{A_{mn}^- \cdot p_m^-}{2} \right) + \Phi_{mn}^- - \Phi_{mn}^+ \right], \quad (3)$$

де ω – це частота зміни хвилі, A – магнітний векторний потенціал, Φ – скалярний потенціал. Вирази для магнітного векторного потенціалу A і скалярного потенціалу Φ мають вигляд:

$$A_{mn}^{\pm} = \frac{\mu}{4\pi} \left[\frac{l_n}{2A_n^+ T_n^+} \int p_n^+(r') g_m^{\pm}(r') dS' + \frac{l_n}{2A_n^- T_n^-} \int p_n^-(r') g_m^{\pm}(r') dS' \right], \quad (4)$$

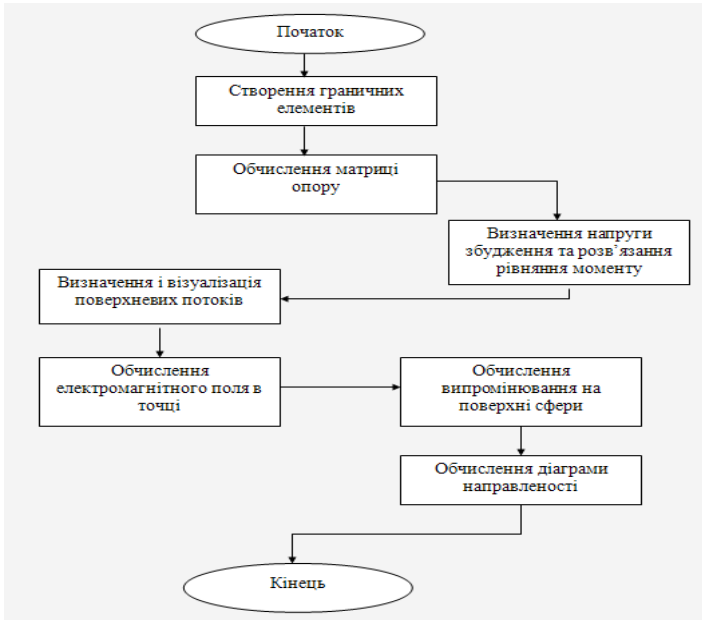


Рисунок 1 — Узагальнена блок-схема розв'язання задачі

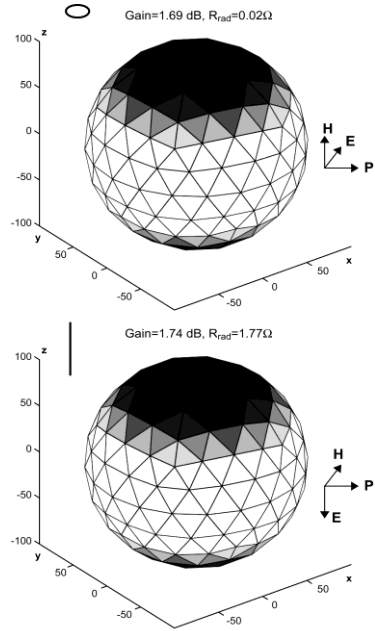
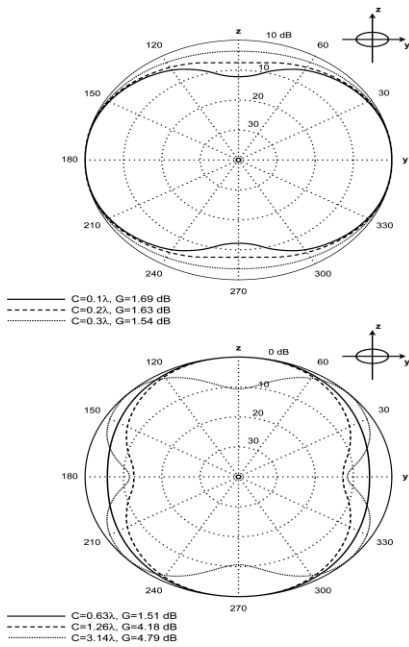


Рисунок 2 — Схема розповсюдження випромінювання та розподіл інтенсивності випромінювання вібраторної антени

$$\Phi_{mn}^{\pm} = \frac{1}{4\pi j \omega \epsilon} \left[\frac{l_n}{A_n^+ T_n^+} \int g_{mn}^{\pm}(r') dS' - \frac{l_n}{A_n^- T_n^-} \int g_{mn}^{\pm}(r') dS' \right], \quad g_{mn}^{\pm}(r') = \frac{e^{-jk \cdot r_m^{\pm} - r'}}{|r_m^{\pm} - r'|} \quad (5)$$

де μ – коефіцієнт магнітної провідності, ϵ – коефіцієнт електричної провідності.

Вектор V є вектором збудження напруги. Він представляється у вигляді:

$$V_m = l_m \left(\frac{E_m^+ \cdot p_m^+}{2} + \frac{E_m^- \cdot p_m^-}{2} \right), \quad m = \overline{1, M}, \quad (6)$$

де $E_m^{\pm} = E$ – складова електричного поля.

Напруга антени в свою чергу, створює поверхневу щільність струму, що протікає по поверхні антени. Вирази для електричного і магнітного полів з врахуванням деяких спрощень запишемо у вигляді:

$$E(r) = \eta \cdot H(r) \times \frac{r}{r}, \quad H(r) = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{r}{r} \times E(r). \quad (7)$$

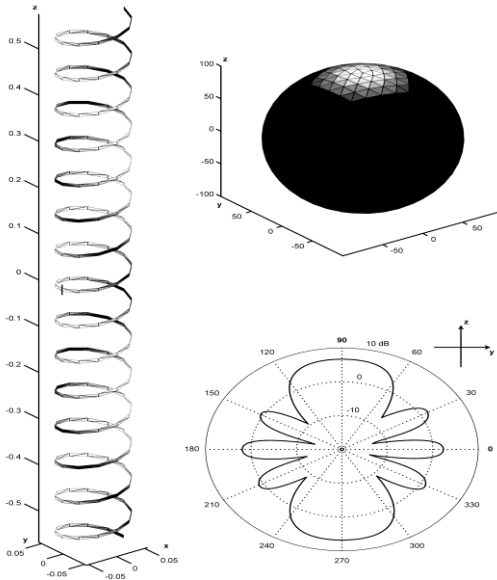


Рисунок 3 — Схема розповсюдження випромінювання та розподіл інтенсивності випромінювання 15-поворотної спіральної антени в осьовому режимі на 500 МГц

Точне значення поля в дальній зоні, визначається відстанню в дальньому полі у вигляді:

$$R_f = 2D^2/\lambda, \quad (8)$$

де D – максимальний розмір антени, λ – довжина хвилі.

На рис.1 представлена узагальнена блок-схема розв'язання задачі. Дослідження електромагнітних характеристик зигзагоподібної антени проведено з використанням пакету Matlab.

Висновки. В даній роботі розглянуто математичну модель поверхневого поточного розподілу струму та випромінювання електромагнітного сигналу у вільний простір. Проведено дослідження основних видів антен. Результати досліджень дали змогу визначити діаграму направленості антен від частоти випромінювання та знайти оптимальні значення опорів антен.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ПІТІНГІВ НА ПОВЕРХНІ СТАЛІ 08X18N10Т ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМІРКОВИХ АВТОМАТІВ

Р.В. Торська, Б.П. Русин, Т.І. Керод, У.Ю. Андрушкевич

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Львів

Представлено результати моделювання із використанням методу коміркових автоматів на прикладі дефектів на поверхні аустенітної корозійностійкої сталі 08X18N10Т. Проведена порівняльна оцінка характеристик пітингової корозії за результатами прискорених випробувань та методом моделювання із застосуванням коміркових автоматів. Встановлено, що моделювання за допомогою коміркових автоматів дає можливість із високою точністю відтворювати фізику процесу корозії для сталі 08X18N10Т. Показано ефективність запропонованого методу прогнозування корозійних втрат, у порівнянні із прискореними випробуваннями.

Моделювання процесів поверхневої корозії металів та сплавів полягає у відтворенні форми пітингів та пітингоподібних дефектів. Одним із перспективних методів симуляції процесів пітингової корозії є метод із застосуванням коміркових автоматів. Даний підхід забезпечує можливість поєднати у одній моделі найважливіші процеси, що відбуваються під час корозії: катодно-анодні реакції, масо-перенос та репасивацію. Також стає можливим отримання різноманітної форми каверн при моделюванні, що відповідає реальній фізиці процесу утворення пітингоподібних дефектів.

Під час пітингової корозії можуть утворюватися дефекти у вигляді виразок чи каверн відкритого типу або приховані під поверхнею напівпроникної мембрани із продуктів корозії. Каверни, що називаються пітингами можуть мати напівсферичну, напівеліпсоподібну чи куполоподібну форму. Багатьом матеріалам та сплавам притаманне утворення глибоких чи вузьких дефектів неправильної форми із складною геометрією дна. Швидкість росту та форма пітинга залежить від виду матеріалу та агресивного середовища. Однак, характеристикою дефекту, що цікавить нас найбільше, є саме його глибина, оскільки перфорація зменшує товщину металу, а отже і його ресурс при експлуатації [1-4].

Метою роботи є розроблення методів моделювання росту та розвитку пошкоджень на металічних поверхнях, внаслідок руйнівної дії пітингової корозії. Вперше розроблено новий метод для реконструкції імовірних пітингоподібних пошкоджень на поверхнях металів та сплавів, який базується на використанні підходу в основу якого покладено коміркові автомати та встановлено унікальні стани комірок при використанні оточення фон Неймана II-го порядку.

У запропонованій моделі симуляції пітингової корозії зміни станів комірок у часі описуємо деякою функцією $f(s,t)$, що визначена на певному інтервалі. Її максимальні значення відповідають некородованому стану системи, а мінімальні – цілковитій руйнації. Параметри стану комірки та часу у функції стану приймають дискретні значення. Оскільки утворення пітингів є незворотнім, функція стану комірки зростає із часом. Відбувається приріст суми всіх впливів комірки самої на себе та її сусідів.

Впродовж еволюції коміркового автомата кожна комірка змінює свій стан відповідно до заданих правил переходу, які залежать від її початкового стану та станів сусідніх комірок. Основним завданням, під час підбору правил переходу є максимально достовірний опис реальних процесів, що відбуваються всередині пітингоподібного дефекту. З огляду на це, висувають припущення, що процеси на межі метал/середовище у пітингу відбуваються із сталою швидкістю до моменту переходу його у стан репасивації.

З метою уточнення ефективності методу моделювання комірковими автоматами проводились випробування із зміною умов перебігу корозії. На зразки сталі 08X18H10T наносився соляний розчин різних концентрацій та аналізувались результати кореляції швидкості корозії при симуляції та при натурно-прискорених випробуваннях. Оцінку зміни швидкості корозії та металографічні дослідження проводили після 3, 6 та 12 місяців досліджень. Втрати механічних властивостей сплавів оцінювали після випробувань на протязі 1-го року.

У результаті нанесення сольових розчинів методом розпилювання на поверхні металу утворюється плівка електроліту, відбувається активація корозійного процесу. Час утворення перших дефектів складає порядку від двох до п'яти діб після початку випробувань. Вже через місяць, після початку натурно-прискорених випробувань, корозійні пошкодження займали більше 50% поверхні, а через 3 місяці – до 90%.

Як відомо, концентрація хлоридів є одним із факторів атмосферної дії, яка найбільше впливає на інтенсивність корозійного руйнування металічних матеріалів [5]. Різні концентрації солі були обрані із метою отримання даних для розроблення методу моделювання розвитку пітингоподібних дефектів.

Дані про форму та геометричні розміри дефектів, які були отримані при скануванні поверхонь зразків оптичним 3D-профілографом Micron-alpha, порівнювались із результатами моделювання (рис. 1).

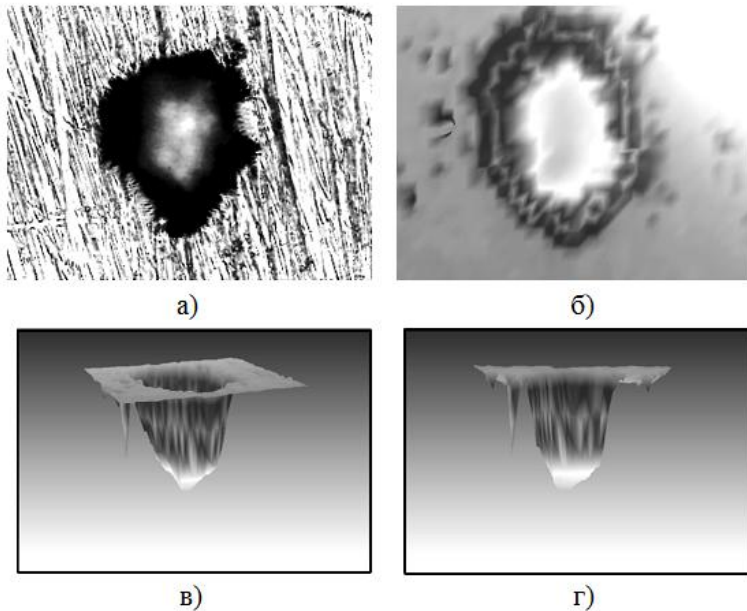


Рисунок 1 – Зображення реального пітинга (а), змодельованого (б) та 3D-профілю (в, г) із оптичного профілографа Micron-alpha на поверхні зразків сталі 08X18H10T

Характер розвитку дефекту під час моделювання суттєво залежав від різних початкових умов – відмінними були форми змодельованого пітинга та рН на поверхні каверни, після завершення процедури симуляції.

Швидкість корозії із часом знижується. Даний процес обумовлений утворенням шару продуктів корозії на поверхні зразка, який перешкоджає доступу кисню. При натурно-прискорених випробуваннях, площа корозійних уражень уже після 3 місяців, складає до 95% (діаметр скупчень пошкоджень доходить до 10 мм) із утворенням щільного шару продуктів корозії. Після випробувань без додаткового нанесення розчину солі на протязі 1-го року площа корозійних пошкоджень складає близько 50% від поверхні із набагато меншим діаметром вогнищ корозії (≤ 1 мм), тобто поверхня залишається більш доступною для дії корозійно-активних компонентів, в результаті чого швидкість корозії продовжує збільшуватись. Таким чином при натурно-прискорених випробуваннях на протязі року експозиції швидкість корозії сплаву досягла максимального значення, яке згодом знизилось, а у подальшому змінювалось незначним чином. Завдяки моделюванню із застосування методу коміркових автоматів тривалість досліджень можна скоротити у десятки разів та отримати результати на протязі однієї доби.

На рис. 2. у вигляді діаграми показані зміни механічних властивостей зразків зі сталі 08X18H10T після проведення прискорених випробувань на протязі 1-го року та при моделюванні методом коміркових автоматів.

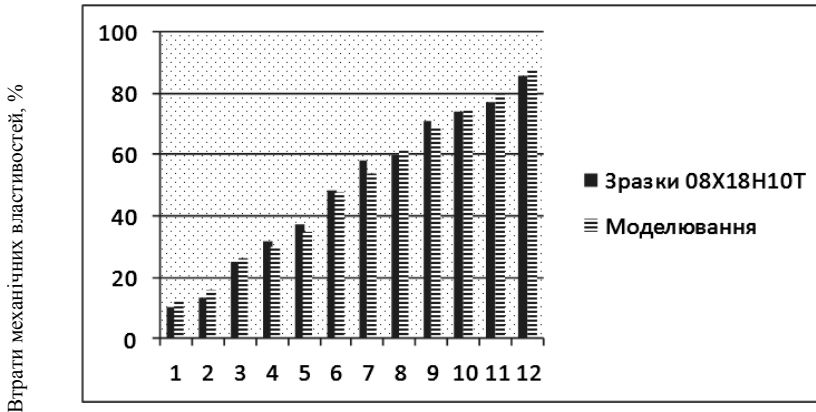


Рисунок 2 – Втрати механічних властивостей зразків сталі зі сталі 08X18H10T, отриманих шляхом випробувань та шляхом моделювання.

Як видно із рис. 2. різниця між даними, отриманими експериментальним методом та в результаті симуляції мають високий ступінь кореляції. Варто зазначити, що при натурній експозиції значно знижується рівень пластичності матеріалу. При періодичному нанесенні на поверхню зразків із досліджуваної сталі 08X18H10T солі у концентраціях 5 та 10 г/л різниця у швидкості пітингової корозії є мінімальною.

Висновки. Моделювання процесів пітингової корозії металів та сплавів запропонованим методом із використанням коміркових автоматів у порівнянні із прискореними випробуваннями у лабораторних умовах та випробуваннями у відкритій атмосфері дають можливість значно скоротити тривалість досліджень не впливаючи на механізм корозійного руйнування.

Список літературних джерел

1. Burstein G.T., Liu C., Souto R.M., Vines S.P. Origins of pitting corrosion // Corros. Eng. Sci. Technol. – 2004. – 39, 25p.
2. Di Caprio D., Vautrin – Ul C., Stafiej J. et al. Cellular automata approach for morphological evolution of localised corrosion // Corrosion Engineering, Science and Technology. – 2011. – 46, P. 223 – 227.
3. Pidaparti R., Palakal M. Fong. L. Cellular automata approach to aircraft corrosion pit growth.//Int. J. Artif. Intell. –2005.– 14 – P. 361–366.
4. Пат. 99736 Україна, МПК G01N 17/00. Спосіб підвищення точності моделювання пітингової корозії на металічних поверхнях із використанням коміркових автоматів / Б.П. Русин, Р.В. Торська. – № 201412025; заявл. 06.11.2014; опубл. 25.06.2015, Бюл. №12. – 4с.
5. Cao J., Wang Y., Li K., Ma Y. Modeling the diffusion of chloride ion in concrete using cellular automaton // J. Mater. Civ. Eng. – 2012. – 24(6), P. 783 – 788.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОРРОЗИОННОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННЫХ ПЛАСТИН

А.А. Черкасов

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Плосконапряженные пластины (ПНП) находят широкое применение как конструкторские элементы оборудования химических предприятий. Такие конструкции функционируют в агрессивных средах, вызывающие коррозионные разрушения металла. Это приводит к изменению начальных геометрических характеристик, увеличению напряжений в элементах, снижению несущей способности и преждевременному, нередко аварийному, выходу из строя. Как правило, механическое напряжение интенсифицирует процесс коррозии, что серьезно усложняет задачу моделирования процесса коррозионного деформирования.

Существуют программные комплексы на основе метода конечных элементов (SCAD, NASTRAL, ANSYS, FlexPDE, Mathematica) в большинстве не позволяющие учитывать коррозионные процессы при расчете конструкций. Это обуславливает актуальность разработки программных комплексов, позволяющие производить прочностные расчеты с учетом физико-химических процессов в конструируемых элементах. Необходимой составной частью таких программных комплексов является интерфейс ввода информации для формирования условий решаемой задачи и вывода результатов полученного решения.

В частности, интерфейс вывода должен представлять результаты решения, в данном случае – значения напряжений в пространственных и временной координатах. В существующих программных комплексах вывод информации о напряженном состоянии ведется в виде текстовых файлов, содержащих значения напряжений в конечных элементах в некоторые моменты времени. В таком виде информация с трудом воспринимается пользователем и может быть интерпретироваться неверно, особенно если пользователь не является специалистом в данной предметной области.

Автором предлагается интерфейс вывода результатов решения задачи моделирования процесса коррозионного деформирования ПНП, который позволяет упростить восприятие и интерпретацию полученного решения.

Данный программный комплекс был разработан с использованием современного объектно-ориентированного языка программирования Java и интегрированной среды разработки программного обеспечения IntelliJ IDEA. Данный язык содержит большие возможности для создания разнообразных программных комплексов с использованием сложных вычислений, он также является кроссплатформенным, что позволяет запускать разработки на разных операционных системах. IntelliJ IDEA – первая Java IDE с широким набором интегрированных инструментов для рефакторинга, которые позволяют быстро реорганизовывать исходные тексты программ. Дизайн среды ориентирован на продуктивность работы и концентрацию при разработке функциональности. Среда разработки также предоставляет интегрированный инструментальный для разработки графического пользовательского интерфейса. Данная программа предоставляет возможность вывода чертежа (рисунка) элемента с указанием размеров, граничных условий, условий нагружения. Интенсивность напряжений представляется в виде окрашенных областей конструкции в цветовом диапазоне, соответствующем изменению напряжений от близких к нулю до критических. Для визуализации изменений напряжений во времени в окне вывода предусмотрено использование специального ползунка.

Разработанный интерфейс является удобным и интуитивно понятным в использовании.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХНАПРЯЖЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ
Н.А. Черняк, В.В. Марасанов

Херсонский национальный технический университет, Херсон

Введение. Модель сверхнапряженной транспортной сети. Городская дорожно-транспортная сеть состоит из перекрестков и взаимосвязанных дорог. Можно моделировать динамику процессов в сверхнапряженных транспортных сетях, принимая очереди перед перекрестками в качестве переменных состояния системы. Рассмотрим простое пересечение дорог с односторонним движением при запрещении поворотов на этом перекрестке (рис. 1) [1].

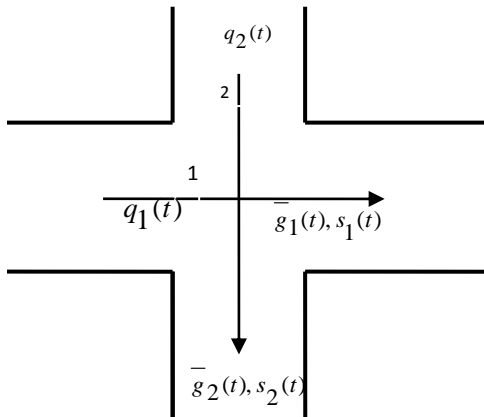


Рисунок 1 — Сверхнапряженный перекресток

Пусть $q_i(t)$ означает число транспортных средств, приближающихся к перекрестку в направлении i . Пусть на рис. 1 $i = 1$ обозначает горизонтальное направление движения, $i = 2$ — вертикальное направление, а s_i — насыщение потока транспортных средств в направлении i , иначе говоря, максимальное число транспортных средств, которые могут пройти в направлении i через перекресток за один цикл работы светофора, т. е. пока в этом направлении включен разрешающий движение зеленый сигнал. Величина C определяет продолжительность полного периода работы светофора во времени и l — время работы желтого сигнала светофора. Тогда $C = G_1 + G_2 + l$, где G_i при $i = 1, 2$ — время включения зеленого сигнала в i -м направлении. Пусть $\bar{g}_i(t)$ — это средняя скорость прохождения транспортных средств через перекресток (число транспортных средств, движущихся в i -м направлении, отнесенное к периоду C). Определим как управляемую переменную $u_i(t)$ — относительную долю работы зеленого сигнала в направлении i . Тогда

$$u_i(t) = \frac{\bar{g}_i(t)}{s_i(t)} = \frac{G_i}{C}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

В этой формуле время полного цикла работы светофора C известно и неизменно [2].

Если время C постоянно, то достаточно иметь только одно управление $u = u_i$. Тогда управление движением в другом направлении находится из выражения $(C - u_i - 1)$. Управления u должны удовлетворять ограничениям в форме неравенств

$$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}.$$

Теперь определим переменные состояния $x_i(t)$ как длину очереди транспортных средств перед перекрестком в направлении i . Тогда за время одного цикла работы светофора изменение очереди может быть описано следующим образом:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + q_i(k) - \bar{g}_i(k) = x_i(k) + q_i(k) - s_i u_i(k). \quad (2)$$

Так как очереди перед перекрестками существуют на практике, то для них должны быть установлены ограничения в форме неравенств

$$0 \leq x_i(k) \leq x_{i\max}.$$

В связи с тем, что оценка средней скорости движения транспортных средств через перекресток проводилась за период времени длительностью в один цикл работы светофора, то вне этого периода эффектом разброса скорости (из-за обгона) на взаимосвязанных дорогах можно пренебречь. Поэтому можно представить модель взаимосвязанных дорог в виде схемы, состоящей из элементов с чистым запаздыванием. На рис. 2 приведена модель дороги с двумя перекрестками.

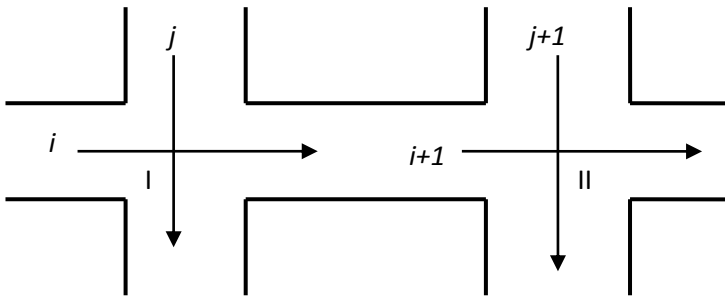


Рисунок 2 – Модель взаимосвязанных дорог

Для этой модели имеет место равенство

$$q_3(k) = s_1 u_1(k - m),$$

где u_1 - управление на перекрестке 1; s_1 — насыщение горизонтального потока транспортных средств через перекресток 1 и m — число единиц времени (число периодов работы желтого светофора), затрачиваемое потоком на преодоление расстояния между двумя перекрестками [3].

Распространяя эту модель на всю дорожную сеть, легко видеть, что динамика подобной сети, содержащей n перекрестков, может быть описана линейными векторными разностными уравнениями в форме

$$x(k+1) = Ax(k) + B_0 u(k) + B_1 u(k-1) + \dots + B_m u(k-m) + v, \quad (3)$$

где A — единичная матрица n -го порядка для сети с n очередями; $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ — длины очередей перед перекрестками; $B_j (j = 0, 1, \dots, m)$ — соответствующие матрицы; u — g -мерный вектор для управления g светофоров и v — вектор, который учитывает внешние входы (например, транспортные средства, прибывающие в город).

Основная часть

Для исследуемой системы подходящей критериальной функцией является выражение

$$J = \min_{u(k)} \sum_{k=1}^{(K-1)} \left[\frac{1}{2} \|x(k)\|_Q^2 + \frac{1}{2} \|u(k) - u^0\|_R^2 \right], \quad (4)$$

где Q и R — диагональные весовые матрицы, а u^0 — номинальный вектор управления, выбранный заранее с целью максимизации эффекта от использования транспортной сети.

Введение выражения $\frac{1}{2} \|u(k) - u^0\|_R^2$ не является достаточно оправданным с практической точки зрения. Оно было введено по существу для того, чтобы представить данную задачу в стандартной форме. По этой причине коэффициенты матрицы R обычно выбирают так, чтобы сделать величину $\frac{1}{2} \|u(k) - u^0\|_R^2$ очень малой по сравнению с величиной J. По существу такая критериальная функция позволяет минимизировать временные задержки перед перекрестками, штрафую рост очередей.

Задача оптимизации транспортной сети представляет собой как раз тот случай, где непосредственно может быть применен алгоритм Тамуры, учитывающий временные запаздывания. В качестве примера рассмотрим небольшой участок транспортной сети, показанный на рис. 3.

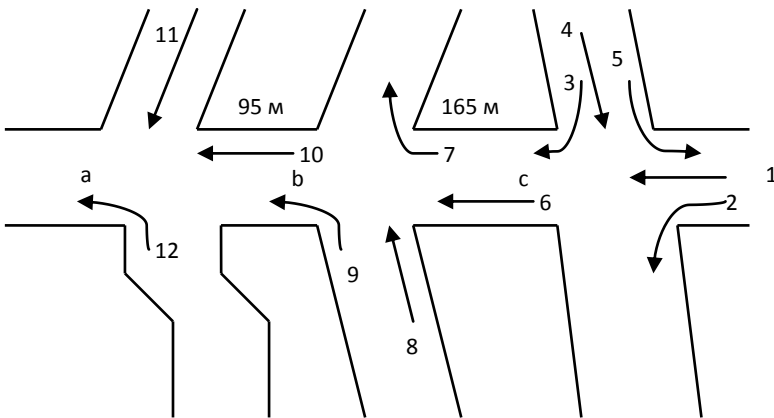


Рисунок 3 – Перекрестки a, b, c дорожной сети

Участок транспортной сети состоит из трех перекрестков. Трудности регулирования движением на этом участке связаны еще с тем, что данные перекрестки расположены очень близко один от другого и от соседних перекрестков, так что крайне ограничены возможности, связанные с использованием проездов между перекрестками. Поэтому нельзя ослабить жесткие требования ограничивающих неравенств. При существующей структуре управления исследуемая система располагает следующими тремя управлениями [4]:

u_1 — сигналы, разрешающие движения потоков 1 и 2;

u_2 — сигналы, разрешающие движение потоков 6 и 7 с двухцикловой задержкой потока, направляемого сигналом u_1 ;

u_3 — сигналы, разрешающие движение потоков 10 и 12 с одноцикловой задержкой потока, направляемого сигналом u_2 ;

Длительность полного цикла работы светофора для всех перекрестков составляет 1 мин, а время включения желтого сигнала 6 с. Время, затрачиваемое транспортом на прохождение пути между перекрестками с и b, составляет 2 мин, а между перекрестками b и а — 1 мин.

Расчетные значения управлений были выбраны следующими: $u_1^0 = 0,45$, $u_2^0 = 0,30$, $u_3^0 = 0,50$. Новые переменные управления были определены как отклонения от этих величин.

Таким образом, $\Delta u_1 = u_1 - 0,45$; $\Delta u_2 = u_2 - 0,3$; $\Delta u_3 = u_3 - 0,5$.

Между 17.00 и 18.00 ч. были проведены измерения числа транспортных средств на дорогах этой сети и насыщенность потоков. Базируясь на этих данных, уравнения состояния записаны в векторно-матричной форме

$$x(k+1) = I_{12}x(k) + B\Delta u(k) + B_1\Delta u(k-1) + B_2\Delta u(k-2) + v,$$

где I_{12} - единичная матрица 12-го порядка;

$$v^T = [-2,1,6; -8,2; 8,4; 7,7; 9,2; 2,5; 6,1,6,2; -6,4,2; -16,4; -8,4; -33,6; -10,5].$$

Критериальная функция выбрана в виде

$$J = \sum_{k=0}^3 \left[\|x(k)\|_Q^2 + 100 \|u(k) - u^0\|_R^2 \right],$$

где $R = I_3$; Q — диагональная матрица 12-го порядка с элементами главной диагонали;

$$Q_d = [1; 1; 1; 1; 1; 5; 1,5; 1; 1; 2; 1; 1].$$

$$B = \begin{bmatrix} -65 & 0 & 0 \\ -25 & 0 & 0 \\ 34 & 0 & 0 \\ 31 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 \\ 0 & -64 & 0 \\ 0 & -26 & 0 \\ 0 & 132 & 0 \\ 0 & 34 & 0 \\ 0 & 0 & -96 \\ 0 & 0 & 90 \\ 0 & 0 & 25 \end{bmatrix}; \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 42,7 & 0 & 0 \\ 18,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

В весовой матрице Q предпочтение отдается состояниям x_6, x_7, x_{10} из-за ограничения пропускной способности дороги между перекрестками b и а. Заметим, что в критериальной функции были учтены только три временных интервала по причине высокой изменчивости транспортного потока [5]. В этих условиях было бы нереалистичным предсказывать значения транспортных потоков, которые волютуются в сеть через время более 3—4 интервалов. Ограничения состояний и управлений были выбраны следующими:

$$0 \leq x_i \leq 40, \quad i=1,2,3,8,9,11,12; \quad 0 \leq x_i \leq 80 \quad i=4,5; \quad 0 \leq x_i \leq 50, \quad i=6,7; \quad 0 \leq x_{10} \leq 25;$$

$$-0,25 \leq \Delta u_1 \leq 0,25; \quad -0,1 \leq \Delta u_2 \leq 0,4; \quad -0,3 \leq \Delta u_3 \leq 0,2.$$

В качестве начальных условий для этой довольно загруженной сети были выбраны следующие значения:

$$x_i(0) = 30, i=1,2,8,9,11,12; x_i(0) = 70, i=3,4,5; x_i(0) = 40, i=6,7; x_{10}(0) = 20.$$

С помощью ЭВМ при использовании алгоритма Тамуры было найдено оптимальное значение основной и двойственной критериальных функций. Критериальные функции равны $0,284 \cdot 10^5$. В табл. 1 представлена последовательность оптимальных управлений, а на рис. 4 – траектория состояния системы при реализации оптимального управления [5].

Таблица 1 – Последовательность оптимальных управлений

k	1	2	3
u_1	20%	20%	20%
u_2	70%	68%	61%
u_3	61%	62%	63%

Заметим, что длина очередей x_3, x_4, x_5 снижается незначительно. Причиной этого являются высокая интенсивность потоков q_3, q_4, q_5 по сравнению с пропускной способностью улиц S_3, S_4, S_5 для этих потоков. И несмотря даже на то, что управление u_1 обеспечивает для очередей максимальное время включения зеленого сигнала, пропускная способность улицы по этим направлениям слишком мала чтобы ликвидировать очереди. Это же обстоятельство является причиной, почему данный дорожный участок является чрезвычайно напряженным местом.

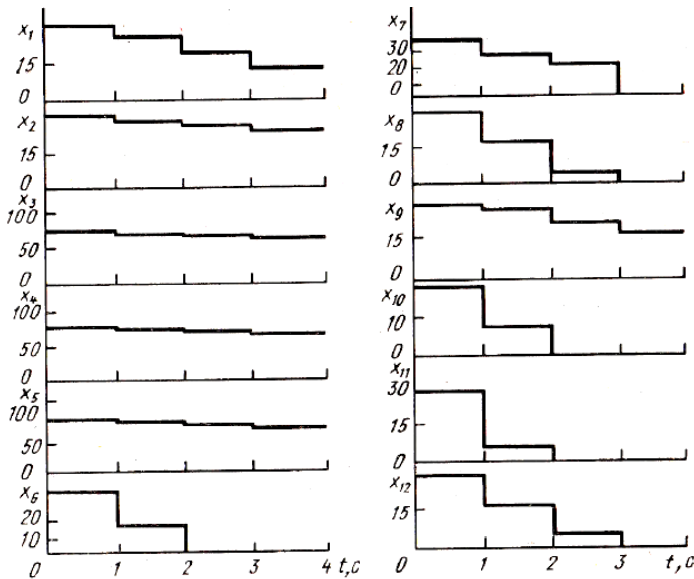


Рисунок 4 – Оптимальные траектории состояний для участка дорожной сети

Если не организовать регулирование движения, близкое к оптимальному, очереди x_3, x_4, x_5 будут достигать соседних перекрестков. С другой стороны, при использовании оптимального управления, вычисленного в данном примере, длины всех остальных очередей уменьшаются до незначительных и даже критические очереди x_3, x_4, x_5 не увеличиваются.

Выводы. В статье описан метод моделирования сверхнапряженной дорожной сетью. В качестве примера рассмотрен участок транспортной сети, в котором применяется алгоритм Тамуры для оптимизации управления движения транспорта в этой сети.

Список литературных источников

1. М. Сингл, А. Титли. «Системы: декомпозиция, оптимизация и управление» М.: Машиностроение, 1986
2. Тамура Н. «Децентрализованная оптимизация распределенных моделей дискретных систем». IEEE. Сделка 1974 года, SMC 4, стр. 424-429.
3. Сингл М. Г. «Динамика иерархического контроля». - Амстердам; Северная Голландия 1977.
4. Тамура Н. «Методы разложения в крупных системах с управления». 1973.
5. Тамура Н. Децентрализованная оптимизация распределенных моделей дискретных систем. - Автоматика, 1975.

**ВИКОРИСТАННЯ ПОКАЗНИКА ХСК СТИЧНИХ ВОД ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СТАНЦІЙ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ
Ю.В.Шатохіна, І.М. Іванова, Л.М.Клінов**

Чернігівський національний технологічний університет, Чернігів.

Захист водних об’єктів від забруднення має для України дуже важливе значення, а основним джерелом забруднення є скиди недостатньо очищених стічних вод. Практично 100% діючих спеціалізованих каналізаційно-очисних споруд (КОС) не забезпечують необхідний рівень очищення за окремими компонентами [1]. Якість процесу очищення стічних вод залежить від багатьох чинників, у тому числі, від існуючої нестабільності складу вхідного потоку [2]. Управління процесом очищення стічних вод передбачає контроль показника біохімічного споживання кисню за 5 діб (БСК_{5а}) на вході і виході з каналізаційно-очисної станції. У роботі [3] було проведено математичне моделювання роботи реальної станції біологічного очищення стічних вод в різні періоди року з урахуванням метеоумов за допомогою коефіцієнта ефективності очищення (K_e):

$$K_e = \frac{BCK_{5a}}{BCK_{5b}}, \quad (1)$$

де БСК_{5а} – фактичні дані вхідної стічної води, БСК_{5в} – фактичні дані очищеної стічної води на виході з очисної станції.

Виявлено, що у розглянутому періоді (півтора року), коефіцієнт ефективності роботи КОС виявляв нестабільність і змінювався від 10 до 60 одиниць.

Розрахунковий коефіцієнт ефективності очищення (K_{ep}) визначено за допомогою пакету Microsoft Excel 7.0, методом найменших квадратів. Математичні моделі, які описують ефективність біологічного очищення стічних вод на КОС, залежно від пори року, приведені у рівняннях (2-5). Коефіцієнта ефективності очищення розрахунковий K_{ep} отримано для кожної пори року в залежності від умов погоди. K_{ep} подано з індексами з-зима, в-весна, л-літо, о-осінь.

$$K_{ep}^{(3)} = -9,26224 + 0,094833 BCK_{5a} - 0,88698 t + 6,148887 T_d - 0,146978 T_c \quad (2)$$

$$K_{ep}^{(в)} = 7,963296 + 0,067499 BCK_{5a} + 0,119731 t + 0,532999 T_d \quad (3)$$

$$K_{ep}^{(л)} = 37,05196 + 0,052554 BCK_{5a} - 0,85182 t - 2,74194 T_d \quad (4)$$

$$K_{ep}^{(о)} = 16,13232 - 0,00397 BCK_{5a} - 0,01011 t + 2,345029 T_d \quad (5)$$

де t – температура повітря, оС ; T_d – кількість періодів по три години, за які зафіксовано проливні дощі; T_c – кількість періодів по три години плюсової температури протягом доби у зимовий період при наявності снігового покриву.

Якість отриманих моделей оцінювалась за допомогою коефіцієнта детермінації R^2 . Коефіцієнти детермінації становили для зимового періоду $R^2=0,92$, для весняного періоду $R^2=0,98$, для літнього періоду $R^2=0,80$, а для осіннього періоду $R^2=0,82$.

Як видно з приведених коефіцієнтів детермінації рівняння добре моделюють зміну коефіцієнта ефективності очищення K_{ep} , але їх використання стримує те, що отримати показник БСК₅ стічних вод за діючими методами можливо лише через 5 діб, що не дає змоги реалізувати своєчасні управлінські дії для поліпшення процесу очищення.

Метою даної роботи є знаходження оперативного методу отримання інформації про концентрацію БСК₅ у стічних водах. Для цього нами розглянуто залежність між БСК₅ і хімічним споживанням кисню (ХСК).

Залежність значень показників БСК₅ та ХСК від умовного часу, який зберігає послідовність відбору проб стічної води, показана на рис 1.

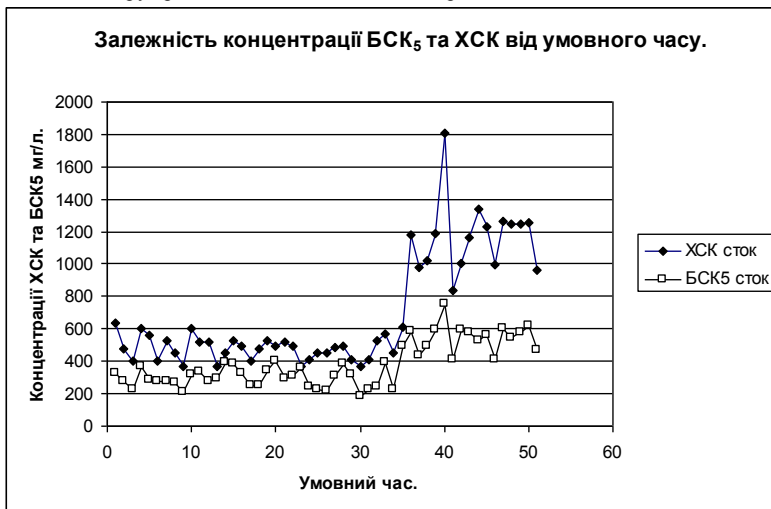


Рисунок 1 - Залежність концентрацій БСК₅ у стічних водах та ХСК від умовного часу.

Залежність БСК₅ від ХСК у стічних водах
Чернігівського КОС.

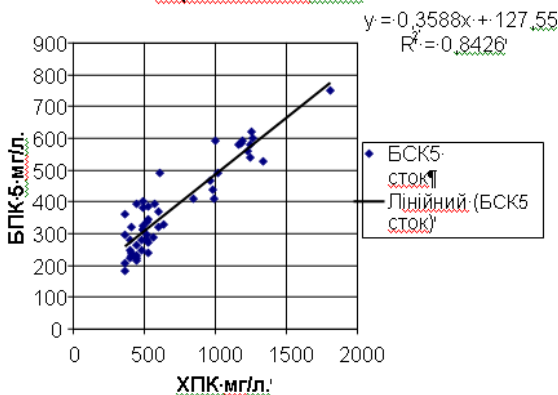


Рис 2 Графік залежності БСК₅ від ХСК у стічних водах.

Як видно з рис 1, існує синхронність зміни показників БСК₅ та ХСК, що можна використати для оперативного контролю якості стічних вод. За допомогою пакету Microsoft Excel 7.0 отримано методом найменших квадратів, графік залежності БСК₅ у стічних водах від ХСК.

Отримане лінійне рівняння регресії

$$\text{БСК}_5 = 0,3588 \cdot \text{ХСК} + 127,55 \quad (6)$$

добре описує кореляцію БСК₅ та ХСК, на що вказує коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,8426$.

Визначимо залежності ефективності очищення від показника ХСК за допомогою пакета аналізу Microsoft Excel, використовуючи функцію «регресія», отримуємо наступні рівняння:

$$K_{\text{ep}}^{(3)} = -17,5357 + 0,126145 \text{ХСК} - 0,47191t + 3,393515T_d + 0,315657T_c \quad (7)$$

$$K_{\text{ep}}^{(8)} = 8,480827 + 0,054673 \text{ХСК} + 0,419725t + 1,358747T_d \quad (8)$$

$$K_{\text{ep}}^{(9)} = 39,12782 + 0,050626 \text{ХСК} - 0,87613t - 3,62413T_d \quad (9)$$

$$K_{\text{ep}}^{(10)} = 18,2703 - 0,00975 \text{ХСК} - 0,03249t + 2,258795T_d \quad (10)$$

Зрозуміло, що коефіцієнти детермінації дещо зменшаться, так для

$K_{\text{ep}}^{(3)} R^2 = 0,818076$, для $K_{\text{ep}}^{(8)} R^2 = 0,726248$, $K_{\text{ep}}^{(9)} R^2 = 0,7938$, $K_{\text{ep}}^{(10)} R^2 = 0,848142$, але залишаються достатніми для практичного використання отриманих залежностей.

Використання рівнянь (7-10) дає можливість прогнозувати коефіцієнти ефективності роботи очисних споруд, а рівняння 6 дає змогу отримати дані про концентрацію БСК₅ у стічних водах не через 5 діб, а через 8 годин, при використанні стандартного методу [4]. Враховуючи той факт, що тривалість знаходження стічних вод на КОС з різною технологією змінюється від 10 годин до двох діб, то використання оперативних методів контролю дозволяє прогнозувати ефективність роботи станції і своєчасно прийняти відповідні міри для поліпшення якості процесу очищення.

Список літературних джерел

1. Щетинин А.И. Опыт реконструкции очисных сооружений с применением технологии нитро-денитрификации [Текст] / А.И.Щетинин, Ю.М.Мешенгиссер, М.А.Есин, Б.Ю.Малбиев, А.А.Реготун // Водопостачання та водовідведення. - 2011. - №3. - С.41-49.
2. Шатохіна Ю.В. Якість процесу очищення стічних вод як функція складу вхідного потоку [Текст] / Ю.В.Шатохіна, Л.М.Клінцов, О.М.Шкінь, Н.С.Мазюк // Технологічний аудит і резерви виробництва. - 2013. - №1/1(9), - С.36-38.
3. Шевченко О.О. Моделювання ефективності роботи станції біологічного очищення стічних вод [Текст] / О.О.Шевченко, В.А.Крупко, І.М.Іванова, Л.М.Клінцов // Східно-європейський журнал передових технологій. - 2014. - №5/10 (71) - С.26-28.
4. КНД 211.1.4.021-95. Методика визначення ХСК в поверхневих і стічних водах.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ САМООРГАНІЗАЦІЇ ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ О.В. Ющенко, Д.С. Юрко

Сумський державний університет, Суми

При створенні нових матеріалів, а також для більш доцільного застосування вже наявних великий інтерес представляє собою вивчення механізму пластичної деформації. Як відомо, в кристалах незворотні рухи дислокацій приводить до пластичної деформації, і останнім часом багато уваги приділяється саме моделюванню динаміки дислокаційних ліній. Однак, нарівні з лінійними дефектами величезний вплив на механічні властивості металів дають і точкові дефекти, такі як атоми домішок, вакансії та міжвузольні атоми. І, хоча розвиток теорії дислокацій допоміг описати безліч нюансів в поведінці металів при пластичній деформації, тим не менш, в деяких випадках (наприклад, повернення при низьких температурах зі стану наклепу) рухливими будуть саме міжвузольні атоми і вакансії, на відміну від дислокацій.

Наш підхід до опису пластичної деформації твердих тіл ґрунтується на динамічних рівняннях в континуальному представленні для густини матеріалу, швидкості зсуву та внутрішньої напруги з урахуванням наявності вакансій.

Основні рівняння нашої моделі визначаються гідродинамічною теорією, де вводиться допоміжна змінна (параметр m). Для кристалічного матеріалу цей параметр відповідає концентрації вакансій, а у випадку аморфного матеріалу його можна інтерпретувати як локальну долю вільного об'єму. Цей параметр зручно обрати у якості параметра порядку, який відрізняє твердий і пластичний стан матеріалу. Спряжене поле і керуючий параметр у такій системі зводяться до швидкості зсуву \mathbf{v} і внутрішньої напруги σ відповідно.

$$\begin{aligned} \dot{m} &= -\frac{m}{t_m} + \lambda_0 \nabla^2 \sigma + \lambda_0 A \nabla^2 m + g_m v \nabla^2 \mathbf{v}, \\ \dot{\mathbf{v}} &= \frac{1}{\bar{\rho}} \nabla \sigma + \frac{\eta_0}{\bar{\rho}} \nabla^2 \mathbf{v} - g_v m \sigma, \\ \dot{\sigma} &= \frac{\sigma_e - \sigma}{t_\sigma} - g_\sigma v m \nabla^2 \mathbf{v} + \sqrt{I} \eta(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Тут t_m , t_σ – характерні часи релаксації для відповідних параметрів; g_m , g_v , g_σ – позитивні константи зв'язку; λ_0 – кінетичний коефіцієнт, $\bar{\rho}$ – середнє значення густини середовища, A – перший коефіцієнт у розкладі Ландау, η_0 – в'язкість, v – кінематична в'язкість, σ_e – пружні напруги, що задаються зовнішнім впливом. При цьому ми врахувати випадкові зміни у часі керуючого параметра (пружних напружень) за допомогою стохастичного доданку $\eta(t)$ з інтенсивністю флуктуацій I . При цьому була використана модель білого шуму

$$\langle \eta(t) \rangle = 0, \quad \langle \eta(t) \eta(t') \rangle = \delta(t - t'). \quad (2)$$

Оскільки такий математичний опис є досить складним в аналітичних розрахунках, то був розглянутий одновимірний випадок.

Далі, використовуючи гідродинамічний масштаб часу $\tau = \eta_0 / G$, де G – модуль зсуву, можна скористатися адіабатичним наближенням

$$\frac{\tau}{t_m} \ll 1, \quad \frac{t_\sigma}{t_m} \ll 1. \quad (3)$$

Згідно умови (3) відповідний час релаксації концентрації вакансій досить великий і набагато перебільшує гідродинамічний масштаб τ і час релаксації напруг t_σ .

Для детерміністичного випадку при вирішенні системи (1) в рамках наближення (3) ми отримали рівняння Гінзбурга-Ландау-Халатнікова, що дає змогу визначити енергію утворення вакансій. Аналізуючи екстремальні значення останньої, були отримані два стани системи, що відповідають твердотільному стану та стану пластичної течії. Але при проведенні реальних експериментів дуже часто спостерігається деякий проміжний stick-slip режим, коли періоди пластичної течії чергуються з твердотільним станом.

Існування цього режиму в рамках поданої моделі можна довести лише з урахуванням стохастичного доданку. В результаті система трьох диференціальних рівнянь зводиться до рівняння Ланжевена, розподіл рішень якого визначається рівнянням Фоккера-Планка.

Аналізуючи даний розподіл, була побудована фазова діаграма, що задає області існування можливих станів системи: твердотільного стану (див. область T на рис.1), стану пластичної течії (область P) та стану переривчастої течії середовища (область SS).

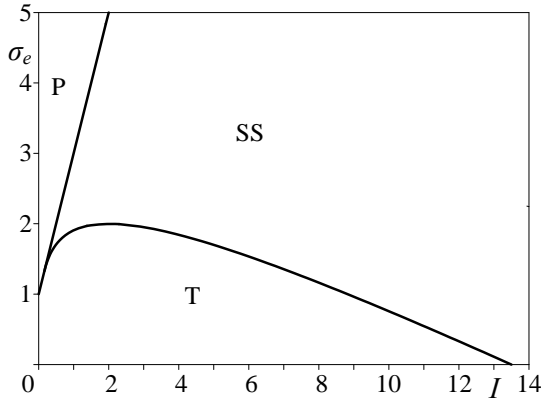


Рисунок 1 – Фазова діаграма системи під дією пружних напружень з середнім значенням σ_e та інтенсивністю флуктуацій I

Проведений розгляд показує, що використання моделі (1) дозволяє врахувати вплив точкових дефектів (вакансій і міжвузельних атомів) на самоузгоджену картину переходу з твердотілого стану до стану пластичної течії під дією зовнішніх навантажень. При цьому роль параметра порядку, що характеризує стан матеріалу, відіграє концентрація вакансій для кристалічних тіл або частина вільного локального об'єму для аморфних тіл.

В рамках адіабатичного наближення показано, що зі збільшенням концентрації вакансій кривизна швидкості зсуву зростає, а внутрішні напруження зменшуються нижче рівня, фіксованого зовнішніми умовами. Отримана з рівняння Гінзбурга-Ландау-Халатнікова енергія утворення вакансій набуває ненульового мінімуму, характерного для стану пластичної течії, за умови, що зовнішні напруги σ_e перевищують критичний рівень, який визначається параметрами середовища.

Крім того, показано, що в стаціонарному випадку просторовий розподіл концентрації вакансій має спадаючий вигляд, в той час як внутрішні напруження монотонно зростають. Врахування стохастичної складової в рівнянні для керуючого параметра приводить до появи двохфазного переривчастого режиму, коли система може випадковим чином переходити від твердотілого в текучий стан (так званий режим stick-slip). Також було з'ясовано, що такий режим може бути досягнутий навіть за відсутності зовнішньої напруги, якщо інтенсивність флуктуацій перевищує деяке критичне значення, що задається параметрами системи. При цьому реалізується поведінка характерна само організованій критичності.

СЕКЦІЯ 2

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ

- **оптимальне проектування конструкцій;**
- **оптимізація технологічних процесів;**
- **перспективні методи оптимізації.**

ЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ВНУТРИЗАВОДСКИМИ ПЕРЕВОЗКАМИ Р.Х. Ахмадов, Б.В. Карпенко

Национальный Технический Университет «Харьковский Политехнический Институт», Харьков

Введение. Задача управления внутризаводскими перевозками принадлежит к классу задач теории расписаний [1-2]. Существо типовой задачи из этого класса в общем состоит в следующем. Имеется набор заявок на обслуживание. Для каждой заявки задаётся кортеж её характеристик (например, время начала и предполагаемое время окончания выполнения; параметры, определяющие тип заявки и т.п.).

Обслуживание заявок осуществляется независимо функционирующими агрегатами различного типа. Это означает, что каждый конкретный агрегат может обслуживать заявку конкретного типа с эффективностью, зависящей от уровня соответствия их типов. Задача состоит в формировании плана назначений агрегатов для выполнения заявок, наилучшего с точки зрения выбранного критерия (например, суммарная стоимость или суммарная продолжительность обслуживания всех заявок).

Все задачи такого типа обладают некоторыми общими свойствами. Во-первых, это комбинаторные задачи. Это значит, что все они, в принципе, могут быть решены простым перебором. Следует, однако, иметь в виду, что в простейшем частном случае, когда каждый агрегат назначается для выполнения только одной заявки, имеется m агрегатов и n заявок ($n > m$), то число вариантов значения равно $N = C_n^m \cdot m!$. Если $m = 20$ и $n = 10$, то

$N \cong 7 \cdot 10^{11} N$. Полный перебор вариантов такого объёма практически неосуществим. Во-вторых, это задачи целочисленного (точнее, булевого) программирования. Если при этом ввести булев индикатор

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если для выполнения } j\text{-й заявки назначается } i\text{-й агрегат,} \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

то задача назначения может быть сформулирована следующим образом: найти набор $X = (x_{ij})$, который доставляет минимум линейной форме

$$L(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

и удовлетворяет ограничениям

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

где C_{ij} - стоимость обслуживания j -й заявки i -м агрегатом.

Для решения подобных задач существуют соответствующие методы. Один из первых методов решения задач типа (1)-(2) предложен Гомори Р [3]. Идея метода состоит в следующем. Определяется минимальная выпуклая оболочка R множества всех допустимых целочисленных решений задачи. Решению задачи соответствует некоторая целочисленная точка, принадлежащая R . Искомое решение достигается поэтапно. На первом этапе решается исходная задача линейного программирования со снятым требованием целочисленности. Если полученная точка оказывается целочисленной, то это решение задачи. В противном случае к исходным ограничениям добавляется новое, отсекающее полученную точку. Далее процедура повторяется. Принципиальный недостаток – медленная сходимость, связанная с увеличением сложности задачи на каждом шаге. Более эффективным является метод последовательного конструирования, анализа и отбора вариантов [4]. Суть метода состоит в последовательном, пошаговом конструировании искомого решения путем рассмотрения возможных вариантов продолжения, имеющегося к текущему шагу частичного решения и отсеивания бесперспективных вариантов с помощью специальных правил доминирования. Метод позволяет сократить число рассматриваемых по сравнению с полным перебором в $(n-1)!/2^n$ раз.

Несмотря на это, для реальных задач большой размерности вычислительные трудности, связанные с последовательным анализом вариантов, остаются существенными.

Другой важный подход к решению целочисленных задач линейного программирования состоит в использовании различных правил сокращения перебора множества целочисленных планов задачи. Так как такие задачи имеют конечное число целочисленных допустимых планов, то они могут быть в принципе решены их последовательным перебором и выбором наилучшего. Однако проблема размерности остается и здесь. Сокращение перебора обеспечивается использованием правил отсеивания заведомо не оптимальных вариантов. К числу таких методов относятся: аддитивный алгоритм Балаша [5] и метод ветвей и границ [6]. Основной недостаток этих методов состоит в невозможности прогнозировать время решения задачи, которое зависит от типа и структуры системы ограничений.

В связи с этим, возвращаясь к задаче управления внутривозовскими перевозками, следует отметить, что высокая её размерность ($n \approx m \approx 100$) практически исключает возможность использования известных классических методов решения целочисленных комбинаторных задач. Реальные перспективы решения подобных задач связаны с применением эвристических методов [7]. Эти методы лучше классических приспособлены к учету разнообразных особенностей конкретных задач, обеспечивая более адекватную их постановку и возможность получения более эффективных, хотя и приближенных решений.

Цель работы – разработка эвристического управления внутривозовскими перевозками с конструктивным учетом их специфики, обеспечивающего возможность оперативного управления в реальном времени.

Постановка задачи. Сформируем задачу построения системы управления внутривозовскими перевозками, реализующей эвристическую процедуру управления. Эта система должна функционировать так, чтобы успешно конкурировать с человеком, если в процессе ее создания заложить в нее совокупность данных о характеристиках всех элементов системы, набор правил, определяющих дисциплину обслуживания требований на перевозки грузов, перечень критериев оценки эффективности управления и, наконец, собственно алгоритм управления. Такая система принадлежит к классу управляющих экспертных систем (УЭС), теория построения которых в настоящее время стремительно развивается.

Рассмотрим задачу управления парком транспортных средств с использованием УЭС. Разнообразие типов элементов системы обслуживания совокупности заявок на перевозки грузов для крупного предприятия, особенности и специфика собственно задачи управления перевозками, необходимость учета большого числа различных требований к плану перевозок делают задачу построения соответствующей УЭС нетривиальной. Рассмотрим принципы построения, структуру и особенности реализации такой системы.

Система управления внутривозовскими перевозками.

Задача управления процессами передвижения материальных продуктов на предприятии является типичной задачей транспортной логистики. Эффективное решение таких задач особенно важно для крупных сборочных предприятий, в которых имеется большое количество производственных подразделений различного типа и складов (в том числе и для отходов).

Между элементами такой системы непрерывно и неравномерно перемещаются потоки материалов, комплектующих, полуфабрикатов, готовых изделий, объемы которых очень велики. Управление этими потоками обеспечивает экспертная система. Структура УЭС содержит следующие элементы.

Долговременная база данных представляет собой набор данных, которые являются неизменными или редко изменяются в течение продолжительного периода времени. Для парка автомашин это – формуляры транспортных средств (ТС), таблица совместимости типов груза с типом автомобиля, таблица совместимости автомобиля с пунктами погрузки и разгрузки, матрица расстояний от любого пункта погрузки/разгрузки к любому пункту разгрузки/погрузки.

Оперативная база данных содержит перечень заявок на перевозки грузов текущего дня. Сводка заявок поступает к началу работы очередной смены автопарка со всех цехов. Заявки содержат следующие атрибуты: время начала выполнения заявки, тип груза, пункт погрузки, пункт разгрузки, важность заявки, вес груза, ориентировочные продолжительности погрузки и разгрузки.

База знаний – это совокупность правил формирования групповых заявок и назначения ТС на перевозки грузов.

Назначение ТС на перевозки грузов.

Машина может быть назначена на выполнение заявки, если: она работоспособна, тип этой машины совместим с типом груза (типом заявки), она имеет грузоподъемность, позволяющую перевезти груз, может загрузиться в заданном пункте погрузки и выгрузиться в пункте разгрузки.

Механизм логического вывода (МЛВ) – предназначен для решения задачи управления перевозками. Перед началом работы алгоритма назначения ТС все заявки упорядочиваются заявленному времени начала их выполнения. Среди всех работоспособных ТС, которые могут выполнить очередную заявку, выбирается такой автомобиль, у которого коэффициент эффективности выполнения этой заявки наилучшей. Коэффициент эффективности выполнения заявки учитывает: время, когда автомобиль может выполнить заявку (если это не начало рабочей смены), как далеко ТС находится от пункта погрузки, какова его грузоподъемность, продолжительность погрузки/разгрузки, его скорость (если груз перевозится на большое расстояние - полигон), необходима ли ему дозаправка, дозаправка (для автокаров) и сколько на это уйдет времени. Заявки могут остаться неудовлетворенными только в тех случаях, когда требуемый объем перевозок выше возможностей автопарка.

Результатом работы управляющей экспертной системы являются набор маршрутных листов, каждый из которых: содержит постоянный номер машины, время начала выполнения заявки, тип груза, пункт погрузки/разгрузки, вес груза, продолжительности погрузки/разгрузки, вероятное время освобождения.

Дадим краткие пояснения по организации работы системы.

Общая схема работы механизма логического вывода такова. Для очередной заявки из массива ТС выбирается транспортное средство с наиболее ранним моментом освобождения от обслуживания заявок (в начале работы алгоритма эти моменты для всех ТС равны моменту начала рабочего дня). При расчете критерия эффективности, численного значения которого минимизируется, учитываются следующие факторы:

- совместимость типа груза заявки и пунктов погрузки и разгрузки с типом выбранного ТС;
- вес груза (не может превышать грузоподъемность ТС);
- расстояние между пунктом разгрузки для предыдущей заявки и пунктом погрузки для очередной (чем меньше, тем лучше);
- продолжительность интервала между моментом освобождения от обслуживания предыдущей заявки и моментом начала работы очередной (чем меньше, тем лучше); эта продолжительность не может превышать заданного значения, задаваемого при настройке;
- разность между грузоподъемностью выбранной машины и весом груза заявки (чем меньше, тем лучше);
- важность заявки (как можно выше);
- приоритет пары «ТС-заявка» (растет, если в первой половине рабочего дня пункт разгрузки расположен дальше от гаража, чем пункт погрузки, а также если, во второй половине дня пункт разгрузки ближе к гаражу, чем пункт погрузки);
- приоритет ТС, вышедшего из гаража, выше, чем ТС в гараже и растет с числом выполненных заявок;
- заявка может быть назначена для выполнения выехавшим из гаража ТС только в том случае, если продолжительность интервала времени между моментом окончания рабочего дня и моментом освобождения от обслуживания этой заявки не меньше заданного значения, задаваемого при настройке алгоритма.

Все необходимые данные вносятся в календарь (рис 1).

Соотношение для расчета критерия целесообразности назначения машины с номером j_0 для выполнения i – \dot{y} заявки имеет вид

$$F_{ij_0} = c(i, j_0) \max \{0, w_{j_0} - w_i \} n_{ij_0}, \quad (3)$$

№ ТС	Тип ТС	Время заявки	Пункт погрузки	Пункт разгрузки	Время освобождения	Вес груза	Грузоподъемность ТС	Приоритет	Признак выезда из гаража	Признак окончания работы
j	k_j	T_{3j}	q_i	l_i	T_j	W_i	W_j	Π_j	G_j	N_j

Рисунок 1 - Структура календаря.

где

$$c(i, j_0) = c_1(k_{j_0}, d_i) \cdot c_2(k_{j_0}, q_i) \cdot c_3(k_{j_0}, l_i),$$

$$\eta_{ij_0} = \frac{R_{pj_0, q_i} (T_{3j} - T_{0j})^2 (w_{j_0} - w_i + 0.1)^2}{c_i w_u 2^{\alpha_i \beta_i} [1 + (T_k - T_{j_0}) w_{j_0}]}, \quad (4)$$

$$c_1(k_{j_0}, d_i) = \begin{cases} 1, & \text{если тип ТС совместим с типом груза,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$c_2(k_{j_0}, q_i) = \begin{cases} 1, & \text{если тип ТС совместим с типом пункта,} \\ & \text{погрузки,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

$$c_3(k_{j_0}, l_i) = \begin{cases} 1, & \text{если тип ТС совместим с типом пункта,} \\ & \text{разгрузки,} \\ 0, & \text{в противном случае;} \end{cases}$$

w_{j_0} - грузоподъемность ТС с номером j_0 ,

w_i - вес груза для i -й заявки,

R_{j_0, q_i} - расстояние между пунктом разгрузки ТС с номером j_0 при обслуживании предыдущей заявки и пунктом погрузки для очередной i -й заявки,

T_{3i} - время начала выполнения i -й заявки,

T_{0j} - время освобождения ТС с номером j_0 ,

c_i - важность заявки,

T_k - время окончания рабочего дня,

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{R_{0, l_i}}{R_{0, q_i}} \geq 1 \text{ (т.е. пункт разгрузки дальше от гаража} \\ & \text{чем пункт погрузки),} \\ -1, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$\beta_j = \begin{cases} 1, & T_1 - T_{0j} \geq 0, \text{ т.е. освобождение происходит в первой половине дня,} \\ \frac{2}{2} \\ -1, & T_1 - T_{0j} < 0, \text{ т.е. освобождение происходит во второй половине дня.} \\ \frac{2}{2} \end{cases}$$

Таким образом,

$$\alpha_i \beta_j = \begin{cases} 1, & \text{если при выполнении } i\text{-й заявки происходит удаление } j\text{-го ТС} \\ & \text{от гаража в первой} \\ & \text{половине дня или приближены к гаражу – во второй половине дня,} \\ -1, & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$

Признак выезда из гаража

$$G_j = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-е ТС получило назначение и выехала из гаража,} \\ 0, & \text{ } j\text{-е ТС находится в гараже.} \end{cases}$$

Приоритет ТС:

$$P_j = T_k - T_{j_0} \quad (\text{приоритет тем выше, чем больше интервал от момента освобождения до}$$

момента окончания рабочего дня).

Признак окончания работы:

$$N_j = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-е ТС закончило работу и направлена в гараж,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Необходимые данные по выбранной для выполнения заявки вместе с данными о ТС используются при формировании маршрутного листа, в который вносятся: номер ТС, время готовности ТС (начало рабочего дня и время освобождения от обслуживания очередной заявки), пункт освобождения (в начале рабочего дня – гараж), пункт погрузки, пункт разгрузки, вес груза, продолжительность погрузки, продолжительность разгрузки, тип груза, время освобождения ТС после обслуживания очередной заявки, назначенное время начала выполнения заявки.

Понятно, что предложенный эвристический метод, как и любой ему подобный, не гарантирует получения наилучшего варианта назначений. Возможное направление усиления метода состоит в разработке многошагового управления с назначением ТС для выполнения не одной, а серии заявок одного типа, следующих одна за другой.

Выводы. Таким образом, разработан метод решения задачи управления внутривозовскими перевозками. В основе метода - эвристическая процедура назначения транспортных средств для выполнения заявок на перевозки, учитывающая требования заявок (вес и тип груза, время выполнения заявки, пункты погрузки и разгрузки и т.д.) и технические возможности транспортных средств. Процедура реализует последовательность рациональных назначений в соответствии с критерием, оценивающим уровень согласования требований заявок и возможностей транспортных средств.

Список литературных источников

1. Конвей Р.В. Теория расписаний / Р.В. Конвей, В.Л. Максвел, Л.В.Миллер . – М . Наука, 1975 – 468 с.
2. Танаев В.С. Введение в теорию расписаний / В.С. Танаев, В.В. Шкурба. – М. : Наука. 1995. – 256 с.
3. Гомори Р. Целочисленное программирование и оценки: Пер. с англ. /Р. Гомори, У. Бомоль. – Новосибирск, СО АА СССР, 1962. – 294с.
4. Михалевич В.С. Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение. - // «Кибернетика», 1965,- №1. – с.18-29.
5. Раскин Л.Г. Многоиндексные задачи линейного программирования / Л.Г. Раскин, И.О. Кириченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 240с.
6. Литтл Дж. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере. / Дж Литтл, К. Мурти , Д. Суини, К. Керел // «Эконом. и мат. методы», 1965, т.1, №1. – с. 48-60.
7. Подчасова Т.П. Эвристические методы календарного планирования / Т.П. Подчасова, В.М.Португал, В.А. Татаров, Шкурба В.В. – К.: Техника, 1980.-205с.

**ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРКАЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ
МОРФОЛОГІЧНОЇ БУДОВИ**

Ю.В. Гаврилук

Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпропетровськ

Аналіз у задачах перкаляції дозволяє оцінити вплив морфологічної будови (рис) на властивості як імовірність геометричного фазового переходу, виходячи із умов зв'язаності

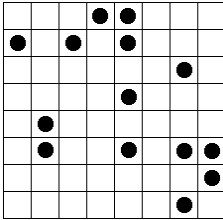
$$P = P_c^L$$

де P – імовірність геометричного фазового переходу;

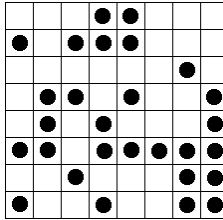
P_c – об'ємна частка гетерофази;

L – розмірність перкаляційної ґратки (L обернено пропорційна розміру часток а)

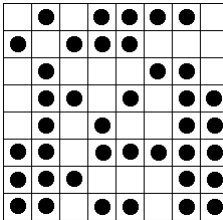
L визначаєм за рівнянням П.Ф. Ферхюльста



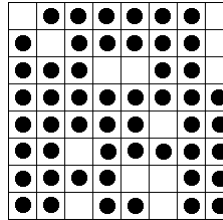
$P_c = 0.2, L=8$



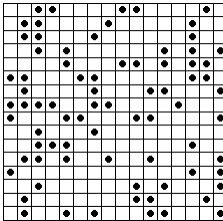
$P_c = 0.4, L=8$



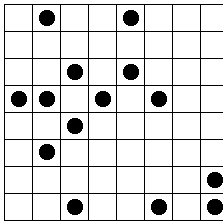
$P_c = 0.6, L=8$



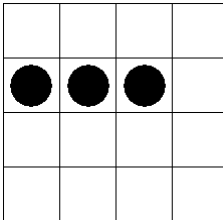
$P_c = 0.8, L=8$



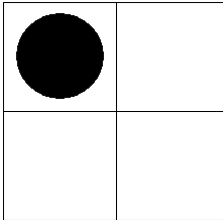
$P_c = 0.2, L=16$



$P_c = 0.2, L=8$



$P_c = 0.2, L=4$



$P_c = 0.2, L=2$

Рисунок – Приклади перкаляційних конфігурацій

РАСЧЕТ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ БИНЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ

В.А. Головки, Н.И. Ящук, Я. Хазим

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», Харьков

Введение. При решении многих конкретных задач в технике, экономике, экологии и т.д. исходные данные не точны и для их описания удобен аппарат нечеткой математики. При этом во многих случаях уровень неопределенности используемых при решении задач нечетких чисел таков, что они сами являются нечеткими числами. Такие нечеткие числа называются бинечетками [1-3]. Пусть, например, тройка чисел (a, b, c) , задающие носитель и модальное значение нечеткого числа, определяет соответствующую треугольную функцию принадлежности. Если при этом левая граница носителя этого числа задана нечетко, то соответствующее бинечетное число будет описываться семейством функций принадлежности. В этой ситуации для решения конкретных задач естественно использовать усредненную функцию принадлежности. Пусть нечеткое число z имеет треугольную функцию принадлежности, заданную на носителе $[a, c]$ с модальным значением $b \in [a, c]$:

$$\mu(z) = \begin{cases} 0, & z < a, \\ \frac{z-a}{b-a}, & a \leq z < b, \\ \frac{c-z}{c-b}, & b \leq z \leq c, \\ 0, & z > c. \end{cases} \quad (1)$$

Примем, что параметр a функции принадлежности $\mu(z)$ – нечеткое число с носителем $[a_1, a_3]$ и модальным значением a_2 :

$$\mu(a) = \begin{cases} 0, & a < a_1, \\ \frac{a-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq a < a_2, \\ \frac{a_3-a}{a_3-a_2}, & a_2 \leq a \leq a_3, \\ 0, & a > a_3. \end{cases} \quad (2)$$

Конкретные представители семейства функций принадлежности $\mu(Z)$ определяются значением нечеткого параметра a . Функция принадлежности (2) задает нормальное (высота равна единице) нечеткое число. Вычислим площадь под кривой $\mu(a)$:

$$S_a = \frac{1}{2} (a_3 - a_1).$$

Введем теперь функцию $f(a) = \frac{\mu(a)}{S_a}$. При этом понятно, что

$$\int_{a_1}^{a_3} f(a) da = \frac{1}{S_a} \int_{a_1}^{a_3} \mu(a) da = 1. \quad (3)$$

Неотрицательность $f(a)$ вместе с (3) позволяет интерпретировать $f(a)$ как плотность распределения случайной величины a , заданной на $[a_1, a_3]$. Тогда левую ветвь усредненной функции принадлежности нечеткого числа Z можно описать формулой:

$$\mu(z) = \int_{-\infty}^{a_3} \mu(z, a) \mu(a) da$$

С другой стороны, понятно, что искомое аналитическое соотношение имеет вид:

$$r(z) = \frac{z - \bar{a}}{b - \bar{a}}, \quad z \in [\bar{a}, b],$$

где \bar{a} - среднее значение параметра a .

Найдем это значение.

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \frac{2}{a_3 - a_1} \left[\int_{a_1}^{a_2} a \frac{a - a_1}{a_2 - a_1} da + \int_{a_2}^{a_3} a \frac{a_3 - a}{a_3 - a_2} da \right] = \frac{2}{(a_3 - a_1)(a_2 - a_1)} \cdot \frac{a^3}{3} \Big|_{a_1}^{a_2} - \frac{2a_1}{(a_3 - a_1)(a_2 - a_1)} \cdot \frac{a^2}{2} \Big|_{a_1}^{a_2} + \\ &+ \frac{2a_3}{(a_3 - a_1)(a_3 - a_2)} \cdot \frac{a^2}{2} \Big|_{a_2}^{a_3} - \frac{2}{(a_3 - a_1)(a_3 - a_2)} \cdot \frac{a^3}{3} \Big|_{a_2}^{a_3} = \frac{2(a_2^3 - a_1^3)}{3(a_3 - a_1)(a_2 - a_1)} - \frac{2a_1(a_2^2 - a_1^2)}{2(a_3 - a_1)(a_2 - a_1)} + \\ &+ \frac{2a_3(a_3^2 - a_2^2)}{2(a_3 - a_1)(a_3 - a_2)} - \frac{2(a_3^3 - a_2^3)}{3(a_3 - a_1)(a_3 - a_2)} = \frac{2(a_2^2 + a_1a_2 + a_1^2)}{3(a_3 - a_1)} - \frac{a_1(a_2 + a_1)}{(a_3 - a_1)} + \frac{a_3(a_3 + a_2)}{(a_3 - a_1)} - \\ &- \frac{2(a_3^2 + a_2a_3 + a_2^2)}{3(a_3 - a_1)} = \frac{2a_1a_2 + 2a_1^2 - 3a_1a_2 - 3a_1^2 + 3a_3^2 + 3a_3a_2 - 2a_3^2 - 2a_2a_3}{3(a_3 - a_1)} = \\ &= \frac{-a_1a_2 - a_1^2 + a_3^2 + a_2a_3}{3(a_3 - a_1)} = \frac{a_2(a_3 - a_1) + a_3^2 - a_1^2}{3(a_3 - a_1)} = \frac{a_2 + a_3 + a_1}{3}. \end{aligned}$$

Кроме того, значение плотности распределения $f(a)$ параметра a позволяет определить граничные функции принадлежности нечеткого числа z уровень принадлежности которого возможному диапазону $[a_1, a_3]$ не ниже заданного c . С этой целью найдем предварительно граничные значения параметра a , решая уравнения

$$\begin{aligned} \frac{a_{\Lambda} - a_1}{a_2 - a_1} &= c, \\ \frac{a_3 - a_{\Pi}}{a_3 - a_2} &= c. \end{aligned} \tag{5}$$

Отсюда имеем:

$$a_{\Lambda} = a_1 + c(a_2 - a_1), \quad a_{\Pi} = a_3 - c(a_3 - a_2).$$

Тогда искомые соотношения для левой и правой ветвей граничных функций принадлежности имеют вид:

$$\begin{aligned} r_{\Lambda}(z) &= \frac{z - a_{\Lambda}}{b - a_{\Lambda}}, \quad z \in [a_{\Lambda}, b], \\ r_{\Pi}(z) &= \frac{a_{\Pi} - z}{a_{\Pi} - b}, \quad z \in [b, a_{\Pi}] \end{aligned}$$

Аналогичные расчеты могут быть проведены и в тех ситуациях, когда другие параметры функции принадлежности исходного нечеткого числа z заданы нечетко.

Список литературных источников

1. Zadeh L. Fuzzy Sets. Information and Control. – 1965. – vol 8(3). p. 338-358.
2. Дюбуа Д. Теория возможностей: Пер. с франц. В.Б. Тарасова / Д. Дюбуа, А. Прад. – М. Радио и связь, 1990. – 286с.
3. Раскин Л.Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / Л.Г. Раскин, О.В. Серая. - Х.: Парус, 2008 – 352с.

ЛОГИСТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАКУПКАМИ РЕСУРСОВ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ

А. В. Елизева

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Современная экономика находится в кризисном положении, характеризуется низкой эффективностью инновационной деятельности и снижением конкурентоспособности отечественной продукции. Повышение активности инновационной деятельности является существенным фактором при формировании рыночных отношений, что приводит к росту производительности труда, повышению качества отечественной продукции, стабилизации цен. Однако внедрение инноваций может вызвать значительные трудности в производстве продукции новых видов, что обусловлено недостатком или несвоевременной поставкой качественных материально-технических ресурсов (МТР). Поэтому оперативное решение логистических задач поставки новых МТР, определение необходимого объема и номенклатуры закупаемых МТР, выбор новых поставщиков является актуальной задачей.

На каждом этапе жизненного цикла (ЖЦ) продукции (роста, зрелости, упадка) принимаются решения по логистическому управлению. При переходе на новый этап ЖЦ возникают изменения в производственно-логистической системе, связанные с результатами предпроектных исследований спроса на выпускаемую продукцию. Особенность каждого этапа ЖЦ характеризуется изменениями параметров внешней среды, планируемыми целями, изменениями в производственно-логистической системе и соответствующими управляющими действиями для решения задач управления закупками МТР.

Согласно результатам маркетинговых исследований на этапе роста происходит увеличение объема спроса на выпускаемую продукцию, что приводит к изменению объема производства продукции, и, следовательно, объема ресурсов, необходимых для производства. Обеспечение производства МТР требует переопределения видов и объемов закупаемых ресурсов, что приводит к необходимости принятия управленческих решений по выбору поставщиков и определению их количества.

На этапе зрелости в условиях стабильного объема сбыта для обеспечения конкурентоспособности продукции возникает задача закупки комплектующих более высокого качества или более производительного оборудования. Таким образом, необходимо определить количества закупаемых видов МТР, следовательно, возникает задача выбора наиболее предпочтительных поставщиков, которые обеспечат поставку ресурсов требуемого качества и объема.

Этап упадка ЖЦ продукции связан с разработкой новых видов продукции (или существенной модернизации производимой), что обусловлено снижением объема сбыта. При этом необходимо решать такие логистические задачи, как определение объемов закупки материальных ресурсов (МР) для новых видов продукции; определение номенклатуры закупаемых МР; определение видов и количества нового оборудования; выбор поставщиков МТР.

Указанные логистические задачи на каждом этапе ЖЦ решены с помощью моделей математического программирования, что позволяет найти оптимальные решения.

Список литературных источников

1. Неруш, Ю.М. Логистика: учеб [Текст]. – 4-е изд. / Ю.М. Неруш. – М.: Проспект, 2006. – 520 с.
2. Гаджинский, А.М. Практикум по логистике [Текст] / А.М. Гаджинский. – 8-е изд. – М.: Дашков и К, 2009 – 312 с.
3. Семененко, А.И. Логистика. Основы теории: уч. для вузов [Текст] / А.И. Семененко, В.И. Сергеев. – СПб: Союз, 2003. – 544 с.
4. Синица, Л.М. Организация производства: уч. пособие [Текст] / Л.М. Синица. – Мн.: УП «ИВЦ Минфина», 2003. – 512 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ КОМФИ
НА ОСНОВЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В РЕЖИМЕ
ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ КОГНИТИВНЫХ КАРТ
А.В. Горячая**

Национальный горный университет, Днепропетровск

В ходе работы рассмотрены методы адаптивного и координирующего управления динамическими режимами когнитивных моделей сложных систем. В основе когнитивного моделирования находится когнитивная карта (КК), которая представляет взвешенный ориентированный граф, вершины (узлы) которого отражают компоненты сложных систем (координаты, факторы, подразделения), а ребра описывают связи между этими факторами [1].

На предприятии Комфи для выполнения главной задачи – реализации продукции, необходимо учитывать факторы: потребность клиента, тенденции бытовой техники, финансовые возможности клиентов, физические возможности совершения покупки, удовлетворенность обслуживанием, удовлетворенность товаром. Это обеспечит повышение конкурентоспособности предприятия, увеличение прибыли, минимизацию расходов.

Для решения такой задачи используется когнитивная карта, в состав которой входят следующие вершины:

- стоимость продукции;
- качество продукции;
- отношения с поставщиками;
- инновации (внедрение новых идей, технологий);
- квалификация персонала;
- менеджмент;
- обслуживание клиентов;
- затраты на маркетинг;
- выявление потребностей клиентов;
- отслеживание тенденций;

Ребра когнитивной карты между приведенными вершинами устанавливаются на основе причинно-следственных связей, а весовые коэффициенты для каждого ребра определяются экспертами соответственно влияния одной вершины на другую.

При воздействии возмущений на одну из вершин КК возникает импульсный переходной процесс. Правило изменения значений координат вершин КК при импульсном процессе в свободном движении сформулировано в виде разностного уравнения первого порядка относительно приращений координат вершин КК [2]:

$$\Delta y_i(k+1) = \sum_{j=1}^n w_{ji} \Delta y_j(k) \quad (1)$$

где $\Delta y_j(k) = y_j(k) - y_j(k-1)$, $i, j = 1 \dots n$; w_{ji} — весовой коэффициент ребра КК, которое идет от j -й вершины к i -й, а n — количество вершин КК. В векторной форме это выражение записывается следующим образом:

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = W \Delta \bar{Y}(k), \quad (2)$$

где W — весовая матрица смежности КК, а $\Delta \bar{Y}$ — вектор приращений значений координат y_j вершин КК.

Исследование сценариев развития предприятия Комфи реализуется на основе стабилизации координат вершин КК на заданных уровнях при импульсном процессе (1)-(2). Для этого на основе (2) разрабатывается управляемая динамическая модель импульсного процесса КК в полных значениях координат вершин:

$$\Delta \bar{Y}(k+1) = (I + W - Wq^{-1}) \Delta \bar{Y}(k) + G \bar{u}(k) + \bar{\gamma}(k), \quad (3)$$

где q^{-1} — оператор обратного смещения на один период дискретизации;
 $\bar{u}(k)$ — вектор внешних управлений, которые воздействуют непосредственно на вершины КК;

$\bar{\gamma}(k)$ — вектор возмущений.

Управление импульсным процессом можно реализовать лицом, принимающим решение, путем изменения ресурсов, имеющихся в наличии в предприятии Комфи. Это могут быть финансовые, технологические, энергетические, интеллектуальные, информационные, административные, образовательные, социальные ресурсы, которые можно изменять на каждом периоде дискретизации в замкнутой системе на основе методов теории управления.

Уравнение (3) описывает динамику вынужденного движения импульсного процесса КК предприятия Комфи. При этом внешние управления $\bar{u}(k)$ формируются как дополнительные управляющие вершины КК, которые связаны ребрами с единичными весовыми коэффициентами с управляемыми вершинами КК. То есть матрица управления формируется проектировщиком системы когнитивного управления и состоит из единиц и нулей. Внешние возмущения $\bar{\gamma}(k)$ могут быть измеряемы или не измеряемы. Однако предполагается, что математическое ожидание $E\{\bar{\gamma}(k)\} = 0$.

Размерность вектора управления $dim \bar{u} \leq dim \bar{Y}$.

Для стабилизации координат Y_i импульсного процесса (3) на заданных уровнях δ_i необходимо выполнить синтез закона управления $\bar{u}(k) = \varphi\{\bar{\delta} - \bar{Y}(k)\}$, который обеспечивает стабилизацию Y_i путем непосредственного воздействия управлений $\bar{u}(k)$ непосредственно на вершины КК в замкнутой системе управления [3].

Синтез закона управления реализуется на основе минимизации критерия оптимальности

$$J(k+1) = E\left\{[\bar{Y}(k+1) - \bar{\delta}]^T [\bar{Y}(k+1) - \bar{\delta}] + \bar{u}^T(k) R \bar{u}(k)\right\}, \quad (4)$$

который представляет собой обобщенную дисперсию невязки] и вектора $\bar{u}(k)$.

В результате минимизации критерия (4)

$$\frac{\partial J(k+1)}{\partial \bar{u}(k)} = 2G^T [I + W - Wq^{-1}]\bar{Y}(k) + G\bar{u}(k) + \bar{\gamma}(k) - \bar{\delta}] + 2R\bar{u}(k) = 0$$

получаем уравнение регулятора, из которого определяется вектор управления

$$\bar{u}(k) = - \mathbf{[(G^T G + R)]}^{-1} (-1) G^T [(I + W - Wq^{-1}) - Y(k) - \bar{\gamma}(k) - \bar{\delta}]. \quad (5)$$

При измеряемых возмущениях $\bar{\gamma}(k)$ они учитываются в законе управления (5).

Исследование сценариев развития предприятия Комфи реализуется на основе варьирования составляющих вектора задающих воздействий $\bar{\delta}$ в замкнутой системе управления в процессе стабилизации координат вершин $Y_i(k)$ КК на заданных уровнях $\bar{\delta}_i$.

Список литературных источников

1. Романенко В.Д. Методы адаптивного и координирующего управления динамическими режимами когнитивных моделей / Романенко В.Д., Милявский Ю.Л. // V межд. науч.-практ. конф. «Наука и бизнес» (9—10 февраля 2015 г., г. Днепропетровск). — Днепропетровск. — с. 80—83.
2. Робертс Ф. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Робертс Ф. — М.: Наука, 1986. — 496 с
3. Романенко В.Д., Поляков М.В., Милявский Ю.Л., Лецер Ю.А. Учебно-научный комплекс «Институт прикладного системного анализа» НТУУ «КПИ», I Международный научно-практический форум «Наука и бизнес» (29-30 июня 2015 года, г. Днепропетровск) — с. 233-237.

КОМБІНАТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ НА РОЗМІЩЕННЯХ ЗІ СТОХАСТИЧНОЮ НЕВИЗНАЧЕНІСТЮ: ВЛАСТИВОСТІ ЛІНІЙНИХ ЗАДАЧ

О.О. Ємець¹, Т.М.Барболіна²

¹Полтавський університет економіки і торгівлі, Полтава

²Полтавський національний педагогічний університет імені В.Г.Короленка, Полтава

Вступ. Актуальним напрямком сучасної теорії оптимізації є дослідження задач комбінаторної природи. З іншого боку увагу дослідників привертано оптимізаційні задачі з урахуванням різних видів невизначеності. Об'єднання вказаних напрямків для задач з імовірнісною невизначеністю представлене в роботах [1]-[3] та інших. Постановки оптимізаційних задач у цих роботах здійснюються на основі введення відношення порядку на множині випадкових величин. Дана доповідь присвячена вивченню властивостей комбінаторних стохастичних задач з лінійною цільовою функцією.

Постановки оптимізаційних задач з імовірнісною невизначеністю. Визначимо для випадкової величини A характеристичний вектор як вектор $H(A) = (h_1(A), \dots, h_s(A))$, де $h_i(A)$, $i \in J_s = \{1, 2, \dots, s\}$ — деякі числові характеристики випадкової величини A (тут і далі J_n позначає множини n перших натуральних чисел). Вважатимемо, що характеристичний вектор задовольняє умову

$$h_i(aA + bB) = a^{\lambda_i} h_i(A) + b^{\lambda_i} h_i(B) \quad \forall i \in J_s, \quad (1)$$

де A, B – незалежні випадкові величини, $a, b \in R^1$ – дійсні числа, $\lambda_i \in Z$ – цілі додатні константи.

Нехай $<_l$ позначає лексикографічне упорядкування в s -вимірному евклідовому просторі, тобто для будь-яких $u, u' \in R^s$ за означенням $u <_l u'$, якщо перша ненульова компонента різниці $u - u'$ є від'ємною. Записуватимемо $u \leq_l u'$, якщо $u <_l u'$ або $u = u'$.

Дві випадкові величини A, B називатимемо упорядкованими у неспадному порядку \preceq (і позначати цей факт $A \preceq B$) тоді і тільки тоді, коли $H(A) \leq_l H(B)$. Введене відношення є відношенням переваги. Мінімальний елемент на множині, на якій введене відношення переваги, розуміємо, як у [6].

Нехай $E_\eta^k(\Gamma)$ – загальна множина k -розміщень з елементів мультимножини $\Gamma = \{G_1, \dots, G_\eta\}$ (термінологію стосовно евклідової комбінаторної оптимізації використовуємо переважно з [7]). Вважатимемо, що елементи $\Gamma = \{G_1, \dots, G_\eta\}$ є незалежними випадковими величинами, причому $h_r(G_i) \geq 0 \quad \forall r \in J_s \quad \forall i \in J_\eta$. Розглянемо задачу пошуку пари $\langle L(X^*), X^* \rangle$ такої, що

$$L(X^*) = \min_{X \in E_\eta^k(\Gamma)} \sum_{j=1}^k c_j X_j, \quad X^* = \arg \min_{X \in E_\eta^k(\Gamma)} \sum_{j=1}^k c_j X_j, \quad (2)$$

де $L(X) = \sum_{j=1}^k c_j X_j$, $c_j \in R^1 \quad \forall j \in J_k$.

Зв'язок стохастичних і детермінованих задач. Разом із характеристичним вектором $H(A) = (h_1(A), \dots, h_s(A))$ розглядатимемо вектори $H_r(A) = (h_1(A), \dots, h_r(A))$ для всіх $r \in J_s$, $H_0(A) = \emptyset$. Нехай $r \in J_s$ — таке, що елементи мультимножини Γ задовольняють умову

$$H_{r-1}(G_i) = H_{r-1}(G_j) \quad \forall i, j \in J_\eta \quad G_i, G_j \in \Gamma \quad (3)$$

(у випадку $r = 1$ умова (3) завжди виконується, оскільки $H_0(G_i) = \emptyset \quad \forall i \in J_\eta$).

Для точки $X \in E_\eta^k(\Gamma)$ позначимо $\rho(X) = (h_r(X_1), \dots, h_r(X_k))$. З умови (1) випливає $h_r(L(X)) = \bar{L}_r(\rho(X))$, де $\bar{L}_r(x) = \sum_{j=1}^k c_j^{\lambda_r} x_j$, $x = (x_1, \dots, x_k)$. Розглянемо детерміновану задачу мінімізації функції $\bar{L}_r(x)$ на множині $E_\eta^k(Q_r)$, де $Q_r = \{q_{r1}, \dots, q_{r\eta}\}$, $q_{rj} = h_r(G_j)$ $\forall j \in J_\eta$, тобто задачу пошуку пари $\langle \bar{L}_r(x'), x' \rangle$ такої, що

$$\bar{L}_r(x') = \min_{x \in E_\eta^k(Q_r)} \sum_{j=1}^k c_j^{\lambda_r} x_j, \quad x' = \arg \min_{x \in E_\eta^k(Q_r)} \sum_{j=1}^k c_j^{\lambda_r} x_j. \quad (4)$$

Можна довести, що для мінімалі x' у задачі (4) та мінімалі X^* у задачі (2) повинні виконуватися співвідношення $\bar{L}_r(x') \leq h_r(L(X^*))$ і $h_r(L(X^*)) \leq \bar{L}_r(x')$, звідки $\bar{L}_r(x') = h_r(L(X^*))$. Тоді на основі критерію розв'язку детермінованої лінійної безумовної задачі комбінаторної оптимізації на розміщеннях [8] одержуємо, що для деякої точки X' , яка задовольняє умови

$$h_r(X'_j) = x'_j \quad \forall j \in J_k, \quad (5)$$

мають місце співвідношення $L(X') = L(X^*)$, тобто X' — мінімаль у задачі (2). Отже, має місце така теорема.

Теорема 1. Нехай характеристичний вектор випадкової величини задовольняє умову (1), причому виконуються співвідношення (3). Тоді існує мінімаль $X' \in E_\eta^k(\Gamma)$ у задачі (2) така, що мають місце умови (5), де $\langle \bar{L}_r(x'), x' \rangle$ — розв'язок задачі (4).

Наслідок 1. Нехай характеристичний вектор випадкової величини задовольняє умову (1), причому виконуються співвідношення (3) і

$$h_r(G_1) \leq \dots \leq h_r(G_\eta). \quad (6)$$

Якщо також всі коефіцієнти цільової функції $L(X)$ у задачі (2) додатні, то існує $X' \in E_\eta^k(\Gamma)$ у задачі (2) така, що $h_r(X'_j) = h_r(G_j) \quad \forall j \in J_k$.

Доведення ґрунтується на критерії розв'язку детермінованої лінійної безумовної задачі оптимізації на розміщеннях та виконанні умови $c_1^{\lambda_r} \geq c_2^{\lambda_r} \geq \dots \geq c_k^{\lambda_r} > 0$.

Властивості задач зі стохастичними коефіцієнтами. Разом із задачею (2) розглянемо задачу пошуку пари $\langle R(x^*), x^* \rangle$ такої, що

$$R(x^*) = \min_{x \in E_\eta^k(G)} \sum_{j=1}^k C_j x_j, \quad x^* = \arg \min_{x \in E_\eta^k(G)} \sum_{j=1}^k C_j x_j, \quad (7)$$

де, на відміну від задачі (2), коефіцієнти $C_j \quad \forall j \in J_k$ цільової функції $R(x) = \sum_{j=1}^k C_j x_j$ є незалежними дискретними випадковими величинами (як і вище, $x = (x_1, \dots, x_k)$), а елементи мультимножини $G = \{g_1, \dots, g_\eta\}$ — детермінованими.

Покажемо, що за певних умов розв'язування задачі (7) можна звести до розв'язування задачі вигляду (2) з детермінованими коефіцієнтами цільової функції й елементами

мультимножини, що є дискретними випадковими величинами. Вважатимемо, що елементи мультимножини G додатні й упорядковані за неспаданням:

$$0 < g_1 \leq g_2 \leq \dots \leq g_\eta, \quad (8)$$

а коефіцієнти цільової функції задовольняють умову

$$h_1(C_1) \geq \dots \geq h_1(C_p) > 0 = h_1(C_{p+1}) = \dots = h_1(C_{q-1}) > h_1(C_q) \geq \dots \geq h_1(C_k). \quad (9)$$

Разом із задачею (7) розглянемо задачу пошуку пари $\langle R_1(x^*), x^* \rangle$ такої, що

$$R_1(x^*) = \min_{x \in E_\eta^k(G)} \sum_{j=1}^p C_j x_j, \quad x^* = \arg \min_{x \in E_\eta^k(G)} \sum_{j=1}^p C_j x_j, \quad (10)$$

де $R_1(x) = \sum_{j=1}^p C_j x_j$ (з урахуванням умови (9) маємо, що для всіх коефіцієнтів функції $R_1(x)$

виконується умова $h_1(C_j) > 0$). Розглянемо детерміновану задачу пошуку пари $\langle \bar{R}_1(x^*), x^* \rangle$ такої, що

$$\bar{R}_1(x^*) = \min_{x \in E_\eta^k(G)} \sum_{j=1}^p \bar{c}_j x_j^{\lambda_j}, \quad x^* = \arg \min_{x \in E_\eta^k(G)} \sum_{j=1}^p \bar{c}_j x_j^{\lambda_j}, \quad (11)$$

де $\bar{R}_1(x) = \sum_{j=1}^k \bar{c}_j x_j^{\lambda_j}$, $\bar{c}_j = h_1(C_j) \quad \forall j \in J_k$.

Задача (11) еквівалентна задачі мінімізації функції $\tilde{R}_1(\tilde{x}) = \sum_{j=1}^p \tilde{c}_j \tilde{x}_j$ на множині

$E_\eta^k(\tilde{G})$, де елементи мультимножини $\tilde{G} = \{\tilde{g}_1, \dots, \tilde{g}_\eta\}$ задовольняють умову $\tilde{g}_j = g_j^{\lambda_j}$ $\forall j \in J_\eta$. З критерію розв'язку детермінованої лінійної безумовної задачі комбінаторної

оптимізації на розміщеннях [8] випливає, що будь-яка мінімаль $\tilde{x}^* = (\tilde{x}_1^*, \dots, \tilde{x}_k^*)$ функції $\tilde{R}_1(\tilde{x})$ на множині $E_\eta^k(\tilde{G})$ задовольняє умову $(\tilde{x}_1^*, \dots, \tilde{x}_p^*) \in E_p(\tilde{G}')$, де $\tilde{G}' = \{\tilde{g}_1, \dots, \tilde{g}_p\}$. Отже,

будь-яка мінімаль x' у задачі (11) задовольняє умову

$$(x_1, \dots, x_p) \in E_p(G'), \quad (12)$$

де $G' = \{g_1, \dots, g_p\}$.

Тоді для будь-якого розміщення $x \in E_\eta^k(G)$, яке не задовольняє умову (12), маємо:

$\bar{R}_1(x') < \bar{R}_1(x)$. Враховуючи, що

$$\bar{R}_1(x) = \sum_{j=1}^p \bar{c}_j x_j^{\lambda_j} = \sum_{j=1}^p h_1(C_j) x_j^{\lambda_j} = h_1 \left(\sum_{j=1}^p C_j x_j^{\lambda_j} \right) = h_1(R_1(x)),$$

отримуємо $R_1(x') \leq R_1(x)$, тобто x' — мінімаль у задачі (10). Отже, оптимум цільової функції

$$R_1^* = \sum_{j=1}^p C_j g_{i_j}, \quad \text{де } i_j \in J_p \quad \forall j \in J_p, \quad i_j \neq i_t \quad \forall j, t \in J_p. \quad (13)$$

Аналогічно можна показати, що мінімаллю функції $R_2(x) = \sum_{t=q}^k C_t x_t$ на множині

$E_\eta^k(G)$ є точка $(x_q, \dots, x_k) \in E_m(G'')$, де $m = k - q + 1$, $G'' = \{g_{\eta-m+1}, \dots, g_\eta\}$. Тоді мінімум

визначається так: $R_2^* = \sum_{t=q}^k C_t g_{l_t}$, де $l_t \in J_{\eta}^{\eta-m+1} \forall t \in J_k^q, l_t \neq l_j \forall j, t \in J_k^q$ (тут і далі J_{α}^{β}

позначає множину $\{\beta, \dots, \alpha\}$).

Нехай $(g_{i_1}, \dots, g_{i_p}, x'_{p+1}, \dots, x'_p)$, де $g_{i_j} \in G' \forall i_j \in J_p$, є мінімаллю в задачі (10), а $(x''_1, \dots, x''_{q-1}, g_{l_q}, \dots, g_{l_k})$, де $g_{l_i} \in G'' \forall i_j \in J_k^q$, — мінімаллю функції $R_2(x)$ на множині $E_{\eta}^k(G)$. Тоді для точки $x^* = (g_{i_1}, \dots, g_{i_p}, x_{p+1}, \dots, x_{q-1}, g_{l_q}, \dots, g_{l_k})$ і довільної точки $x = (x_1, \dots, x_k) \in E_{\eta}^k(G)$ справедливі співвідношення

$$R(x^*) = \sum_{j=1}^p C_j g_{i_j} + \sum_{t=q}^k C_t g_{l_t} \leq \sum_{j=1}^p C_j x_j + \sum_{t=q}^k C_t x_t = R(x).$$

Таким чином, x^* є мінімаллю в задачі (7).

Отже, розв'язок задачі (7) може бути одержаний на основі розв'язків задач (7) і

$$R_2(x^*) = \min_{x \in E_{\eta}^k(G)} \sum_{t=q}^k C_t x_t, \quad x^* = \arg \min_{x \in E_{\eta}^k(G)} \sum_{t=q}^k C_t x_t. \quad (14)$$

Оскільки мінімум функції $R_1(x)$ на множині $E_{\eta}^k(G)$ визначається згідно з (13), то задачу (7) можна розглядати як задачу пошуку пари $\langle F_1(Y^*), Y^* \rangle$ такої, що

$$F_1(Y^*) = \min_{Y \in E_p(\Theta')} \sum_{j=1}^p g_j Y_j, \quad Y^* = \arg \min_{Y \in E_p(\Theta')} \sum_{j=1}^p g_j Y_j, \quad (15)$$

де $Y = (Y_1, \dots, Y_k)$, $F_1(Y) = \sum_{j=1}^p g_j Y_j$, мультимножина $\Theta' = \{C_1, \dots, C_p\}$.

Аналогічно задачу (14) можна розглядати як задачу пошуку пари $\langle F_2(Y^*), Y^* \rangle$ такої, що

$$F_2(Y^*) = \min_{Y \in E_m(\Theta'')} \sum_{t=q}^k g_t Y_t, \quad Y^* = \arg \min_{Y \in E_m(\Theta'')} \sum_{t=q}^k g_t Y_t, \quad (16)$$

де $F_2(Y) = \sum_{t=q}^k g_t Y_t$, $\Theta'' = \{C_q, \dots, C_k\}$.

Таким чином, розв'язок задачі (7), коефіцієнти цільової функції у якій є випадковими величинами, може бути одержаний з використанням розв'язків задач (15) і (16) з детермінованими коефіцієнтами цільових функцій.

Висновки. У доповіді викладаються властивості лінійної безумовної задачі комбінаторної оптимізації на розміщеннях зі стохастичною невизначеністю, де мінімум визначається на основі послідовного порівняння числових характеристик випадкових величин. Отримані результати можуть бути використані для побудови методів розв'язування таких задач.

Список літературних джерел

1. Емец О.А. Об оптимизационных задачах с вероятностной неопределенностью / О.А.Емец, Т.Н.Барболина // Доповіді НАН України. – 2014. – № 11. – С. 40 – 45.
2. Емец О.А. Комбинаторная оптимизационная модель упаковки прямоугольников со стохастическими параметрами / О.А.Емец, Т.Н.Барболина // Кибернетика и системный анализ. – 2015. — № 4. – С. 99-111.

3. Ємець О.О. Побудова і дослідження математичної моделі задачі директора зі стохастичними параметрами / О.О.Ємець, Т.М.Барболіна // Вісник Черкаського університету. Серія Прикладна математика. Інформатика – 2014. – № 18 (311). – С.3-11.

4. Емец О.А. Оптимизационные задачи на множестве размещений / О.А.Емец, Т.Н.Барболіна // Дискретная математика, алгебра и их приложения: Тез. докл. Междунар. науч. конф. Минск, 14 – 18 сентября 2015 г. — Мн.: Институт математики НАН Беларуси, 2015. — С. 103-104.

5. Емец О.А. Линейные порядки на множестве дискретных случайных величин: использование в комбинаторной оптимизации / О. А. Емец, Т. Н. Барболіна // Дискретные модели в теории управляющих систем : IX Международная конференция / Отв. ред. В. Б. Алексеев, Д. С. Романов, Б. Р. Данилов. – М. : МАКС Пресс, 2015. – С. 76-79.

6. Новоселов А.А. Математическое моделирование финансовых рисков. Теория измерения / А.А.Новоселов – Новосибирск : Наука, 2001. — 102 с.

7. Стоян Ю.Г. Теорія і методи евклідової комбінаторної оптимізації / Ю.Г.Стоян, О.О.Ємець. – К. : Інститут системних досліджень освіти, 1993. – 188 с. – Режим доступу: <http://dspace.puet.edu.ua/handle/123456789/487>.

8. Барболіна Т.М. Властивості лінійних безумовних задач оптимізації на розміщеннях / Т.М. Барболіна // Збірник наукових праць викладачів, аспірантів, магістрантів і студентів фізико-математичного факультету. – Полтава : Астроя, 2015. – С.12-14.

АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОСТРУКЦИЙ **А.П. Иванова, О.И. Труфанова, Л.В. Феськова, А.Н. Чумак**

Национальный горный университет, Днепропетровск

Введение. Одним из базовых показателей технологичности конструкции или изделия является металлоемкость. Масса изделия в значительной степени определяет его стоимость, и сокращение расхода металла на 1 % ведет к снижению себестоимости изделия до 5 %. В комплекс работ по снижению металлоемкости изделия входит внедрение научно обоснованных методов его расчетов, включая вариантное проектирование и оптимизацию. Однако, как правило, оптимальные металлические конструкции в целом не могут быть получены на основе оптимальных частных решений их элементов, так как в составе металлических конструкций отдельные элементы могут утрачивать оптимальные значения своих параметров. Поэтому разработка методов расчета и проектирования металлических конструкций с целью совершенствования существующих и создания новых конструкций высокой технологичности и низкой материалоемкости, является актуальной задачей, для промышленного и гражданского строительства.

В настоящей работе решается задача параметрической оптимизации стальной главной балки балочной клетки.

Анализ исследований. В настоящее время при проектировании всех видов конструкций большое значение имеет не только качество выполненного проекта, но и затраченное время на его разработку. Сегодня существует многопрограмм моделирования, но главным критерием для выбора программного комплекса является сочетание качества расчета и экономии времени без использования сложных программных комплексов.

Целью данной работы является анализ программных комплексов для оптимального проектирования строительных конструкций.

Идея работы -снижение материалоемкости металлической сварной двутавровой балки вследствие минимизации размеров поперечного сечения с использованием программы MicrosoftExcelSolver («Поиск решений») и проверкой полученных результатов в программных комплексах APM CivilEngineering и RobotStructureAnalysis.

Теория оптимального проектирования является одним из актуальных разделов в механике деформируемого твердого тела, на которой базируются проектные расчеты строительных конструкций [2, 5, 6, 7, 9, 10]. В основе этой теории лежит одна из важнейших

задач - снижение материалоемкости конструкций и улучшение их механических характеристик [5].

В программном продукте MicrosoftExcel существует надстройка Solver («Поиск решений»). Она очень удобна при решении многих математических задач, является частью блока задач, которые называют «анализом «что если»». С ее помощью можно определить, при каких значениях указанных влияющих ячеек формула в целевой ячейке принимает значение (минимальное, максимальное или равное какой-либо величине). Для процедуры поиска решения можно задать ограничения, причем не обязательно, чтобы при этом использовались те же влияющие ячейки. Чтобы получить по формуле, содержащейся в целевой ячейке, заданный результат, процедура изменяет значения во влияющих ячейках. Программа «Поиск решений» может решать как линейные задачи, так и не линейные.

АРМ CivilEngineering иRobotStructureAnalysisсистемы автоматизированного проектирования строительных объектов гражданского и промышленного назначения.Они в полном объеме учитывают требования государственных стандартов к расчетным алгоритмам. Эти комплексы обладают широкими функциональными возможностями для создания моделей конструкций, выполнения необходимых расчетов и визуализации полученных результатов. Использование этих возможностей позволяет сократить сроки проектирования и снизить материалоемкость строительного объекта, а также уменьшить стоимость проектных работ и строительства в целом.

Изложение основного материала.Эффективность двутавровой балки во многом определяетсятолщиной ее стенки. Чем тоньше стенка, тем большей экономии металламожнодобиться,сохраняятребуемывеличинывмоментаинерцииилимоментасопротивления поперечногосечениябалки.Наиболееважнымпрепятствием к уменьшению толщины стенки является ее устойчивость. Последняя может быть обеспечена путем укрепления стенки балки системойребержесткости.Достаточнохорошимобобщеннымпараметром, учитывающим мероприятия по обеспечению устойчивости стенки балки, является безразмерный коэффициент:

$$k = \frac{h}{\delta}, \quad (1)$$

где h – высота стенки; δ – ее толщина.

При решении задачи минимизации размеров двутаврового сечения учтены конструктивные и нормативные требования [1].

Этапы решения задачи:

1. Задаются первоначальные параметры исследуемой балки.
2. Оптимизация параметров сечения.
3. Сравнение и оценка первоначальных данных, с полученными в результате оптимизации.

Первым этапом оптимального проектирования является выбор критерия оптимальности конструкции или, иными словами, выбор целевой функции.

Целевая функция является показателем качества конструкции, к оптимизации которого стремятся при ее проектировании. Эта функция в конечном итоге носит экономический характер и должна иметь практическое значение. Наиболее распространенными целевыми функциями являются: минимум массы; минимум стоимости; минимум веса подкрепляющего или армирующего материала; минимум математического ожидания затрат на конструкцию; минимум суммы стоимости конструкции и затрат на машинное время; принцип равнопрочности конструкции.

В качестве целевой функции принимаемобъем балки:

$$F(x) = V = (4 \times t_f \times b_{ef} + t_w \times h_{ef}) \times L + n \times b_h \times t_s \times h_{ef} \quad (2)$$

где V - объем двутавровой балки, мм³; t_f - высота полки сечения, мм; b_{ef} - ширина фланца (половина ширины полки), мм; t_w - толщина стойки, мм; h_{ef} - высота стойки, мм; L - длина балки, мм; n - количество ребер жесткости; b_h - ширина ребра жесткости, мм; t_s - толщина ребра жесткости, мм;

Задача о рациональной компоновке составного двутавра из трех листов является классической и рассматривается практически во всех курсах металлических конструкций. При этом, как правило, задача заключается в определении оптимальной высоты балки с заданным моментом сопротивления из условия минимума площади ее поперечного сечения. Приближенные приемы решения подобных задач, в ряде случаев с использованием эмпирических коэффициентов, приводятся во многих работах[5-8]. Одновременно с оптимальной там обычно рассматривают и так называемую минимальную высоту балки, которая определяется из условия максимально допустимого прогиба балки. При этом для практических целей рекомендуется принимать высоту, лежащую в интервале между минимальной и оптимальной.

В качестве объекта оптимизации рассматривается составной двутавр (рис. 1), состоящий из стенки и двух поясов, изгибаемый в плоскости стенки. Поперечное сечение двутавра имеет две оси симметрии: $x - x$ и $y - y$. Предполагается, что его пояса имеют малую толщину по сравнению с высотой балки и характеризуются лишь одним параметром A_f – площадью поперечного сечения пояса. Стенка характеризуется двумя параметрами – высотой h и толщиной δ .

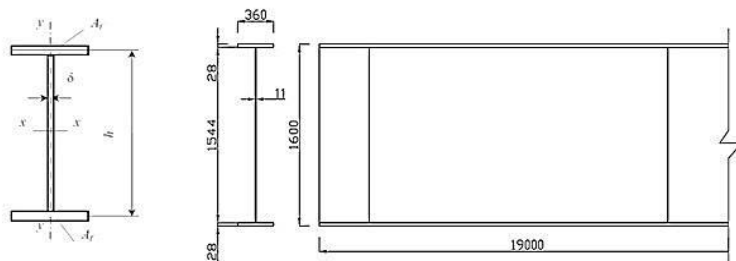


Рисунок 1– Поперечное сечение металлической двутавровой балки

На рис.1 представлено поперечное сечение металлической двутавровой балки с заданными параметрами (табл.1). Количество ребер жесткости – по 7с каждой стороны.

Таблица 1 –Параметры двутавровой балки

t_f -толщина полки, мм	28
b_{ef} -ширина полки, мм	360
h_{ef} -высота стенки, мм	1544
t_w - толщина стенки, мм	11
b_h -ширина ребра жесткости, мм	180
t_s -толщина ребра жесткости, мм	6
длина балки, мм	19000,00
изгибающий момент, Н · мм	4487880000,0
поперечная сила, Н	944780,00

Схема настройки оптимизатора ExcelSolver состоит из настройки рабочей области и самого оптимизатора (рис.2)

	A	B	C	D	E	F
1	Постоянные данные					
2	Длина балки	19000,00			Длина балки	19000,00
3	Максимальный момент	448788000,00				
4	Максимальная нагрузка	944780,00				
5	ΔF-площадь полки	0,00				
6	F-прогиб	5,43				
7	E	206000,00				
8	Переменные данные					
9						
10	hefmin	0,0				
11	befmax					
12	befmin	0,0				
13	hefopt	0,0				
14	b/T					
15	mf	0				
16	Ry	240				
17	hs-расстояние между центром тяжести полки	0				
18	b	0			b	360
19	e	1,07				
20	twmin					
21	tsmin	0,00				
22	a	2714,285714			a	3000
23	Оптимизационные параметры					
24	tf-толщина полки				Начальные параметры	
25	bef-ширина полки				tf-толщина полки	28
26	hef-высота стенки				bef-ширина полки	180
27	tw-толщина стенки				hef-высота стенки	1544
28	bh-ширина ребра жесткости				tw-толщина стенки	11
29	ts-толщина ребра жесткости				bh-ширина ребра жесткости	180
30	Площадь поперечного сечения	0			ts-толщина ребра жесткости	6
31	Снижение объема(%)				Площадь поперечного сечения	717408640
					Снижение объема(%)	-100,00%

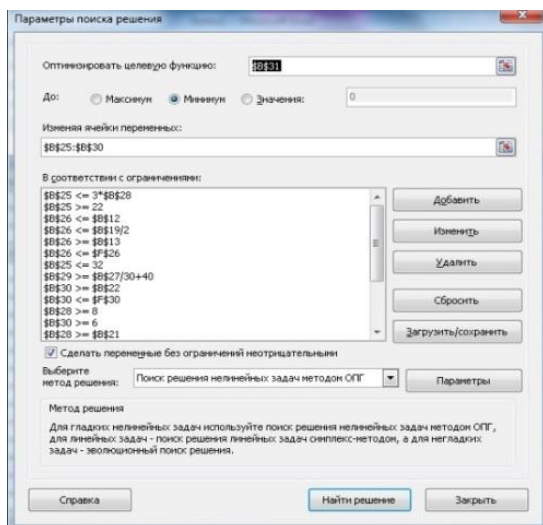


Рисунок 2 –Настройка рабочей области оптимизатора «Поиск решений»

При оптимизации размеров металлической двутавровой балки были приняты нормативные и конструктивные требования согласно [1, 4]:

Данная процедура привела к уменьшению объема балки на 9,74 % и, соответственно, расхода стали (рис.3).

Полученное оптимальное сечение проверяется на прочность по нормальным напряжениям. При проведении этапов оптимизации были учтены требования общей и местной устойчивости, а также конструктивные требования.

	Начальные	Минимальные
tf-толщина полки	28	22
bef-ширина полки	180	180
hef-высота стенки	1544	1756
tw-толщина стенки	11	10
bh-ширина ребра жесткости	180	175
ts-толщина ребра жесткости	6	6
Площадь поперечного сечения	717408640	647506600
Снижение объема(%)		9,74%

Рисунок 3 – Сравнение полученных размеров двутавровой балки после оптимизации в ExcelSolver («Поиск решений»)

Подобная процедура оптимизации выполнялась в APMCivilEngineering и RobotStructureAnalysis (рис.4). Все нагрузки прикладываются в глобальной системе координат расчётной модели.

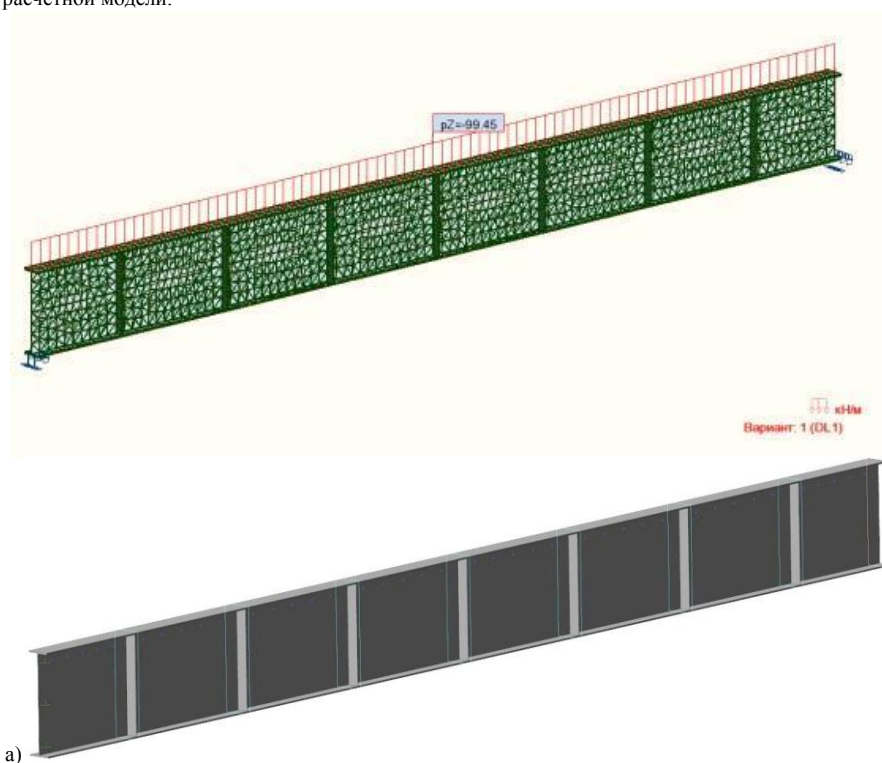


Рисунок 4 – Моделирование в программных комплексах: а) AutoDesk RobotStructure Analysis, б) APMCivil Engineering

На основании полученных результатов по трем программным комплексам (табл.2) видно, что максимальная экономия материала полученав AutoDesk Robot Structure Analysis (рис. 5a)и APM Civil Engineering (рис.5б), которые базируются на методе конечных элементов.

Таблица 2 –Результаты оптимизации металлической двутавровой балки

Программный комплекс	Количество конечных элементов	Уменьшение расхода материала
Excel Solver	-	9,74%
APM Civil Engineering	217160	10,2%
Robot Structure Analysis	222250	10,31%

Выводы. Проведен сравнительный анализ полученных результатов оптимизации металлической двутавровой балки в трех программных комплексах: MicrosoftExcelSolver («Поиск решений»), AutoDeskRobotStructureAnalysis и APM CivilEngineering, по которому можно сделать вывод, что максимальная экономия материала балки достигнута в AutoDeskRobotStructureAnalysis и APM CivilEngineering и составляет $\approx 10\%$. Эти два комплекса базируются на методе конечных элементов, в которых рассчитываемая конструкция разбивается на множество элементов, что в свою очередь требует большого количества времени для их расчета. Также стоит подчеркнуть, что надстройка ExcelSolver выполняет аналогичный расчет и при этом не требует больших временных затрат. Но это справедливо для несложных или типовых конструкций.

Список использованных источников

1. ДБН В.2.6-163:2010. Сталевіконструкції. Нормипроєктування, виготовлення і монтажу – К.: МінрегіонбудУкраїни, 2011. – 201 с.
2. Иванова, А. П. Исследование долговечности центрально сжатых стержней с изменяющимися геометрическими характеристиками / А. П. Иванова // Науч. вестн. НГУ. – 2013. – № 3. – С. 87–92.
3. Зеленцов Д. Г. Весовая оптимизация статически неопределимой балки при коррозионном износе с использованием конечных элементов переменной жесткости / Д. Г. Зеленцов, Н. А. Солодкая // Системш технологи : репон. міжвуз. зб. наук.праць.- Дшпропетровськ. - 2002. -Вип. 4(21). - С. 28 - 32.
4. Металлические конструкции. Справочник проектировщика / под ред. Н.П. Мельникова - М.; Стройиздат, 1980.
5. Пермяков, В.А. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций / В. А. Пермяков, А. В. Перельмутер, В. В. Юрченко. - К. : Сталь, 2008. - 538 с
6. Прагер В. Основы теории оптимального проектирования конструкций / В. Прагер // пер. с англ. А.Г. Лапиги; Под ред. Г.С. Шапиро. – М.: Мир, 1977. – 103 с.
7. Тютькін, О. Л. Оптимізація конструктивних елементів трисклепінчастих станцій з урахуванням спеціфіки їх поведінки / О.Л. Тютькін, І.П. Петренко // Вісник ДНУЗТ. - Д., 2004. - Вип. 3. - С. 171-174.
8. Таліб-Ага Дж. Метод оптимального проектування конструкцій типу ферм / Дж. Таліб-Ага, Р. Нельсон // Ракет, техніка і космонавтика. - 1976. - №4. - С. 28 - 38.
9. Хог Э. Прикладное оптимальное проектирование // Механические системы и конструкции / Хог Э., Арора Я. – М.: Мир, 1983. - 479 с.
10. Ягода, П. А. Решение задач оптимизации конструкций с применением современных программных комплексов / П. А. Ягода // Вісник ДНУЗТ. - Д., 2007. - Вип. 17. - С. 191-194.

**КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТУРБІННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ**
І.В.Коробко, В.А. Коваленко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

Комп'ютерне моделювання - це потужний інструмент для створення нових і удосконалення існуючих конструкцій приладів і систем обліку паливно-енергетичних ресурсів, де можливо задавати не тільки геометричні параметри самих приладів, але й умови вимірюваного середовища. Комп'ютерні програми моделювання експерименту з дослідження взаємодії вимірювального середовища і елементів конструкції приладів є прогресивною та необхідною технологією сьогодення, які, за умови точного окреслення вхідних та вихідних параметрів, необхідних для певного дослідження, можуть повністю замінити проведення натурних експериментів, які потребують значних матеріальних та часових затрат і не завжди дають бажаний результат.

У доповіді наведено результати дослідження турбінного вимірювального перетворювача витрати (ТВПВ) природного газу.

Процес комп'ютерного експерименту передбачає такі етапи:

- I. Попередній розрахунок параметрів ТВПВ;
- II. Проектний розрахунок ТВПВ у програмному комплексі;
- III. Пошук оптимального варіанту ТВПВ, що відповідає поставленій задачі для дослідження.

IV. Комп'ютерне моделювання роботи ТВПВ природного газу дозволяє розв'язати наступні задачі: перевірка гіпотез про дію тих чи інших фізичних факторів на ефективність процесу вимірювання витрат і кількості; визначення метрологічних характеристик; визначення впливу різних фізичних факторів на метрологічні характеристики ТВПВ; на основі дослідження одного ТВПВ здійснити розв'язання цілого класу задач, які мають однакові або подібні математичні описи; уточнення математичних моделей і розрахункових алгоритмів; визначення сприятливих технологічних режимів функціонування ТВПВ та створення інженерних методів і розрахунків; оптимізація конструктивних параметрів ТВПВ[1].

Таким чином, задачі до комп'ютерного експерименту повинні виходити саме з узагальнених підходів до проектування ТВПВ природного газу. Для цього пропонується дотримуватись таких рекомендацій:

1. ТВПВ призначені для вимірювання в конкретних умовах експлуатації, отже початкові дані для проектування повинні містити вимоги метрологічного характеру та враховувати експлуатаційні умови.
2. Початковими даними при проектуванні повинні бути вимоги по основній похибці показань, діапазону вимірюваних витрат, параметрів вимірюваного середовища, перепаду тиску на вимірювальному перетворювачі витрати.
3. Дослідження повинно базуватися на результатах математичного та параметричного моделювання ТВПВ, яке б дозволило врахувати найбільшу кількість факторів, що мають найбільший вплив на роботу приладу.
4. Основою проектування ТВПВ повинні бути оптимізаційні дослідження, проведені в рамках його математичного моделювання, направлені на визначення оптимальних, за визначеними критеріями, значень параметрів конструкції вимірюваного перетворювача в цілому[2].

Список літературних джерел

1. Гришанова, І.А. Системи CAD/CAE. ANSYS FLUENT [Текст]: підруч. для вузів / І. А. Гришанова, І. В. Коробко. – К.: Дія ЛТД, 2012. – 208 с.2.
2. Коробко, І. В. Наукові принципи творення засобів вимірювання витрати плинних потоків технологічних мереж [Текст]: автореф. дис. на здоб. вч. ступеня докт. техн. наук: 05.11.01 / І.В.Коробко; К., НТУУ “КПІ”. – К, 2014. – 41 с.

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЧИСЛЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

А.И. Косолап

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Введение. Задачи оптимизации являются наиболее сложными в численном анализе. Разработано много методов для их решения. Для различных классов задач эффективными будут разные методы. Под эффективными методами будем понимать такие, которые реализованы в виде компьютерных программ и с помощью которых за приемлемое время с заданной точностью могут быть решены классы задач оптимизации.

Существует много различных классов задач оптимизации. Наиболее простыми являются задачи линейного программирования. Для решения этого класса задач используется симплекс-метод и прямо-двойственные методы внутренней точки (PDIPM) [1]. Для задач большой размерности методы PDIPM являются более эффективными. Прямо-двойственные методы были обобщены для решения задач нелинейного программирования и сегодня эти методы являются наиболее эффективными для решения задач нелинейной оптимизации [1].

Методы PDIPM предназначены для решения задач оптимизации с гладкими функциями. Существуют классы задач, содержащие негладкие функции. Эти классы задач на порядок сложнее задач с гладкими функциями. Для решения таких задач разработаны алгоритмы, но эти алгоритмы сходятся медленно либо их сходимости не доказана. Лучшим решением для задач с негладкими функциями является их преобразование к гладким. Это возможно, когда функции содержат модули. Для таких задач в работе [2] предложен метод последовательного раскрытия модулей. Таким образом, решение негладкой задачи оптимизации сводится к решению последовательности гладких задач.

Новым классом задач является линейная полуопределенная оптимизация, в которой необходимо найти полуопределенную матрицу [3]. Метод PDIPM был обобщен для решения этого класса задач. Однако для задач полуопределенной оптимизации он оказался не таким эффективным, как для задач линейного программирования. На протяжении многих лет предпринимались попытки обобщить симплекс-метод для решения задач полуопределенной оптимизации. Сложность обобщения связана с тем, что допустимая область задач полуопределенной оптимизации не является выпуклым многогранником. Только в работах [4-5] был предложен эффективный полуопределенный симплекс-метод. Для этого метода разработано программное обеспечение. Эксперименты показали численное преимущество полуопределенного симплекс-метода над методом PDIPM.

Большой класс задач оптимизации содержит целочисленные или булевы переменные. Для решения таких задач еще не разработано эффективных методов. Задачи с целочисленными переменными очень часто встречаются при решении практических задач, однако они значительно сложнее задач с непрерывными переменными. Простые преобразования позволяют преобразовать задачи с целочисленными переменными к задачам с непрерывными переменными посредством ввода дополнительных ограничений. Например, целочисленные положительные переменные удовлетворяют следующему условию

$$\{x \mid \sum_{i=1}^n (1 - \cos(2\pi x_i)) \leq 0, x \geq 0\}.$$

Булевы переменные также можно задать условиями

$$\{x \mid \sum_{i=1}^n x_i(x_i - 1) = 0, 0 \leq x \leq 1\}.$$

Первое и второе условие определяет невыпуклую область, что приводит к многоэкстремальным задачам.

Многоэкстремальные задачи являются наиболее сложными в оптимизации. Несмотря на то, что задачи оптимизации исследовались на протяжении многих веков, только в конце прошлого века начали разрабатывать методы решения многоэкстремальных задач. Для этого

класса задач разрабатывается также соответствующее программное обеспечение. Необходимо отметить, что большинство сложных систем при их математическом моделировании сводятся к многоэкстремальным задачам. Попытки построить эффективные детерминированные методы для решения этого класса задач не увенчались успехом [6]. Тогда центр исследований переместился на стохастические методы. Появилось большое число разновидностей таких методов. Хорошо известны генетические или эволюционные методы и другие [7]. Однако, как показали численные эксперименты на специально разработанных тестовых задачах, эти методы только в некоторых случаях позволяют находить глобальные экстремумы в многоэкстремальных задачах. Во многих случаях решения были далеки от оптимальных. Эти исследования стимулировались запросами практики. Проектирование и разработка сложных систем при ограниченных ресурсах приводила к многоэкстремальным задачам, причем во многих случаях число локальных экстремумов было значительным. Для решения проблемы глобального экстремума требуются новые идеи не связанные с мощностью вычислительной техники. Было посчитано, что существующие методы решения многоэкстремальных задач требуют астрономического времени работы компьютера [8].

В последние годы, новым направлением исследований в глобальной оптимизации становится точная квадратичная регуляризация [9]. Она позволяет преобразовать задачу нелинейной оптимизации

$$\min\{f_0(x) \mid f_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, m\} \quad (1)$$

к задаче максимизации евклидовой нормы вектора на выпуклом множестве

$$\max\{\|z\|^2 \mid z \in S(d)\}, \quad (2)$$

где

$$S(d) = \{x \mid f_0(x) + s + (r-1)\|z\|^2 \leq d, f_i(x) + r\|z\|^2 \leq d, i = 1, \dots, m\},$$

$z = (x, x_{n+1})$. Параметр s должен удовлетворять условию

$$s \geq \|x^*\|^2 - f_0(x^*),$$

где x^* - решение задачи (1), а параметр $r > 0$ выбирается таким, чтобы множество $S(d)$ стало выпуклым. Выбор этих параметров для конкретной задачи не является сложным, так как при больших их значениях заданные условия будут выполняться. Преобразованная задача (2) содержит две новых переменных x_{n+1} и d и два параметра. Число ограничений увеличивается на единицу. Задача (2) в общем случае также является многоэкстремальной. Однако при таком преобразовании часть локальных минимумов задачи (1) может быть преобразована в минимумы задачи (2). Некоторые локальные минимумы могут исчезнуть, но точки глобальных экстремумов задач (1) и (2) будут совпадать [9]. Для проверки одноэкстремальности задачи (2) достаточно решить задачу выпуклой оптимизации

$$\min\{d \mid z \in S, r\|z\|^2 \leq d\}.$$

Если для решения этой задачи z^* выполняется условие $r\|z^*\|^2 = d$, то z^* - точка глобального максимума задачи (2) которая однозначно определяет точку глобального минимума задачи (1). В общем случае, необходимо определить минимальное значение d , для которого выполняется условие $r\|z(d)\|^2 = d$. Это значение d легко найти методом дихотомии, учитывая, что

$r\|z(d)\|^2 - d$ монотонно возрастает при увеличении d . Таким образом, необходим эффективный алгоритм для решения задачи (2) при фиксированном d . Ниже предлагается такой алгоритм.

1. Выбираем большое значение d и точность решения ϵ .
2. При фиксированном значении d задачу (2) будем решать методом Келли [10]. В этом методе выпуклое множество помещается в прямоугольный параллелепипед P и решается задача

$$\max\{\|z\|^2 \mid x \in P\}.$$

Точку глобального максимума на параллелепипеде найти легко, ее решение совпадает с решением выпуклой задачи

$$\max\{c^T z \mid x \in P\},$$

где c – центр параллелепипеда P . Пусть z^1 – решение выпуклой задачи.

3. Проверяем найденную точку z^1 на допустимость $z^1 \in S$. Если это условие выполняется с заданной точностью ϵ , то точка z^1 – решение задачи (2) при фиксированном значении d , переходим к шагу 5.

4. Строим отсечение Келли

$$f_k(z^1) + \nabla f_k^T(z^1)(z - z^1) \leq 0,$$

где индекс k определяем из условия

$$\max\{f_i(z^1)\} = f_k(z^1).$$

Строим усеченный параллелепипед

$$P_1 = \{z \mid z \in P, f_k(z^1) + \nabla f_k^T(z^1)(z - z^1) \leq 0\}.$$

Далее, решаем задачу

$$\max\{\|z\|^2 \mid x \in P_1\}. \quad (3)$$

Для ее решения снова используем точную квадратичную регуляризацию, которая позволяет преобразовать задачу (3) к следующей:

$$\max\{\|z\|^2 \mid \|z - a^i\|^2 \leq r_i^2, i = 1, \dots, p\}, \quad (4)$$

где p равно числу граней усеченного параллелепипеда. Допустимым множеством задачи (4) является пересечение шаров, которое получаем при добавлении к линейным ограничениям квадратичного слагаемого $r\|z\|^2$. Эта задача будет содержать новую переменную d_1 , которую находим методом дихотомии. Задача (4) также является многоэкстремальной. Однако ее глобальный максимум находим из решения двойственной к (4) задаче. Переходим к шагу 3.

5. Проверяем условие $r\|z^1\|^2 = d$, если оно выполняется, то задача (2) решена и работа алгоритма завершается. В противном случае, уменьшаем значение d , если $r\|z^1\|^2 > d$ и увеличиваем его, если $r\|z^1\|^2 < d$. Переходим к шагу 2.

Рассмотренный алгоритм сводит решение задачи (2) к решению задачи (4). Для нахождения оптимального значения d используется метод дихотомии. Задачу (4) преобразуем к двойственной выпуклой задаче [9]

$$\min\{g(\lambda) \mid 1 \leq \sum_{i=1}^m \lambda_i, \|z(\lambda) - a^i\|^2 \leq r_i^2, i = 1, \dots, m, \lambda \geq 0\}, \quad (5)$$

где

$$g(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i a^i \|^2}{\sum_{i=1}^m \lambda_i - 1} - \sum_{i=1}^m \lambda_i (\|a^i\|^2 - r_i^2),$$

а

$$z(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i a^i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i - 1}. \quad (6)$$

Выпуклую задачу (5) решаем методом PDIPM и по формуле (6) определяем решение задачи (4).

Эффективность рассмотренного алгоритма зависит от количества отсечений в методе Келли. Для некоторых задач такое число может быть достаточно большим. Тогда проще аппроксимировать выпуклое множество $S(d)$ пересечением шаров. Такая аппроксимация возможна, так как при увеличении r множество $\{x \mid f_i(x) + r \|x\|^2 \leq d\}$ стремится к шару.

С помощью рассмотренного алгоритма было решено более 200 тестовых задач различной размерности с большим числом локальных экстремумов. Эти эксперименты показали, что для данного прямо-двойственного метода точной квадратичной регуляризации (PDEQR) нет альтернативного метода по эффективности. Результаты некоторых численных экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Сравнительные численные эксперименты

№ п/п	Задача	n	m	Метод PDEQR глоб. минимум	Risk Solver глоб. минимум	Лучший известный глоб. минимум
1	P4	50	0	-49,6238	-42,56144555	-49,5856
2	P13	10	0	-4189,828873	-4189,82887	-4189,829
3	P30	20	0	-17313,8055	-13581,2829	-14371,8
4	P33	20	0	0	0,0143994	1,42553
5	P34	20	0	-9819,531542	-8468,950482	-9742,310076
6	P35	49	1	-0,98284629	-0,5322069	-
7	P36	40	0	-1560	-1550,5	-
8	P37	30	0	0	0,298427	0,038864
9	P39	10	0	0,000520166	0,015000848	-
10	P40	5	0	0,02299238	0,02300068	0,02299238
11	P41	10	0	0,000149582	0,099873349	0,1(0)
12	P42	30	0	0,002922475	0,005434292	0
13	P43	10	0	-1	-0,843339871	-0,84334
14	P45	10	0	1,4E-06	41,86057	8,2334401
15	P46	10	0	-87,06859302	-86,82681897	-
16	P47	20	0	- 0.822366068	-	- 0,65789
17	P53	18	0	9,17984718	9,21818213	-
18	P62	10	0	-30491,15791	-11131,04786	-
19	P68	20	0	-32,346407	-28,2758	-
20	P74	20	0	-43,53286	-33,91731	-
21	PC9	9	13	-0,877912564	-0,671391496	-0,866025404
22	PC17	5	3	-5675,620079	-2642,715188	-
23	PC21	14	15	0,0311596	0,057406	-
24	PC29	9	2	-28,78870202	-15,02661779	-
25	PC39	7	27	-0,74916161	-0,72963788	-0,749137
26	PC49	6	6	-13,40190356	-12,5079	-
27	PC50	7	14	-1772,802	-1766,37 ($f_{\infty} > 0$)	-
28	PC51	6	2	-316,69538	-311,0099891	-316,27
29	PC55	16	21	156,2196293	-	174,788
30	PC56	15	2	-25,24210863	-16,6359	-
31	PC57	4	7	0,341739553	1,911072271	-
32	PC59	10	6	0,97888325	1,55509795	1,1437
33	PC72	4	3	23,85531631	29,8943782	29,8943782
34	PC76	10	8	-8637,427724	-8338,945239 ($g > 0$)	-
35	PC78	8	6	-1,00905	-	-0,0202

Эксперименты проводились с известными тестовыми задачами, на которых проверяются все новые методы. Для сравнения, использовался программный пакет Risk Solver, который реализует следующие методы глобальной оптимизации: мултистарт, интервальный анализ, методы разветлений и границ, генетические и эволюционные методы, табу и метод рассеяния. Показаны также лучшие результаты, найденные другими методами. Для всех приведенных задач лучшим методом является PDEQR. Постановки тестовых задач, приведенных в табл. 1, даны в работе [9].

Выводы. Рассматриваются наиболее эффективные методы для решения различных классов задач оптимизации. Для решения многоэкстремальных задач, которые возникают при математическом моделировании сложных систем, предлагается прямо-двойственный метод точной квадратичной регуляризации. Этот метод позволяет преобразовывать многоэкстремальные задачи к одноэкстремальным. Для решения вспомогательных задач используется эффективный метод PDPM и метод дихотомии. Сравнительные численные эксперименты подтверждают эффективность нового метода.

Список литературных источников

1. Nocedal J. Numerical optimization / J. Nocedal, S.J. Wright. – Springer, 2006. – 685 p.
2. Косолап А. И. Методы глобальной оптимизации. – Днепропетровск: Наука и образование, 2013. – 316 с.
3. Ye Y. Semidefinite programming / Y. Ye. – Stanford University, 2003. – 161 p.
4. Косолап А.И. Симлекс-метод для решения задач полуопределенного программирования / А.И. Косолап // Вісник Донецького Національного університету. Природничі науки. – Донецьк : 2009. – вип. 2. – С. 437–442.
5. Косолап А.И. Численная эффективность методов полуопределенной оптимизации/А.И. Косолап, А.С. Перетятко // Проблемы управления и информатики. – 2014.- №2. – С. 56-64.
6. Horst R. Global Optimization: Deterministic Approaches /R. Horst, Н. Tuy. – 3rd ed., Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 727 p.
7. Kenneth V.P. Differential Evolution. A Practical Approach to Global Optimization/ V.P. Kenneth, R.M. Storn, J.A. Lampinen. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – 542 p.
8. Нестеров Ю.Е. Методы выпуклой оптимизации /Ю.Е. Нестеров. М.: Изд. МЦНМ, 2010. – 281 с.
9. Косолап, А. И. Глобальная оптимизация. Метод точной квадратичной регуляризации / А. И. Косолап – Днепропетровск: ПГАСА, 2015 – 164 с.
10. Мину М. Математическое программирование / М. Мину; пер. с фран. А.И. Штерна. – М.: Наука, 1990.– 487 с.

КВАДРАТИЧНАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ДАТЧИКОВ В СЕТИ

А.И. Косолап, А.С. Перетятко

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Вступление. В современном информационном обществе существует проблема автоматического сбора данных. Одним из основных факторов автоматизации сбора данных являются датчики, которые обеспечивают информационные сети данными. От количества и структуры датчиков зависит эффективность обработки данных, поступающих в компьютер. Существуют системы, которые уже имеют какое-то количество датчиков с заданной структурой, и необходимо дополнить эту структуру новыми датчиками. Задача локализации (расположения) датчиков в сети заключается в том, чтобы определить такую структуру датчиков, которая будет полностью охватывать заданный объект [1,2,3]. При большом количестве датчиков задача становится сложной и требует разработки новых методов ее решения.

Постановка задачи. Пусть имеем граф $G = (V, E)$ и набор неотрицательных весов

$\{d_{ij} : (i, j) \in E\}$. В задаче локализации датчиков в сети вершины разделены на два подмножества: первое подмножество – множество закрепленных вершин, чья точная позиция известна, второе подмножество – множество датчиков, чье расположение неизвестно. Целью является определить позицию всех новых датчиков.

Рассмотрим n -мерное *евклидово пространство* R^n . Пусть имеем m закрепленных вершин графа $a^1, \dots, a^m \in R^n$ и k вершин $x^1, \dots, x^k \in R^n$, чье расположение нам необходимо определить. К тому же, нам известны p значений расстояний d_{ij} между a^i и x^j для некоторых i, j , и l значений \bar{d}_{ij} между x^i и x^j для некоторых $i < j$. Задача локализации датчиков в сети заключается в поиске таких $x^1, \dots, x^k \in R^n$, которые удовлетворяют условиям

$$\|a^i - x^j\|^2 = d_{ij}^2, \|x^i - x^j\|^2 = \bar{d}_{ij}^2. \quad (1)$$

Решить эту нелинейную квадратичную систему уравнений (1) достаточно сложно, поэтому заменим ее оптимизационной задачей

$$\max \left\{ \sum_{\forall i, j} (\|a^i - x^j\|^2 - d_{ij}^2) + \sum_{\forall i \neq j} (\|x^i - x^j\|^2 - \bar{d}_{ij}^2) - \|z\|^2 - \|\bar{z}\|^2 \right\} \quad (2)$$

при ограничениях

$$\|a^i - x^j\|^2 \leq d_{ij}^2 + z_{ij}, \|x^i - x^j\|^2 \leq \bar{d}_{ij}^2 + \bar{z}_{ij}, \quad (3)$$

где z_{ij} – отклонение от заданного расстояния между i -той вершиной и j -тым датчиком ($\forall (i, j), i=1, \dots, m, j=1, \dots, k$); \bar{z}_{ij} – отклонение от заданного расстояния между i -тым и j -тым датчиками ($i < j, i=1, \dots, k, j=2, \dots, k$). Все значения z_{ij} , где $i=1, \dots, m, j=1, \dots, k$, формируют вектор z размерности p , где p – количество известных расстояний d_{ij} . Все значения \bar{z}_{ij} , где $i < j, i=1, \dots, k, j=2, \dots, k$, формируют вектор \bar{z} размерности l , где l – количество расстояний \bar{d}_{ij} .

Целевая функция (2) – квадратичная, а допустимая область (3) является выпуклой. Очевидно, что задача (2-3) всегда имеет решение.

Эту квадратичную оптимизационную задачу (3) преобразуем к задаче полуопределенной оптимизации и используем полуопределенную релаксацию для ее решения. В большинстве ранних методов данная проблема сводится к задаче нелинейной глобальной оптимизации. Альтернативный подход – с использованием полуопределенной оптимизации – был разработан относительно недавно [4]. Получим следующую задачу полуопределенной оптимизации

$$\min \left\{ C \bullet X \mid \begin{array}{l} A_{ij} \bullet X \leq 0, \quad \forall (i, j), \quad i=1, \dots, m, \quad j=1, \dots, k, \quad X \succeq 0 \\ \bar{A}_{ij} \bullet X \leq 0, \quad i < j, \quad i=1, \dots, k, \quad j=2, \dots, k, \quad X \succeq 0 \end{array} \right\}, \quad (4)$$

$$\text{где } X = \begin{pmatrix} X_1 & X_2 \\ X_2^T & X_3 \end{pmatrix} \text{ размерности } (n+k+p+l) \times (n+k+p+l); \quad (5)$$

$$X_1 = I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times n;$$

$$X_2 = \begin{pmatrix} x_1^1 & \dots & x_1^k & z_1 & \dots & z_p & \bar{z}_1 & \dots & \bar{z}_l \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x_n^1 & \dots & x_n^k & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times (k + p + l);$$

$$X_3 = X_2^T X_2 \text{ размерности } (k + p + l) \times (k + p + l).$$

Рассчитаем матрицы ограничений A_{ij} . Из (3) имеем

$$\begin{aligned} \|a^i - x^j\|^2 - d_{ij}^2 - z_{ij} &= -d_{ij}^2 + \|a^i\|^2 + \|x^j\|^2 - 2a^i x^j - z_{ij} = \\ &= -d_{ij}^2 + (a_1^i{}^2 + \dots + a_n^i{}^2) + (x_1^j{}^2 + \dots + x_n^j{}^2) - 2(a_1^i x_1^j + \dots + a_n^i x_n^j) - z_{ij} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая (5) и (6), имеем, что

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} A_1 & A_2 \\ A_2^T & A'_j \end{pmatrix} \text{ размерности } (n + k + p + l) \times (n + k + p + l),$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} (-d_{ij}^2 + \|a^i\|^2) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times n,$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & \dots & -a_1^i & 0 & \dots & -0.5 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -a_n^i & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times (k + p + l),$$

$$A'_j = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } (k + p + l) \times (k + p + l).$$

Таким образом, в матрице A_2 в j -том столбце элементы равны компонентам вектора a^i , взятым с противоположным знаком, и элемент, соответствующий z_{ij} в матрице X_2 , равен -0.5 . Все элементы матрицы A'_j равны нулю, кроме $a_{jj} = 1$.

Рассчитаем матрицы ограничений \bar{A}_{ij} . Из (3) имеем

$$\begin{aligned} \|x^i - x^j\|^2 - \bar{d}_{ij}^2 - \bar{z}_{ij} &= -\bar{d}_{ij}^2 + \|x^i\|^2 + \|x^j\|^2 - 2x^i x^j - \bar{z}_{ij} = \\ &= -\bar{d}_{ij}^2 + (x_1^i{}^2 + \dots + x_n^i{}^2) + (x_1^j{}^2 + \dots + x_n^j{}^2) - 2(x_1^i x_1^j + \dots + x_n^i x_n^j) - \bar{z}_{ij} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Тогда, учитывая (5) и (7), имеем

$$\bar{A}_{ij} = \begin{pmatrix} \bar{A}_1 & \bar{A}_2 \\ \bar{A}_2^T & \bar{A}'_{ij} \end{pmatrix} \text{ размерности } (n+k+p+l) \times (n+k+p+l),$$

$$\bar{A}_1 = \begin{pmatrix} -\bar{d}_{ij}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times n,$$

$$\bar{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & -0.5 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 0 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times (k+p+l),$$

$$\bar{A}'_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & & & & & & \\ 0 & \dots & 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & & & & & & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } (k+p+l) \times (k+p+l).$$

Таким образом, в матрице A_2 все элементы равны нулю, кроме элемента, соответствующего \bar{z}_{ij} в матрице X_2 , который равен -0.5 . Все элементы матрицы A'_j равны нулю, кроме $a_{ii} = a_{jj} = 1$, $a_{ij} = a_{ji} = -1$.

Очевидно, что количество ограничений A_{ij} будет p , а количество ограничений \bar{A}_{ij} будет l .

Используя рассуждения (6) и (7), получим, что матрица C будет иметь размерность $(n+k+p+l) \times (n+k+p+l)$ и следующий вид

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix},$$

$$\text{где } C_{11} = \begin{pmatrix} \sum (-d_{ij}^2 + \|a^i\|^2) - \sum \bar{d}_{ij}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times n,$$

$$C_{12} = \begin{pmatrix} -a_1^1 & \dots & -a_1^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_n^1 & \dots & -a_n^k \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times k, \quad C_{13} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } n \times (p+l),$$

$$C_{21} = C_{12}^T \text{ размерности } k \times n, \quad C_{22} = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & 2 & -1 & \dots & -1 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & -1 & \dots & 2 \end{pmatrix} \text{ размерности } k \times k,$$

$$C_{23} = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \text{ размерности } k \times (p+l),$$

$$C_{31} = C_{13}^T \text{ размерности } (p+l) \times n, \quad C_{32} = C_{23}^T \text{ размерности } (p+l) \times k,$$

$$C_{33} = I, \text{ где } I - \text{ единичная матрица размерности } (p+l) \times (p+l).$$

Таким образом, задачу (4) можем записать в общем виде:

$$\min \{ C \bullet X \mid A_i \bullet X \leq 0, X \succeq 0 \}. \quad (8)$$

Для решения задачи (8) применяется процедура нахождения верхних и нижних оценок [5].

Покажем, что найденное решение задачи (8) будет допустимым для задачи (2-3).

Теорема 1. Пусть

$$x^T A x + b^T x + c \leq 0$$

квадратичное ограничение задачи квадратичной оптимизации, матрица A – положительно определенная, X – решение соответствующей задачи SDP и \bar{X} – первая строка матрицы X ($\bar{x} = (1, x)$), тогда

$$x^T A x + b^T x + c \leq \bar{A} \bullet X, \quad (9)$$

где

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} c & b^T / 2 \\ b/2 & A \end{pmatrix}.$$

Доказательство. Квадратичное ограничение преобразуется к виду

$$x^T A x + b^T x + c = A_0 \bullet X + A_1 \bullet X,$$

где

$$A_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix}, \quad A_1 = \begin{pmatrix} c & b^T / 2 \\ b/2 & 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{A} = A_0 + A_1.$$

Теперь достаточно показать, что

$$x^T A x = \bar{x}^T A_0 \bar{x} \leq A_0 \bullet X,$$

где $\bar{x} = (1, x)$.

Представим положительно определенную матрицу X в виде

$$X = x x^T + Y, \quad (10)$$

где Y – положительно полуопределенная матрица. Тогда (10) можно записать в виде

$$X = \bar{x} \bar{x}^T + \sum y_i y_i^T. \quad (11)$$

Умножим скалярно обе части равенства (11) на матрицу A , получим

$$A_0 \bullet X = A_0 \bullet xx^T + \sum A_0 \bullet y_i y_i^T.$$

Так как матрица A_0 – положительно полуопределенная, то

$$\sum A_0 \bullet y_i y_i^T = \sum y_i^T A_0 y_i \geq 0,$$

но тогда

$$A_0 \bullet X \geq A_0 \bullet \bar{x}\bar{x}^T = \bar{x}^T A_0 \bar{x} = x^T A x,$$

откуда следует (9). Теорема доказана.

Из теоремы следует, что решение соответствующей задачи SDP позволяет получить допустимое решение, которое определяет нижнюю оценку решения задачи (2-3). Значение целевой функции задачи SDP даст верхнюю оценку целевой функции задачи (2-3).

Выводы. Задача оптимального расположения датчиков в сети сведена к задаче полуопределенной оптимизации. Для решения задачи полуопределенной оптимизации использовался полуопределенный симплекс-метод [6]. Этот метод позволяет находить оптимальные решения задачи расположения или нижнюю и верхнюю оценку значений целевой функции. Найденное решение уточнялось прямо-двойственным методом внутренней точки для исходной задачи квадратичной оптимизации. Выполненные численные эксперименты для этого класса задач подтверждают эффективность выбранного метода.

Список литературных источников

1. Anderson B.D.O. Wireless sensor network localization techniques / B.D.O. Anderson, G. Mao, B. Fidan // Computer Networks. – 2007. – № 51. – P. 2529–2553.
2. Cassioli A. Solving the Sensor Network Localization Problem using an Heuristic Multistage Approach [Электронный ресурс] / A. Cassioli. – Електрон. дані (1 файл). – Режим доступу: www.optimization-online.org/DB_FILE/2009/03/2267.pdf.
3. Krislock N. Explicit Sensor Network Localization using Semidefinite Representations and Facial Reductions / N. Krislock, F. Wolkowicz. – 2010. – Vol. 20. – No. 5. – P. 2679–2708.
4. Man-Cho A. Theory of Semidefinite Programming for Sensor Network Localization [Электронный ресурс] / A. Man-Cho, Y. Ye. – Електрон. дані (1 файл). – ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms, 2004. – 16 p. – Режим доступу: web.stanford.edu/~yye/local-theory.pdf.
5. Косолап А.И. Верхние и нижние оценки решений в общих задачах квадратичной оптимизации / А.И. Косолап, А.С. Перетягько // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» – 2013. – Вип. 23, № 1089. – С. 96–102.
6. Косолап А. И. Численная эффективность методов полуопределенной оптимизации / А. И. Косолап, А. С. Перетягько // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 2. – С. 56–64.

МАКСИМИЗАЦИЯ НОРМЫ ВЕКТОРА НА МНОГОГРАННИКЕ

А.И. Косолап, А.С. Романчук

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

Многие математические оптимизационные модели сложных систем являются многоэкстремальными. Для решения таких задач пока не разработаны эффективные алгоритмы поиска глобального экстремума. Существуют математические модели, которые содержат 2^n или $n!$ или больше локальных экстремумов. К этому классу относится, например, задача равновесия системы атомов или задачи упаковки шаров. Локальные методы для решения таких задач будут «застывать» в окрестности начальной точки. В последние годы распространение получили методы, использующие случайный поиск. Существующие методы случайного поиска (генетические, эволюционные и др. алгоритмы) иногда позволяют находить оптимальные решения, но в большинстве случаев такие решения далеки от оптимальных [1]. Это подтверждают решения многих тестовых задач. Детерминированные методы ветвей и границ требуют слишком большого компьютерного времени для нахождения решения даже при

решении задач малой размерности [2]. Другие методы, используют аппроксимацию допустимой области, малоэффективны для задач большой размерности. Необходимы новые идеи для решения сложных многоэкстремальных задач.

Задача максимизации евклидовой нормы на выпуклом множестве возникает при использовании точной квадратичной регуляризации применительно к широкому классу многоэкстремальных задач [3]. Каждое выпуклое множество с любой наперед заданной точностью аппроксимируется многогранником. Поэтому результаты полученные для многогранника будут справедливы и для произвольного выпуклого множества.

Рассмотрим задачу

$$\max\{\|x\|^2 \mid Ax = b, x \geq 0, x \in E^n\}, \quad (1)$$

где $\|\cdot\|$ - евклидова норма вектора, A - матрица размера $(m \times n)$, b - вектор размерности m , x - вектор размерности n , E^n - евклидово пространство. Если $m = 1$, то многогранник задачи (1) превращается в симплекс

$$\max\{\|x\|^2 \mid a^T x = b, x \geq 0, x \in E^n\}, \quad (2)$$

где $a > 0$. Даже в этом простом случае, задача (2) будет иметь n локальных максимумов. Если допустимым множеством задачи (1) будет гиперкуб, то она может иметь 2^n локальных максимумов. Известно, что точками локальных максимумов задачи (1) являются вершины многогранника, однако перебор всех вершин многогранника невозможен.

Для решения задачи (1) будем использовать преобразования, которые позволяют сократить число локальных максимумов. Сначала рассмотрим задачу (1) на отрезке

$$\max\{\|x\|^2 \mid x = (1 - \alpha)x^1 + \alpha x^2, 0 \leq \alpha \leq 1, x \in E^n\}, \quad (3)$$

где точки x^1, x^2 определяют отрезок. Очевидно, что задача (3) может иметь два локальных максимума на концах отрезка. Справедливо следующее утверждение.

Лемма 1. *Задача (3) одноэкстремальна тогда и только тогда, когда решение одноэкстремальной задачи*

$$\min\{\|x\|^2 \mid x = (1 - \alpha)x^1 + \alpha x^2, x \in E^n\} \quad (4)$$

не принадлежит интервалу $\alpha \in (0,1)$.

Доказательство леммы 1 следует из того факта, что функция $\|x\|^2$ по мере удаления от точки минимума задачи (4) монотонно возрастает. Следовательно, если отрезок $[x^1, x^2]$ не содержит точку минимума задачи (4), то на этом отрезке функция $\|x\|^2$ монотонно возрастает и ее максимум достигается только на одном конце отрезка. Если же интервал (x^1, x^2) содержит точку минимума задачи (4), то локальных максимумов функции $\|x\|^2$ будет два, на каждом конце отрезка.

Пусть задача (3) имеет два локальных максимума. Покажем, что существует преобразование пространства, при котором преобразованная задача (3) будет иметь только один локальный максимум. Легко найти решение задачи (4)

$$\alpha^* = \frac{x^1(x^2 - x^1)}{\|x^2 - x^1\|^2}.$$

Преобразуем систему координат посредством сдвига $z = x + h$ и используем точную квадратичную регуляризацию [3]. Тогда задача (3) преобразуется к виду

$$\max\{\|x\|^2 - \|x - h\|^2 + 2\|x\|^2 \leq d, x = (1 - \alpha)(x^1 - h) + \alpha(x^2 - h), 0 \leq \alpha \leq 1\}, \quad (5)$$

где d - новая переменная, а размерность вектора x увеличивается на единицу. Легко показать, что точки отрезка $[x^1 - h, x^2 - h]$ будут удовлетворять первому ограничению задачи (5). Поэтому для определения ее одноэкстремальности достаточно решить задачу

$$\min\{\|x\|^2 \mid x = (1 - \alpha)(x^1 - h) + \alpha(x^2 - h)\},$$

решением которой будет значение

$$\alpha^h = \frac{(x^1 - he)^T (x^2 - x^1)}{\|x^2 - x^1\|^2},$$

где $e = (1, \dots, 1)$. Если $e^T (x^2 - x^1) \neq 0$, то существует такое $h > 0$ при котором $\alpha^h \notin (0, 1)$. Это значение h находим из условий

$$\begin{aligned} \frac{(x^1 - he)^T (x^2 - x^1)}{\|x^2 - x^1\|^2} (x^2 - x^1) &= 0, \\ \frac{(x^1 - he)^T (x^2 - x^1)}{\|x^2 - x^1\|^2} (x^2 - x^1) &= x^2 - x^1. \end{aligned}$$

Достаточно выбрать меньшее значение h из решений этих уравнений. Для заданного значения h преобразованная задача (3) будет одноэкстремальной. Условие $e^T (x^2 - x^1) = 0$ легко устраним линейным преобразованием. Например, $z = cx$, где не все компоненты вектора c совпадают.

Вернемся к решению задачи (2). Если все компоненты вектора a равны, то эта задача имеет n локальных максимумов, но значения функции $\|x\|^2$ в них совпадают. Поэтому будем предполагать, что не все компоненты вектора a совпадают. Справедливо следующее утверждение.

Теорема 1. *Существует такое $h > 0$, что преобразование $z = x + h$ преобразует задачу (2) к одноэкстремальной.*

Одноэкстремальность задачи (2) зависит от решения задачи

$$\min\{\|x\|^2 \mid a^T (x - h) = b, x \geq h\}. \quad (6)$$

Ее решением находим методом множителей Лагранжа (не учитывая неравенство $x \geq h$). Имеем

$$x = \frac{(b + a^T e h) a}{\|a\|^2}.$$

Обозначим через a_{\min} - минимальную компоненту вектора a и решим линейное уравнение

$$\frac{(b + a^T e h) a_{\min}}{\|a\|^2} = h.$$

Имеем

$$h = \frac{b a_{\min}}{\|a\|^2 - a^T e a_{\min}}.$$

Равенство нулю знаменателя исключается, так как не все компоненты вектора a не совпадают. При найденном значении h , точка минимума задачи (6) лежит на границе области $x \geq h$ и в соответствии с леммой 1 задача (2) будет одноэкстремальной. Таким образом, утверждение теоремы 1 справедливо.

Рассмотрим общий случай задачи (1). Решение вспомогательной выпуклой задачи

$$\min\{\|x\|^2 \mid Ax = b, x \in E^n\} \quad (7)$$

находим методом множителей Лагранжа

$$x = A^T (AA^T)^{-1} Ab.$$

При смещении пространства $z = x + h$ решение задачи (7) приобретает вид

$$x = A^T (AA^T)^{-1} A(b + Aeh).$$

Теперь для условия $x \geq 0$ в матрице A необходимо обнулить $n - 1$ строку и $n - 1$ столбец. Обозначим такую матрицу через A_0 . Эта матрица определяет ребро многогранника задачи (1).

Тогда задача (1) будет одноэкстремальной, если уравнение

$$A_0^T (A_0 A_0^T)^{-1} A_0 (b + A_0 e h) = h$$

имеет решение для всех возможных матриц A_0 . Среди всех решений выбираем минимальное значение h . Если $h = \infty$, то необходимо производить еще одно линейное преобразование пространства.

Выводы. Задача максимума нормы вектора на многограннике является многоэкстремальной, но простым преобразованием пространства она сводится к одноэкстремальной. Для одноэкстремальных задач лучшим является прямо-двойственный метод внутренней точки [4]. Рассмотренное преобразование пространства может быть использовано и в более общих случаях, например, при выпуклых квадратичных ограничениях.

Список литературных источников

1. Kenneth V.P. Differential Evolution. A Practical Approach to Global Optimization/ V.P. Kenneth, R.M. Storn, J.A. Lampinen. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – 542 p.
2. Horst R. Global Optimization: Deterministic Approaches /R. Horst, Н. Tuy. – 3rd ed., Berlin: Springer-Verlag, 1996. – 727 p.
3. Косолап, А. И. Глобальная оптимизация. Метод точной квадратичной регуляризации / А. И. Косолап – Днепропетровск: ПГАСА, 2015 – 164 с.
4. Nocedal J. Numerical optimization / J. Nocedal, S.J. Wright. – Springer, 2006. – 685 p.

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ЩОДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДИСКРЕТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОРОДУЮЧИХ ШАРНІРНО-СТЕРЖНЕВИХ СИСТЕМ Р.В. Коструб

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпропетровськ

Руйнування елементів обладнання, яке використовується на промислових підприємствах, зокрема хімічної галузі, може призвести до значних економічних втрат. Однією з причин руйнування є вплив агресивного середовища, і як результат, корозія поверхневого шару металу. Попередити це можливо збільшивши товщину металу з якого складається конструкція. Це зменшить ризик передчасного руйнування конструкції, але може значно збільшити її вартість та вагу. Для вирішення цих проблем потрібно мати спосіб створити таку конструкцію, яка буде зберігати свої несучі властивості протягом строку експлуатації. В цій статті пропонується постановка задачі дискретної оптимізації кородуючих шарнірно-стержневих конструкцій (ШСК) та розглядаються методи її розв'язання.

Існує багато методів оптимізації конструкцій, які використовують різноманітні підходи. Багато з них використовують методи математичного програмування, огляд таких праць наведено в роботі [1]. Але вони можуть використовуватись лише за деяких умов: існування функції цілі в аналітичному вигляді, неперервна диференційованість цієї функції та гладкість області пошуку. Так як ці умови виконуються не завжди доцільним вважається використання інших методів, які позбавлені цих недоліків, а саме генетичних алгоритмів. Ідея їх використання в задачах оптимального проектування не нова, огляд сучасного стану застосувань розглядається в роботі [2]. З них можна виділити роботу [3], в якій вперше був використаний генетичний алгоритм саме для дискретної оптимізації конструкцій. Також, в огляді [2] згадано роботи, в яких запропоновані вдосконалення генетичного алгоритму, зокрема, шляхом варіювання вірогідності мутації [4] та використання оператора кроссоверу [5].

Одним з недоліків наведених вище робіт є те, що в них не враховується вплив агресивного середовища, а тому використання результатів для проектування елементів обладнання, що буде використовуватись в такому середовищі неможливе.

Для врахування впливу агресивного середовища недостатньо просто збільшити товщину металу на величину рівну добутку середньої швидкості корозії за рік та запланованого строку функціонування конструкції, адже не буде врахований вплив напруженого стану на швидкість протікання корозії. В роботі В.М. Долинського [6] отримано модель в якій швидкість корозії лінійно залежить від напруження. А в роботі Д. Г. Зеленцова [7] отримані аналітичні вирази для

цієї моделі які відображають залежність довговічності елемента довільного перерізу для випадку статично визначеної конструкції.

В загальному вигляді задача оптимізації має такий вигляд [8]: дано функція цілі $f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$ та функції обмежень $g_j(x) = 0, j = 1, \dots, m; g_j(x) \leq 0, j = m + 1, \dots, p$; які визначають множину допустимих розв'язків X . Потрібно знайти мінімум функції цілі на множині X , тобто таку точку $x^* \in X$, що:

$$f(x^*) = \min_{x \in X} f(x) \quad (1)$$

$$\text{де } X = \left\{ x \left| \begin{array}{l} g_j(x) = 0, j = 1, \dots, m; m < n \\ g_j(x) \leq 0, j = m + 1, \dots, p \end{array} \right. \right\}.$$

В якості функції цілі використовується об'єм отриманої конструкції (2).

$$V(\bar{x}) = \sum_{i=1}^N A_i(\bar{x}) \cdot L_i \rightarrow \min \quad (2)$$

де \bar{x} – вектор варійованих параметрів, N – кількість елементів в ШСК, A_i, L_i – площа та довжина i -го стержня.

В якості обмежень виступають наступні співвідношення:

$$\begin{cases} g_1 : [\sigma] - \sigma_i(\bar{x}, t^*) \geq 0; i = \overline{1, N} \\ g_2 : \sigma_j^*(\bar{x}, t^*) - \sigma_j(\bar{x}, t^*) \geq 0; j \in J \\ x_k \in [x_k^1; x_k^2; \dots, x_k^n]; k = \overline{1, K} \end{cases} \quad (3)$$

де K – кількість варійованих параметрів, J – множина стержнів що працюють на стиснення, $\sigma_i, \sigma_j, [\sigma]$ – напруження, критичне напруження втрати стійкості, граничне значення напруження, t^* – заданий строк служби.

Для обчислення значень функцій обмежень використаємо модель поведінки кородуючої конструкції яка складається з:

1) Системи рівнянь метода скінченних елементів (МСЕ) (4):

$$\begin{cases} \bar{u} = K^{-1} \cdot \bar{R} \\ \bar{\varepsilon} = D \cdot \bar{u} \\ \bar{\sigma} = E \cdot \bar{\varepsilon} \end{cases} \quad (4)$$

де $\bar{R}, \bar{u}, \bar{\varepsilon}, \bar{\sigma}$ – вектори навантажень, переміщень, деформацій та напружень.

2) Системи диференціальних рівнянь (ДР), що описує корозійний процес:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = V_0 \psi(\sigma_i(\bar{\delta})) : \delta_i|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

$$\psi|_{\sigma=0} = 1 \quad (6)$$

$$\delta_i^S = \delta_i^{S-1} + h V_0 \psi(\sigma_i^{S-1}(\bar{\delta}^{S-1}))$$

де δ – глибина корозійного пошкодження, t – час, V_0 – швидкість корозії при відсутності напруження, σ – абсолютна величина напруги, ψ – деяка відома функція.

Вираз (5) – це модель корозійного процесу, яка отримана В.М.Долинським в роботі [6], в ній параметр пошкодження лінійно залежить від величини напруження. Розв'язати систему рівнянь (5) можна тільки чисельно, наприклад методом Ейлера (6). Отримання розв'язку такої системи зв'язане зі значними обчислювальними затратами, тому в якості наближеного значення

часу функціонування використовується аналітична формула (7) в якій не приймається до уваги зміна зусиль в конструкції:

$$t^* = t_0 - \frac{2kQ}{v_0 \cdot |d|} \left\{ \arctg \frac{2\alpha\delta - P_0}{|d|} + \arctg \frac{P_0}{|d|} \right\} \quad (7)$$

де P_0 – периметр перерізу в початковий момент часу, Q – величина осевого зусилля, $t_0 = \frac{\delta^*}{V_0}$,

α – коефіцієнт форми перерізу.

Так як функція цілі не задана в аналітичному вигляді ми не можемо використовувати градієнтні методи для оптимізації конструкції. Через це було вирішено використати генетичний алгоритм (ГА) – еволюційний алгоритм пошуку що базується на механіці природного відбору яка зустрічається в генетиці. Вони комбінують в собі принцип виживання найприспособішого та структурованого але в той час випадкового обміну інформацією. Кожна особина представляє собою можливий розв'язок задачі оптимізації закодований певним чином. В кожному поколінні для створення нового набору особин використовуються частини найкращих особин з старого покоління. Для оцінки особини використовується так звана фітнес-функція яка є нашою функцією цілі. Генетичні алгоритми використовують дані про минулі покоління, щоб отримати нові точки для пошуку, в яких очікуються покращення результату [9].

Генетичні алгоритми відрізняються від класичних методів оптимізації наступними особливостями[9]:

- 1) ГА працює з закодованими значеннями параметрів, а не з самими параметрами.
- 2) ГА веде пошук в популяції точок, а не в одній точці.
- 3) ГА використовує інформацію про функцію цілі, а не про її похідну або якусь іншу додаткову інформацію.
- 4) ГА використовує імовірнісні правила переходу від однієї особини до іншої, а не детерміновані.

Для отримання нових особин використовується генетичні оператори кроссоверу та мутації.

Кроссовер є аналогом біологічного кроссоверу з двох батьківських особин створюються дві нові дочірні особини які вірогідно матимуть краще значення фітнес-функції. Існує багато методів вибору батьківських особин, але майже завжди в якомусь розумінні «найкращі» особини. В цій роботі використовувався турнірний відбір: випадковим чином береться група особин та вибирається та що має найкраще значення фітнес-функції. Існують також різні типи кроссоверу: найпростіший або одноточковий, двоточковий, багато точковий кросовери. При одно точковому кроссовері в батьківських особинах буде одна точка розриву і відповідно дві ділянки в яких пройде обмін генетичною інформацією, при двоточковому буде дві такі точки і т.д. В цій роботі використовувався одно точковий кроссовер.

Мутація – це генетичний оператор призначений для збереження генетичної різноманітності в популяції. Використання оператора мутації може допомогти оминати локальний мінімум. Його дія полягає в випадковій зміні гену випадкової особини з деякою вірогідністю.

Для зведення задачі з обмеженнями до безумовно оптимізаційної задачі автор використав метод штрафних функцій. Навіть при невеликому порушенні обмежень на значення фітнес-функції накладається штраф, і особина в якій відбувається таке порушення не потрапить в наступну популяцію.

Для кодування особин популяції використовувався трохвимірний масив зображений на рис. 1.

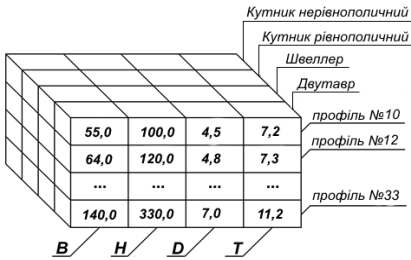


Рисунок 1– Массив розмірів фасонних профілів

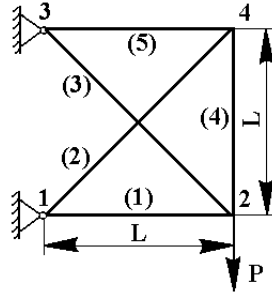


Рисунок 2– Розрахункова схема

До нього занесені відомості про розміри перерізів деяких фасонних профілів та їх типорозміри. Особина складається з генів, кожному елементу конструкції відповідає два гени, ними кодується тип та типорозмір профілю. Слід наголосити що в генах використовуються не власне значення параметрів, а індекси в масиві, тобто простір розв’язків неевклідовий. Тому для розпізнання збіжності популяції – одного з критеріїв зупинки алгоритму було використано умову порівняння до нуля відстані Хеммінга між «найкращою» та «найгіршою» особинами популяції. Іншим можливим критерієм зупинки алгоритму є такий стан популяції, коли на протязі декількох епох не відбувається значних змін значення фітнес-функції «найкращою» особини або була досягнута гранична кількість популяцій.

Для демонстрації можливостей алгоритму розв’яжемо задачу оптимізації п’ятиелементної шарнірно-стержевої системи (Рис.2) з наступними параметрами:

$$P = 200 \text{ кН}, L = 500 \text{ см}, t = 1; 1.5; 2; 2.5 \text{ роки}, E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ МПа}, k = 0.003 \text{ МПа}^{-1},$$

$$[\sigma] = 240 \text{ МПа}, V_0 = 0.1 \frac{\text{см}}{\text{рік}}$$

Оптимальні параметри для неї наведені в табл. 1 (де кутник-1 – рівнополічний кутник, кутник-2 – нерівнополічний кутник). З даних поданих в таблиці 1 можна зробити висновок що алгоритм отримує результати на кордоні допустимої області, хоча деякі елементи мають більший запас довговічності, а значить і витрати матеріалу ці втрати неминучі через дискретну природу задачі.

Таблиця 1 – Оптимальні параметри конструкції

V, см3	t, років	Елементи				
		1	2	3	4	5
Тип; типорозмір; t елемента, років						
51144.4	1.0	швеллер №7 1.64 p.	кутник-2№1 1.37 p.	кутник-2№1 1.37 p.	кутник-1№6 1.47 p.	швеллер №1 1.39 p.
53064.3	1.5	кутник-1№5 2.16 p.	кутник-2№1 1.58 p.	кутник-2№1 1.58 p.	кутник-1№6 2.47 p.	швеллер №2 1.77 p.
57609.1	2.0	кутник-1№5 3.05 p.	кутник-2№2 2.14 p.	кутник-2 №2 2.14 p.	кутник-1№7 3.41 p.	кутник-1№1 2.17 p.
61183.9	2.5	кутник-1№5 3.06 p.	швеллер №1 2.59	швеллер №1 2.59	кутник-1№7 3.4 p.	кутник-2 №4 2.98 p.

Запропонована нова постановка задачі оптимального проектування шарнірно-стержевих конструкцій, яка дозволяє врахувати вплив агресивного середовища. Запропоновано метод розв’язання такої задачі, за допомогою генетичного алгоритму. Одержані розв’язки ілюстративної задачі оптимального проектування п’ятиелементної ШСК. Результати чисельного експерименту показують, що генетичний алгоритм дозволяє одержати розв’язок, який знаходиться біля межі допустимої області.

Слід зазначити, що у цій роботі функції обмежень оптимізаційної задачі обчислюються наближено, з допомогою аналітичної формули, яка враховує зміну з часом внаслідок корозії зусиль в стержневих елементах статично невизначеної конструкції. Тому при розв'язанні диференційних рівнянь що описує корозійний процес, потрібно враховувати зміну зусиль, яка може бути дуже значною. Таке можливо тільки з використанням чисельних алгоритмів, що буде призводити до значного збільшення обчислювальних витрат.

Для можливого використання запропонованої постановки задачі бажано створення надійного, точного та що дуже важливо ефективного алгоритму чисельного розв'язання СДУ.

Список літературних джерел

1. Пелешко І. Д., Юрченко В. В. Оптимальнепроекуванняметалевихконструкцій на сучасномуетапі (оглядпраць) //Металлические конструкции. – 2009. – №. 1. – С. 13-21.
2. Kicinger R., Arciszewski T., De Jong K. Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art //Computers & Structures. – 2005. – Т. 83. – №. 23. – С. 1943-1978.
3. Rajeev S., Krishnamoorthy C. S. Genetic algorithms-based methodologies for design optimization of trusses //Journal of Structural Engineering. – 1997. – Т. 123. – №. 3. – С. 350-358.
4. Fogarty T. C. Varying the probability of mutation in the genetic algorithm //Proceedings of the third international conference on Genetic algorithms. – Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989. – С. 104-109.
5. Schaffer J. D., Eshelman L. J. On Crossover as an Evolutionarily Viable Strategy //ICGA. – 1991. – Т. 91. – С. 61-68.
6. Долинский В. М. Расчет элементов конструкций, подверженных равномерной коррозии //Исследования по теории оболочек. – Казань, 1976. – №. 7. – С. 37-42.
7. Зеленцов Д. Г. Расчёт конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы //Днепропетровск: УГХТУ. – 2002.
8. Пантелеев А. В., Летова Т. А. Методы оптимизации в примерах и задачах //М.: Высш. шк. – 2002. – Т. 544.
9. Golberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning //Addison Wesley. – 1989. – 432 с.

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТАЕВРИСТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ГЛОБАЛЬНОЇ МІНІМІЗАЦІЇ ФУНКЦІЙ Н.О. Красношлик

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького, Черкаси

У роботі розглянуто метаевристичний алгоритм кажанів розв'язування задачі глобальної мінімізації. Даний алгоритм відноситься до алгоритмів ройового інтелекту, які інтенсивно розвиваються в останні роки. Алгоритм кажанів, запропонований у 2010 р. Xin-She Yang [1], і є потенційно більш потужним, ніж алгоритм рою часток або генетичний алгоритм.

Необхідно знайти глобальний умовний мінімум функції $f(x)$ на множині X :

$$f(x^*) = \min_{x \in X \subseteq R^m} f(x), \quad (1)$$

де $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$, $X = \{x | x_i \in [x_{\min}, x_{\max}], i \in \overline{1, m}\}$.

Основними складовими алгоритму є: особливості переміщення кажанів у просторі та характеристики звукових сигналів, які вони генерують.

Робота алгоритму ґрунтується на наступній моделі поведінки кажанів [1]:

1. Усі кажани використовують ехолокацію, щоб визначати відстань, а також розрізняти їжу/здобич і перешкоди.

2. Поточне положення кожного кажана позначимо x_i , з нього він переміщується випадковим чином зі швидкістю v_i . У процесі руху кажани генерують звукові сигнали, що

мають частоту ω_i і гучність A_i . При цьому вони можуть змінювати як частоту, так і інтенсивність звукових імпульсів $r_i \in [0, 1]$, залежно від близькості до цілі.

3. Гучність звукового сигналу змінюється від більшого початкового значення A_0 до меншого заданого A_{\min} .

Положення всіх кажанів у початковий момент задаються випадковим чином. Подальше переміщення кожного з них відбувається відповідно до визначеної міграційної процедури. У канонічному варіанті алгоритму в процесі міграції кажани використовують інформацію лише про глобальний кращий розв'язок, обраний серед усіх. Щоб підвищити ефективність пошуку доцільно використовувати також інформацію про поточний кращий розв'язок, знайдений окремо кожним кажаном. Для цього модифікуємо спосіб обчислення швидкості переміщення кажанів, використовуючи підхід, запропонований М. Клер і Д. Кеннеді для алгоритму рою часток [2].

Результуючий вдосконалений алгоритм кажанів для розв'язання задачі глобальної мінімізації (1) представимо у вигляді наступного псевдокоду:

1: Ініціалізація популяції: задати початкове положення x_i та швидкість v_i кожного i -го кажана,

$$i = \overline{1, N}.$$

2: Ініціалізація характеристик звукових імпульсів: задати частоту ω_i , інтенсивність r_i та гучність A_i для кожного i -го кажана, $i = \overline{1, N}$.

3: **while** ($t \leq tMax$)

4: **for** $i = \overline{1, N}$

5: Переміщення кожного i -го кажана за формулами:

$$\omega_i = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \beta,$$

$$\chi = \frac{2}{\left| 2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi} \right|}, \quad \varphi = c_1 + c_2,$$

$$\bar{v}_i^{(t+1)} = \chi(v_i^{(t)} + c_1 \xi_1(\bar{x}_i - x_i^{(t)}) + c_2 \xi_2(\bar{x} - x_i^{(t)})),$$

$$v_i^{(t+1)} = \bar{v}_i^{(t)} + (x_i^{(t)} - \bar{x}) \cdot \omega_i,$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)},$$

де $\omega_i \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ – частота; $c_1 = c_2 = 2.05$ – константи; χ – коефіцієнт стиснення; \bar{x} – положення кажана, в якому знайдено кращий глобальний розв'язок; \bar{x}_i – положення кажана, в якому знайдено кращий розв'язок даним кажаном окремо; ξ_1, ξ_2 і β – випадкові числа з інтервалу $[0, 1]$;

6: **if** ($rand > r_i$)

7: Здійснення локального пошуку в околі поточного положення шляхом випадкового блукання за формулою:

$$x_i^{(new)} = x_i^{(old)} + \varepsilon \cdot \bar{A}(t),$$

де $\bar{A}(t)$ – середнє значення гучності звукових сигналів всіх кажанів; ε – випадкове число з інтервалу $[-1, 1]$;

8: **end if**

9: **if** ($rand < A_i$ and $f(x_i^{(new)}) < f(\bar{x})$)

10: Нове положення прийнято $x_i^{(t+1)} \leftarrow x_i^{(new)}$

11: Зменшити A_i і збільшити r_i за формулами:

$$A_i^{(t+1)} = \alpha \cdot A_i^{(t)}, \quad r_i^{(t+1)} = r_i^{(0)} \cdot (1 - e^{-\gamma t}),$$

де α , γ – задані коефіцієнти;

```

12:   end if
13:   Оновити  $\bar{x}$ 
14: end for
15: Збільшити лічильник кількості ітерацій  $t \leftarrow t + 1$ 
16: end while

```

Канонічний і вдосконалений алгоритми кажанів реалізовано у середовищі MATLAB R2012b. Для порівняння обрали ряд тестових унімодальних і мультимодальних функцій, зокрема, функції де Джонга, Розенброка, Растрігіна, Еклі та інші. Результати обчислювальних експериментів показали, що вдосконалений алгоритм кажанів характеризується більш високою швидкістю збіжності та точністю знаходження оптимального значення цільової функції.

Список літературних джерел:

1. Yang X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm / X. S. Yang // Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010). – 2010. – Vol. 284. – P. 65-74.
2. Clerc M. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space / M. Clerc, J. Kennedy // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6. – №1. – P. 58-73.

ОПТИМІЗАЦІЙНЕ ПРОЕКТУВАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО СЕПАРАЦІЙНОГО НАФТОГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ

О.О.Ляпошенко¹, І.В.Павленко¹, О.В.Настенко², М.М.Дем'яненко¹, О.Є.Старинський¹

¹Сумський державний університет (СумДУ), Суми

²Познанський технологічний університет, Познань, Польща

Нафта зі свердловин завжди добувається у вигляді, непридатному для прямої переробки. Сира нафта в своєму складі містить пластову воду, попутний газ, мінеральні солі, механічні домішки. При цьому, чиста нафта є основною сировиною для виробництва рідких енергоносіїв, олив та мастильних матеріалів, бітумів і коксу. Наявність включень призводить до зниження якості, як самої нафти, так і продуктів її переробки. Тому задача вдосконалення технологій підготовки нафти та оптимізаційне проектування ресурсозберігаючого нафтопромислового обладнання є сьогодні актуальною проблемою.

Система нафта-вода утворює стійку емульсію, оскільки в видобутій нафті є неуглеводневі компоненти. Пластова вода та розчинені в ній солі знаходяться в сирій нафті у вигляді дисперсних краплин, які сорбують на своїй поверхні природні емульгатори (нафтові кислоти, асфальтні смолисті речовини, мікрокристали парафінів, механічні домішки), що утворюють на поверхні глобул води оболонку, яка перешкоджає злиттю краплин. Їх розмір є одним з основних параметрів, що впливають на стійкість водонафтових емульсій. Легко розшарується емульсія, в якій більшість глобул крупні, розміром 50-100 мкм, а в стійких емульсіях розмір глобул становить 0,1-20 мкм [1]. Не менш важливим параметром стійкості водонафтових емульсій є вміст парафіну. Руїнування емульсій і зневоднення такої нафти ускладнено при температурах нижчих температури плавлення парафінів. Тому нагрівання сирої нафти є обов'язковим технологічним процесом, під час якого досягається зниження густини та в'язкості нафти, що полегшує дегазацію та розшарування емульсій.

Отже комплексна підготовка нафти до транспортування та подальшої переробки, що передбачає її дегазацію, зневоднення, знесолення та стабілізацію, як правило проводиться двома способами – з використанням високоякісного комплексу обладнання (трубчаста піч або трубчастий підігрівач для нагрівання нафтової емульсії, деемульсатор, відстійник, нафтогазовий сепаратор, електродегідратор для знесолення та зневоднення нафти) або з використанням блочних установок підготовки нафти (УПН), що конструктивно поєднують електродегідратори з

блоками підігріву нафти та сепарації. Останнім часом широкого розповсюдження набули саме блочні УПН, основним апаратом яких є так званий нафтогазорозділювач з прямим підігрівом (НГВРП), за кордоном більш відомий, як апарат типу «Heater-Treater» (підігрівач-деемультатор).

Конструкція проєктованого багатофункціонального блочного горизонтального трьохфазного (нафтогазоводорозділювача) сепаратора типу «Heater-Treater» (рисунок 1а) об'єднує в собі секцію прямого підігріву з вузлом входу (поличковий дефлектор), яка відділена переливною перегородкою від секції коалесценції та відстоювання і призначена для початкового розділення суміші. Оптимізаційними розрахунками визначено, що для ефективної сепарації стійкої водонафтової емульсії достатнім є розташування п'яти вертикальних секцій жалюзійних блоків поверхневої коалесценції та відстоювання, що призначені не тільки для розшарування нафти та води, а і для відділення краплин рідини від газу. Перед кожною з п'яти секцій встановлені вертикальні електродні решітки об'єднані в комплекс систем електростатичної коалесценції. Важливо, що в якості паливного газу використовується попутний газ, що виділяється в апараті, який зазвичай спалюється на факелі тому, що його транспортування та переробка являється недоцільною в зв'язку з високою собівартістю. Для сепарації газу на корпусі нафтогазорозділювача може бути встановлено сітчастий відбійник, вихровий або пластинчастий газодинамічний бризковловлювач [2].

На ефективність сепарації значний вплив мають параметри процесу такі як температура та тиск газорідинної суміші. Зупинимось на кожному з цих факторів окремо.

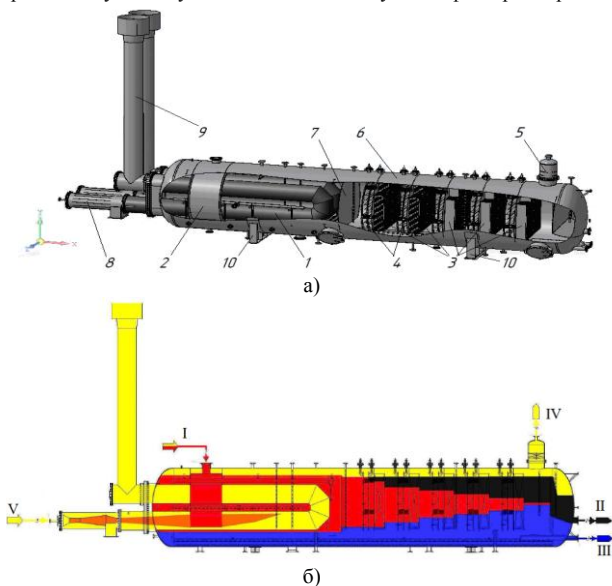


Рисунок 1 - Блочний горизонтальний сепаратор нафтогазорозділювач типу «Heater Treater» (підігрівач-деемультатор): а - конструкція апарату; б - принципова схема роботи апарату; 1 – U-подібні жарові труби; 2 – поличковий дефлектор; 3 – жалюзійна насадка; 4 – електродні решітки; 5 – газосепаратор; 6 – корпус; 7 – перегородка; 8 – інжекційні пальники з вбудованим калорифером; 9 – димові труби; 10 - опори; I – водонафтова емульсія; II – зневоднена нафта; III – пластова вода; IV – нафтовий газ; V – паливний газ; VI – повітря; VII - димові гази

Як вказувалось вище, тісно пов'язаними з температурою є такі параметри, як в'язкість нафти і різниця густини компонентів водонафтової емульсії. Причому зміна густини в діапазоні від 20 до 100 °С не істотна [3], тоді як в'язкість може змінюватись в десятки разів, від якої залежить гідродинамічний режим процесу відстоювання. При сприятливих умовах краплини, які наблизились одна до одної, внаслідок різниці швидкостей осадження або за рахунок дифузійних

механізмів коалесціюють, що призводить до збільшення швидкості їх осадження. Підвищення температури сприятливо впливає на ослаблення абсорбційних та механічних властивостей емульгатору (парафіну), що є необхідною умовою для злиття краплин. Отже, швидкість процесу розділення водонафтової емульсії визначається осадженням зважених краплин та їх коалесценцією, а на швидкість цих процесів впливає температура підігріву емульсії.

Визначення оптимального робочого тиску в апараті для інтенсивної дегазації проведено спираючись на закони Рауля та Дальтона, які розкривають фізичну суть процесів, що відбуваються під час сепарації під впливом основних режимних параметрів (тиску та температури). З них слідує, що зі збільшенням температури системи, збільшується молярна концентрація компонентів широкої фракції легких вуглеводнів в газовій фазі при одночасній її зменшенні в рідкій. В свою чергу тиск впливає на процес у зворотному напрямку.

Оскільки в апараті відбувається не тільки розшарування емульсії на зневоднену нафту та пластову воду необхідно відмітити вплив робочих параметрів на другорядний процес, сепарацію газу від краплинної рідини. З підвищенням тиску густина та в'язкість газу збільшується, в той час як густина рідких частинок залишається постійною, що призводить до зменшення швидкості їх осадження під дією сили тяжіння. Проте збільшення тиску неоднозначно впливає на сепарацію газу від рідини. При його збільшенні зменшується випаровування рідини, а конденсація парів, які знаходяться в рідині, збільшується, що призводить до збільшення розмірів рідких частинок. Також зростає можливість їх коагуляції, що, як відомо, позитивно впливає на ефективність сепарації. З іншого боку, з підвищенням тиску густина та в'язкість газу збільшується, в той час як густина рідких частинок залишається постійною, що призводить до зменшення швидкості їх осадження під дією сили тяжіння. Таким чином, проведений аналіз впливу зміни температури та тиску газу на сепарацію показує, що для інтенсифікації основних процесів, дегазації та розділення водонафтової емульсії, найбільш сприятливими будуть низький тиск та висока температура, а в конкретному проєктованому апараті необхідно намагатися підтримувати значення тиску 0,2 МПа і здійснювати підігрів початкової водонафтової емульсії до температури 60°C.

На сьогоднішній день проєктування даного типу нафтогазового обладнання ускладнюється відсутністю відповідних методик для розрахунку. В даній роботі запропоновано інженерну методику для проведення оптимізаційних технологічних та конструктивних розрахунків при проєктуванні сепараторів такого типу, що дозволяє врахувати основні фактори, які впливають на інтенсивність та ефективність сепарації.

Розрахунок процесу розгазування нафти проводився методом послідовних наближень мольної долі відгону з достатньою для практичних цілей точністю за законом Рауля-Дальтона та з урахуванням процесу однократного випаровування (конденсації) [4]. Розрахунок проводився для граничних умов проведення процесу (тиск 0,2; 0,6 МПа, температури 60°C; 35°C) і можливого підвищення від 20% до 90% мас. обводненості нафти родовища ім. В.М. Виноградова (до перейменування групою «ЛУКОЙЛ» у 2013 р. більш відомого як Велике Ольховське нафтове родовище, Ханти-Мансійський автономний округ Тюменської області Російської Федерації), який підтвердив, що обрані робочі параметри (тиск 0,2 МПа та температура 60°C) є оптимальними, при цьому з сирої нафти (при навантаженні до 270 т/год) виділяється попутний нафтовий газ в максимальній кількості (до 7125 $\text{nm}^3/\text{год}$), з мінімальним вмістом шкідливих компонентів, таких як азот та вуглекислий газ. Необхідно відмітити, що при інших граничних умовах (тиск 0,6 МПа та температура 35°C), отримуваний попутний нафтовий газ характеризується мінімальним вмістом води емульсії та важких вуглеводнів, але в ньому більше вміст азоту та вуглекислого газу, які знижують теплоту згоряння палива, а кількість виділеного при цьому попутного нафтового газу в 20 раз менша від зазначеної вище.

Визначення кількості теплоти, необхідної для підігріву до рекомендованого значення температури процесу, проводилось за відомими значеннями витрати та обводненості вихідної суміші, або за відомими витратами нафти та води. Необхідна витрата паливного газу визначалась з рівняння теплового балансу з урахуванням використання в якості паливного газу попутного нафтового газу, який виділився при дегазації. Для визначення теплоти згоряння попутного нафтового газу визначеного складу використовувалась залежність Менделєєва [5]. Результати розрахунків теплового навантаження апарату (Q) і необхідної витрати паливного газу (G_{TP}) в

діапазоні витрат вихідної газорідинної суміші ($G_{\text{СУМ}}$) при різному ступені обводненості (X_H) подано у вигляді графічної залежності (рисунок 2, 3).

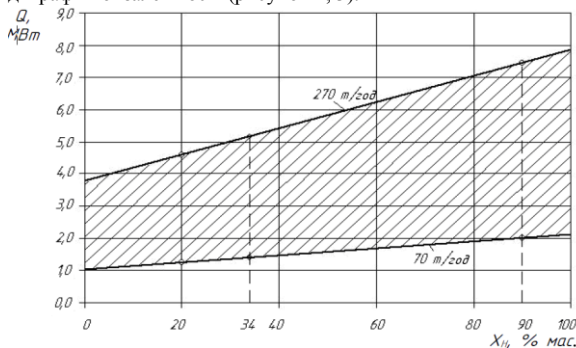


Рисунок 2 – Залежність кількості теплоти, необхідної для підігріву сирої нафти до температури 60°C при різному ступені її обводненості

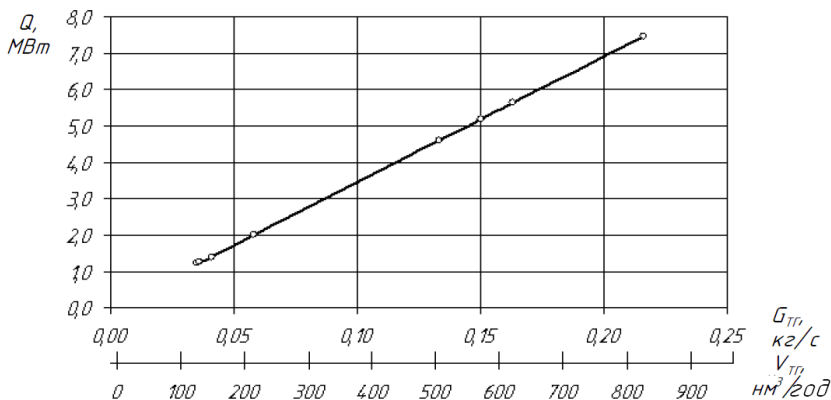


Рисунок 3 – Залежність необхідної для спалювання кількості паливного газу від теплового навантаження апарату

З рисунку 2 слідує, що для підігріву обводненої сирої нафти до робочої температури деемульсації 60°C при її обводненості у вказаному вище діапазоні та можливому коливанні витрати вихідної суміші в межах 70-720 т/год теплове навантаження апарату складатиме 1,47–5,17 МВт. При максимальній продуктивності по вихідній газорідинній суміші і незначній обводненості зворотної водонафтової емульсії, для її підігріву від 35°C до 60°C достатньо підводу теплоти не більше за 5,63 МВт. Для можливості роботи апарату в умовах критичної обводненості (до 90%) необхідно передбачити максимальне значення теплового навантаження блоку підігрівача деемульсатору до 7,45 МВт. При цьому масова витрата паливного газу складатиме 135-840 $\text{м}^3/\text{год}$. Зіставлення цих даних підтверджує можливість використання в якості паливного газу отримуваного попутного нафтового газу.

Технологічний розрахунок секції відстоювання полягає у визначенні її пропускної спроможності на основі кінетичних закономірностей процесу коалесценції дисперсних краплин і інерційно-гравітаційного розділення фаз. Цей розрахунок представляє ряд труднощів, оскільки такі параметри потоку, як його швидкість та в'язкість змінюються по висоті та довжині нафтогазоводороділовача. Швидкість руху водонафтової емульсії вздовж зони відстоювання безперервно зменшується від входу до виходу, горизонтальна складова максимальна в верхньому і мінімальна в нижньому шарі емульсії. Зміна в'язкості по довжині в верхній частині

апарату носить аналогічний до швидкості руху характер: по вертикалі в'язкість водонафтової емульсії зростає від найменшого значення на поверхні розділу фаз газ-рідина до найбільшого – на границі з водною подушкою. Отже, найкращі умови для коалесценції краплин, їх осадження та ефективного розділення фаз будуть при умові створення в зоні відстоювання ламінарного струменевого режиму руху потоку водонафтової емульсії.

Важливим для коалесценції краплин є проходження (промивання) через проміжний емульсійний шар відстоюної води, розташований на границі розділу фаз, який існує лише при умові динамічної рівноваги. В зв'язку з великою складністю процесів, які сприяють утворенню та руйнуванню проміжного емульсійного шару, його просторово-неоднорідною структурою, яка зумовлена різною концентрацією, в'язкістю та дисперсним складом утворюючих його частинок, на сьогоднішній день не існує загально прийнятих методик розрахунку подібних гідродинамічних систем, хоча і є велика кількість досліджень, які присвячені різного роду випадкам [3]. Основним фізичним параметром, який визначає продуктивність нафтогазорозділювача, є швидкість осадження краплин води. Для гравітаційного осадження води в нерухомому середовищі при ламінарному режимі руху використовується закон Стокса [6]. Оскільки, відсутні дані про розмір частинок дисперсної фази (води) в водонафтовій емульсії, згідно з рекомендаціями [7], прийнято, що осаджуються краплини з мінімальним розміром 25 мкм. В таких умовах, розрахована по закону Стокса, швидкість осадження краплин води в нафті складає 1,73 мм/с. Необхідно відмітити, що дане значення не враховує стиснене осадження частинок. Очевидно, що в такому випадку швидкість буде меншою, ніж швидкість вільного осадження. Розрахована швидкість осадження з урахуванням стиснення та проектною обводненості нафти (34%) дорівнює 1,71 мм/с. При зростанні кількості води в водонафтовій емульсії до 90% швидкість стисненого осадження падає до 1,49 мм/с. У випадку переходу зворотної емульсії в пряму (нафта в воді, обводненість 50-90%) швидкість спливання краплин нафти в шарі нерухомої вільної води, при ламінарному характері руху, визначається, отриманою Адмаром та Бондом, залежністю на основі закону Стокса [7]. В таких умовах відповідно залежності Адмара та Бонома розрахункове значення середньої швидкості спливання краплин нафти в воді складає 1,78 мм/с. Співставляючи отримані швидкості відстоювання прямої та зворотної емульсії можна зробити висновок, що вони відрізняються несуттєво, тому підтримуючи ламінарний гідродинамічний режим з постійним оптимальним значенням лінійної швидкості руху, можна забезпечити однаково високу ефективність розділення води та нафти при зміні обводненості початкової суміші. Оскільки стисненість осадження/спливання є не єдиним фактором, що негативно впливає на сепарацію, для їх урахування рекомендується знизити отриману розрахункову швидкість на 10-15% [7]. Останнім етапом технологічного розрахунку секції коалесценції та відстоювання є розрахунок напруги електростатичних коалесценціюючих систем. Коли суцільною фазою є вуглеводнева рідина (нафтопродукти) коалесценція краплин води проходить практично миттєво [8]. Відомо, що взаємодія між краплинами води можна підвищити, якщо підвищити напруженість електричного поля E , оскільки при цьому поляризація крапель і сили дипольного притягання збільшуються пропорційно квадрату напруженості електричного поля. Але при надмірному підвищенні напруженості електричного поля можливе електричне диспергування крапель на велику кількість найдрібніших краплин (розмірами 0,1-0,01 мкм) [5].

Конструктивними розрахунками апарату визначено основні розміри апарату (діаметр, довжина, об'єм) з умови забезпечення оптимальних гідродинамічних режимів в зоні відстоювання. Повірочні розрахунки проводяться з урахуванням пропускної здатності апарату по нафті та воді. Конструктивний розрахунок секції підігріву складається з визначення розмірів вузла входу і розподілення вихідної водонафтової суміші (розміри повинні забезпечувати ламінарний режим витікання емульсії з лотку дефлектору під шар вільної води), розрахунку розмірів жарових труб, основних горілок та димових труб для них (визначається відповідно до необхідної поверхні теплообміну). Необхідну кількість секцій електрокоалесценції рекомендується приймати рівною кількості секцій поверхневої коалесценції, яку визначають в залежності від ефективності сепарації високодисперсних краплин, які рухаються по усередненим лініям току крізь насадки коалесценції, можливого вторинного диспергування і унесення при значному відхиленні робочих режимних параметрів роботи апарату від їх проектних значень.

Основні наукові результати роботи впроваджено науковцями кафедри процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв СумДУ на етапі дослідно-конструкторських робіт та стадії ескізного проектування промислового зразка НГВРП типу «HEATER-TREATER» УПН (замовник - Група «ЛУКОЙЛ», генпроектувальник - ТюменьНИИНефть). За основними технічними характеристиками спроектований апарат не поступається відомим світовим аналогам: апаратам «Heater-Treater» фірм «Cameron's NATCO» (США), «Sivalls, Inc.» (США), «EN-FAB, Inc.» (США), апарату «Free Water Knock-Out» (FWKO) виробництва «Maloney Industries, Inc.» (Канада) та НГВРП конструкції ПАО «ВНИИнефтемаш», що виготовляються ООО «Курганхиммаш» (РФ). Вигідно відрізняється багатофункціональністю та універсальністю, має високі прогнозовані показники ефективності розділення (сепарації) в широкому діапазоні зміни продуктивності, тиску, температури та ступеня зводненості водонафтової емульсії.

Висновки.

В основу спроектованого апарату покладено ряд принципово нових та оригінальних технічних рішень, що забезпечують його ефективність в широкому діапазоні витрат вхідної суміші, різному ступені її обводненості, що, в свою чергу, дозволяє забезпечити високі техніко-економічні показники. При проектуванні апарату значну увагу приділено актуальним питанням ресурсозбереження та енергоефективності апарату: в якості паливного газу використовується попутний нафтовий газ, оптимізовано теплове навантаження апарату для підігріву сирієї нафти в залежності від вмісту в ній води та продуктивності свердловини. Запропоновано науковий підхід до методики оптимізаційного розрахунку такого обладнання. Особливу цікавість для подальших оптимізаційних досліджень представляє визначення необхідної потужності електричного поля, для підтримки Ван-дер-Ваальсових сил притягання диполів (краплин). Подальші дослідження будуть направлені на оцінати визначення доцільності та оцінку ефективності від встановлення динамічних бризковловлюючих насадок.

Список літературних джерел

1. Байков Н.М., Колесников Б.В., Челпанов П.И. Сбор, транспорт и подготовка нефти. – М.: Недра, 1975. – 317 с.
2. Ляпощенко О. О. Моделирование процессов сепарации та розробка методики розрахунку трифазного сепаратора / О. О. Ляпощенко, І. В. Павленко, Р. Ю. Усик, М. М. Дем'яненко // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій : науковий журнал. – Серія «Технічні науки». – 2015. – № 47. – Т. 1. – С. 62–66.
3. Логинов В.И. Обезвоживание и обессоливание нефтей. – М.: Химия, 1979. – 216 с., ил.
4. Леонтьев С.А. Расчет технологических установок системы сбора и подготовки скважиной продукции / С.А.Леонтьев, Р.М.Галикеев, О.В.Фоминных. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. - 116 с.
5. Склабінський В.І. Технологічні основи нафто- та газопереробки / Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Артюхов А.Є. – Суми: Сумський державний університет, 2011. - 187 с.
6. Технологические расчеты установок переработки нефти / Танатаров М.А., Ахметина М.Н., Фасхутдинов Р.А. и др. – М.: Химия, 1987. – 352 с.
7. Хафизов А.Р., Пестрецов Н.В. и др. Сбор и подготовка нефти и газа. Технология и оборудование. – 2001. – 551с.
8. Лутошкин Г.С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды. – М.: Недра, 1977. – 192 с.

УДК 622.489:658.012.011

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ВЫПОЛНЕНИЕМ ПЛАНОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОБЫЧИ УГЛЯ ШАХТЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КУМУЛЯТИВНЫХ СУММ А.В. Маленко

Национальный горный университет, Днепропетровск

Вступлення. В настоящий момент задачи математического программирования, возникающие в самых разнообразных областях человеческой деятельности, и прежде всего в

экономических исследованиях, в практике планирования и организации управления производством занимают лидирующие позиции. Изучение этого круга задач и методов их решения привело к созданию новой научной дисциплины, получившей позднее название линейного программирования. К задачам, решаемых этим методом в рамках математического программирования относятся такие типичные задачи применимые к диспетчеризации угольной шахты как «Определение наилучшего состава смеси», «Задача об оптимальном плане выпуска продукции», «Оптимизация межотраслевых потоков», «Задача о выборе производственной программы», «Транспортная задача», «Задача размещения». Решение таких задач дает большие выгоды как угольной отрасли в целом, так и отдельным шахтам.

Решение задач математического программирования при помощи симплекс-метода традиционными способами требует затрат большого количества времени. В связи с бурным развитием компьютерной техники в последние десятилетия естественно было ожидать, что вычислительная мощность современных ЭВМ будет применена для решения указанного круга задач.

Состояние вопроса: Задача состоит в следующем. Предположим, что план добычи углей по шахте в целом N разделяется на несколько классов готовой продукции $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$. Требуется использование m видов сырья S_1, S_2, \dots, S_m . Запасы угля каждого вида по качественным показателям ограничены и составляют соответственно b_1, b_2, \dots, b_m условных единиц. Количество условных единиц угля, необходимое для получения смеси (шахты) каждого вида задано таблицей. Прибыль от реализации единицы продукции каждого вида составляет c_1, c_2, \dots, c_n . Требуется определить такое управление технологическими процессами, при котором прибыль предприятия от реализации продукции была бы максимальной. Пример заполнения таблицы, представляющей условие задачи расчета нагрузок на угольные забои приведен в табл.1. Данная таблица составлена для четырех единиц сырья и двух видов продукции. В ней $a_{ij} i=1..4, j=1..2$ – количество единиц сырья вида S_i необходимое для производства единицы продукции вида Π_j , $C_i i=1..2$ – прибыль от реализации одной единицы продукции вида Π_i , $b_i i=1..4$ – запасы сырья вида S_i .

Таблица 1 - Условие задачи об использовании сырья

Виды сырья	Запасы сырья	Виды продукции	
		Π_1	Π_2
S_1	b_1	a_{11}	a_{12}
S_2	b_2	a_{21}	a_{22}
S_3	b_3	a_{31}	a_{32}
S_4	b_4	a_{41}	a_{42}
Доход		c_1	c_2

Для исследования эффективности решения задачи расчета нагрузок на лавы угольной шахты применялось несколько вариантов программ, обеспечивающих расчет управления с использованием симплекс-метода как приведен в табл.2. Это программы Symplex2, SimplexWin 3.0 и Optimizer 1.0. Результаты тестирования этих программ для различных размерностей исходных векторов и матриц приведены в табл. 2.

Таким образом, время расчёта задачи составило диапазон 1 - 23 сек. Наиболее эффективным вариантом программы для решения задачи определена программа SimplexWin 3.0, которая показала наибольшее быстродействие и устойчиво работала на всех вариантах исходных данных.

Таблица 2 - Результаты тестирования программ для решения ЗЛП симплекс-методом

Программы	Результаты задачи			
	$n=5, m=5$	$n=10, m=10$	$n=10, m=30$	$n=20, m=50$
SYMPLEX2	<1 сек	1,5 сек	4 сек	21 сек
SimplexWin 3.0	<1 сек	1 сек	3,5 сек	17 сек
Optimizer 1.0	<1 сек	1,5 сек	5 сек	23 сек

В целях поддержания адекватности модели (1)-(3) при изменяющихся условиях предлагается использовать аппарат последовательного обнаружения моментов временного ряда

[1], основанный на использовании алгоритма кумулятивных сумм (АКС). Для АКС характерна близость к оптимуму его характеристик в заданном диапазоне значений параметров, устойчивость к влиянию мешающих факторов, независимость от априорного распределения момента разладки. Все это в сочетании с правильной настройкой алгоритмов позволяет добиться высокого уровня адекватности модели (1)-(3) процессу объемов добычи.

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (Q_{C_{U_i}}^{ji} - Q_{U_i}^{ji}) C_{U_i}^{ji}, \quad (1)$$

$$Q_{Leч}^j \leq Q_{выч}^j \leq Q_M^j \quad (j = 1, \dots, m), \quad (2)$$

$$Q_{выч}^j = k Q_{выч}^{j-1} + \sum_{i=1}^{p_j} Q_{\theta_i}^{ji} - \sum_{i=1}^{n_j} Q_{U_i}^{ji} \quad (j = 1, \dots, m), \quad (3)$$

$$Q_{U_i}^{ji} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, n_j; j = 1, \dots, m)$$

При использовании алгоритмов АКС применительно к временным рядам объемов добычи предполагалось, что:

1) до неизвестного момента времени $t_0 - 1$ включительно совместная плотность распределения $\omega(Z_1^{t_0-1} / \theta)$ ($Z_1^{t_0-1}$ - временной ряд объемов добычи от момента времени 1 до $t_0 - 1$, θ - вектор параметров модели (3) временного ряда) зависит от вектора параметров $\theta: \theta \in \Theta_1$, где Θ_1 - область параметрического пространства (далее будем обозначать этот факт гипотезой $H_0: \theta \in \Theta_1$), а начиная с момента t_0 , условная совместная плотность распределения $\omega(Z_{t_0}^N / Z_1^{t_0-1}, \theta)$ зависит от параметра $\theta \in \Theta_2$ ($H_1: \theta \in \Theta_2$), $\dim \theta = r$;

2) значение вектора параметров модели временного ряда до разладки известно: $\theta = \theta_1$, а после разладки вектор θ выходит за пределы эллипсоида, образуемого информационной матрицей Фишера в параметрическом пространстве.

Итак,

$$H_0: \theta = \theta_1$$

$$H_1: (\theta - \theta_1)^T F(\theta_1) (\theta - \theta_1) \geq \lambda_1^2,$$

где $F(\theta_1)$ - информационная матрица Фишера, λ_1^2 - граничное значение параметра не центральности.

Для реализации АКС с нулевым нижним порогом и многократным возобновлением из нуля используется следующая решающая функция

$$g_t = (S_{t-n_t+1}^t(x_{n_t}))^+$$

$$n_t = n_{t-1} j(g_{t-1}) + 1, \quad S_t^0 = g_0 = 0,$$

$$(x)^+ = \max(0, x),$$

$$j(x > 0) = 1, \quad j(x \leq 0) = 0$$

Кумулятивная сумма $S_{t-n_t+1}^t(x_{n_t})$ для рассматриваемого нами случая согласно [2] запишется как

$$S_t^t(x_t) = -t \frac{\lambda_1^2}{2} + \ln F_0\left(\frac{r}{2}, \frac{t \lambda_1^2 x_t}{4}\right),$$

где

$$F_1(c, x) = 1 + \frac{x}{c} + \frac{x^2}{c(c+1)2!} + \dots + \frac{x^n}{c(c+1)\dots(c+n-1)n!}$$

обобщенная гипергеометрическая функция

$$x_t = \Delta_{t-n_t+1}^r(\theta_1) F_{n_t}^{-1}(\theta_1) \Delta_{t-n_t+1}'(\theta_1),$$

$\Delta_{t-n_t+1}^r - r$ - мерный вектор эффективных вкладов, обычно это вектор производных логарифмической функции правдоподобия по параметру θ ,

$$\Delta_1^{N_t} = \left\| \frac{\partial \ln \omega(Z_1^N / \theta_1)}{\partial \theta_1} \right\|,$$

$F_{n_t}(\theta_1)$ - положительно определенная симметрическая матрица Фишера на N наблюдениях;

N_t играет роль счетчика количества наблюдений после последнего обнуления решающей функции g_t , т.е. это длина очередного цикла АКС. До разладки n_t бывает больше единицы только за счет случайных флуктуаций. После разладки ($t \geq t_0$) величина $S_1^r(x_{n_t})$ начнет систематически расти и сразу же будет увеличиваться длина цикла АКС. Правило подачи сигнала о разладки определяется условием

$$t_0 = \inf\{t : g_t \geq h\},$$

где h - выбранный порог.

В отличие от подхода, предложенного в [3], где адекватность модели обеспечивается пошаговым перерасчетом параметров, ведущим к неоправданным затратам машинного времени, использование АКС позволяет производить новую идентификацию только в моменты обнаружения разладки, т.е. когда в этом самом деле возникает необходимость. Еще раз подчеркнем, что эффективность работы АКС зависит от значений настраиваемых параметров, а именно порога решающей функции (h), зоны чувствительности λ_1 отклонения параметров и т.п., что требует предварительной настройки алгоритмов, выполняемой на обучающих выборках.

Выводы. Таким образом, класс моделей (1)-(3) универсален во временном и функциональном отношении, обеспечивает высокое качество прогноза при хороших временных характеристиках, имеет развитый аппарат адаптации к изменяющимся условиям функционирования объекта, а следовательно, вполне пригоден для использования в системе управления прогнозированием объемов добычи угля в режиме реального времени.

Список литературных источников

1. Сенью П.С. Теорія ймовірностей та математична статистика: Київ, 2004. – 448 с.
2. Современные методы идентификации систем: /Под ред. П. Эйххофа.–М.: Мир, 1983.- 400 с.
3. В.В. Слесарев., М. Гаяда. Исследование зависимости актуальности управления от изменения параметров управляемой системы // Науковий вісник національного гірничого університету.-№12.- Дніпропетровськ 2004.-С. 58-59.

МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ПОТОЧНОГО РЕМОНТУ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Т.Ф. Михайлова

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ імені В. Лазаряна), Дніпропетровськ

Метою автоматизації планування поточного ремонту вагонів є мінімізація затрат на ремонт і транспортування вагонів до ремонтних підприємств. При цьому бажано забезпечити найбільш раціональне завантаження ремонтних підприємств з урахуванням сезонних відпусток, а також зберегти діючу систему планово-запобіжних ремонтів. В пасажирській службі дороги

планування поточного ремонту пасажирських вагонів здійснюється на основі досвіду та рекомендацій лінійних підприємств. Така методика характерна низьким коефіцієнтом готовності пасажирських вагонів в рейс, значним часом відсутності їх в експлуатації, нерівномірністю завантаження ремонтних підприємств зростанням затрат та порушенням діючої системи ремонтів.

Розглядається методика автоматизації планування поточного ремонту вагонів, яка передбачає розподіл вагонів, що потребують ремонту, за плановими періодами по ремонтних підприємствах з урахуванням їх потужності, спеціалізації та технічного забезпечення. На кожному етапі планування (щомісяця) задача формулюється як задача мінімізації критерію [1]

$$F(x) = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^S c_{ijk} x_{ijk} \quad (1)$$

за обмежень

$$\sum_{j=1}^N x_{ijk} = W_{ik}; \quad (2)$$

$$P'_{ij} \leq \sum_{k=1}^S x_{ijk} \leq P_{ij}, \quad (3)$$

де x_{ijk} - кількість вагонів і-го типу, приписаних до j-го підприємства і направлених в ремонт на k-е підприємство; c_{ijk} - вартість ремонту та транспортування і-го типу вагона, направленою з j-го підприємства на k-е підприємство ремонту; R – число модифікацій пасажирських вагонів; N – число підприємств приписки; S - число підприємств ремонту; P_{ij} - кількість вагонів і-го типу, котрі потребують ремонту на j-му підприємстві приписки; P'_{ij} - потреба в ремонті прострочених вагонів і-го типу на j-му підприємстві приписки; W_{ik} - розрахунковий об'єм робіт k-го підприємства по і-й модифікації вагонів. Для розв'язування задачі запропоновано алгоритм, що використовує на кожному етапі планування методи лінійного програмування [2], реалізація яких здійснюється за допомогою пакета Maple.

Список літературних джерел

1. Таха Х. Введение в исследование операций [Текст]: монографія / Х.Таха. –М.: Мир, 1985. – 456 с.
2. Вітлінський В.В., Наконечний С.І., Терещенко Т.О. Математичне програмування [Текст]: навчально-методичний посібник / В.В.Вітлінський, С.І.Наконечний, Т.О.Терещенко. – Київ: КНЕУ, 2006. – 248 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КРОНШТЕЙНА В CAD-СИСТЕМЕ SOLID WORKS

Д.Ю. Михеенко

Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорськ

Методы оптимизации находят широкое применение во многих технических и экономических приложениях, а именно там, где возникают задачи принятия оптимальных решений. Это, прежде всего задачи, связанные с проектирование изделий. Идея оптимизации, стремление к оптимальному, а не к любому допустимому варианту проектируемой системы, глубоко пронизывает современное проектирование [1].

Смысл инженерной деятельности при проектировании заключается в создании некоторой наилучшей конструкции. Поэтому задачи оптимизации геометрических параметров конструкции являются достаточно актуальными.

Оптимальное проектирование предполагает создание технического объекта не только выполняющего заданные функции, но и отвечающие некоторым заранее установленным критериям качества.

Самый низкий уровень оптимального проектирования предполагает нахождение лучшего варианта конструкции, основанное на подборе нескольких, выполненных без использования вычислительной техники, математических моделей и соответствующих методов оптимизации вариантов.

При более высоком уровне задачи оптимального проектирования, сформулированные в виде математических моделей, решаются с применением соответствующих математических методов оптимизации и на базе ЭВМ. К высшему уровню относятся задачи оптимального проектирования, решаемые в рамках САПР.

Одним из приближений к решению этой задачи является аппарат нелинейного программирования. При этом смысл оптимизации заключается в нахождении таких величин параметров (переменных проектирования), при которых некоторая характеристика конструкции (целевая функция) принимает экстремальное (максимальное или минимальное) значение. При этом ряд параметров или функциональных зависимостей должен удовлетворять ограничениям, заданным в виде неравенств или диапазонов допустимых значений.

Следует отметить, что во всем интервале изменения переменных проектирования конструкция должна быть геометрически реализуемой. Несмотря на то, что алгоритм оптимизации сохраняет работоспособность и при нарушении этого условия, сходимость к оптимуму при этом становится весьма проблематичной.

Кроме того, следует контролировать корректность наложения ограничений из-за высокой вероятности нахождения оптимума на границе допустимой области, что вытекает из постулатов нелинейного программирования. Поэтому в качестве границ интервалов изменения значений параметров проектирования следует назначать разумные с инженерной точки зрения величины.

В качестве примера рассмотрим процесс оптимизации кронштейна (рисунок 1) в САД-системе Solid Works [2].

Целью оптимизации является сокращение массы кронштейна при одновременном обеспечении его прочности под заданной нагрузкой. Уменьшение массы будет достигаться путем подбора оптимального размера и расположения выреза в кронштейне (см. рисунок 1).

Перед проведением оптимизации необходимо провести прочностной расчет кронштейна в САЕ-модуле Solid Simulation [3]. Данный модуль является частью САД-системы Solid Works и позволяет реализовывать различные инженерные расчеты методом конечных элементов (МКЭ) [4].

Для проведения прочностного исследования необходимо задать материал кронштейна (сталь 3), его закрепление и действующие нагрузки (рисунок 2).

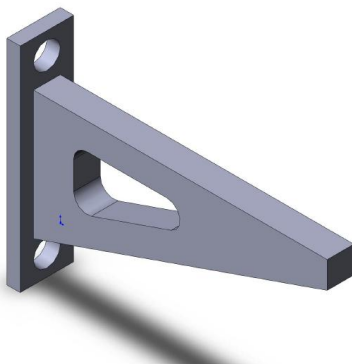


Рисунок 1 – Кронштейн

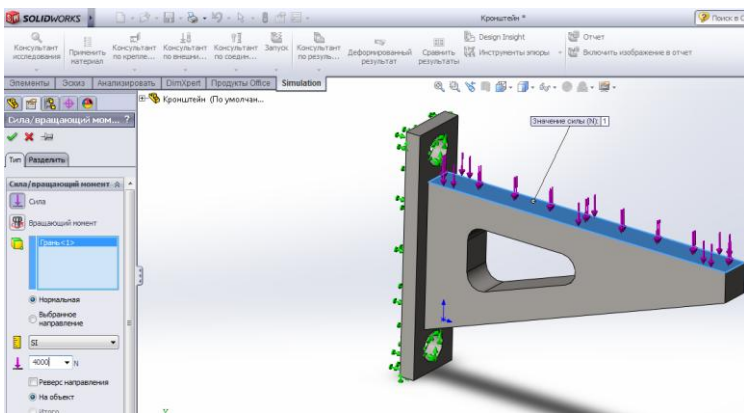


Рисунок 2 – Задача исходных данных для анализа прочности кронштейна

Результаты расчета показывают, что максимальное эквивалентное напряжение в кронштейне 139 МПа (рисунок 3). Для стали 3 допустимое напряжение обычно принимают 160 МПа. Это показывает, данная конструкция имеет резервы по снижению массы при одновременном выполнении условия прочности.

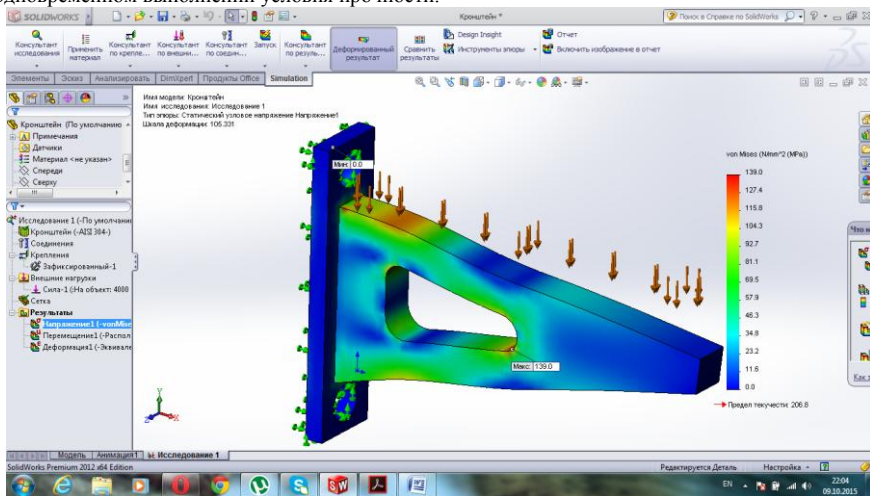


Рисунок 3 – Эпюра эквивалентных напряжений в кронштейне

В качестве целевой функции могут выступать вес, объем, одна из собственных частот и одна из критических нагрузок, вызывающих потерю устойчивости. Целевая функция может максимизироваться или минимизироваться. При определении целевой функции комбинировать разнородные параметры (например, прочность и частоты) недопустимо.

Переменными проектирования могут быть только размеры, определенные в модели конструкции. При этом должно строго соблюдаться требование независимости переменных проектирования. Максимальное число переменных проектирования, которое можно определить в оптимизационной задаче, равно 25.

В качестве ограничений для задачи нелинейной оптимизации могут выступать следующие параметры: величины размеров, напряжения, силы реакции, перемещения,

деформации, формы потери устойчивости и собственных колебаний (с первой по десятую), температура.

Никакие комбинации параметров, входящих в ограничения, недопустимы, за исключением неявного указания соотношений размеров. Ограничения могут быть только в виде двухсторонних строгих неравенств, накладываемых на величины переменных проектирования, если необходимо одностороннее ограничение (при условии, что в ходе поиска оптимума параметр заведомо не будет бесконечно возрастать или уменьшаться), следует задавать достаточно большое (положительное или отрицательное) значение параметра.

Следует обратить внимание на то, что эквивалентное напряжение при решении оптимизационной задачи вычисляется только по критерию Мизеса. Поэтому круг материалов, для которых может быть выполнен оптимизационный расчет, до определенной степени сужается.

Оптимизационный процесс может завершиться при двух обстоятельствах:

- достигнуто максимальное количество итераций;
- процесс сошелся и требуемая сходимости достигнута.

Признаком сходимости считается изменение целевой функции и переменных проектирования на соседних итерациях, вычисляемое в процентах от величины для целевой функции или от диапазона для переменных проектирования.

В нашей задаче были выбраны 3 переменные проектирования – размеры, определяющие положение и величину выреза в кронштейне. В качестве ограничения были выбрано эквивалентное напряжение которое не должно превышать 160 МПа. В качестве целевой функции оптимизации была использована минимизация массы детали (рисунок 4)

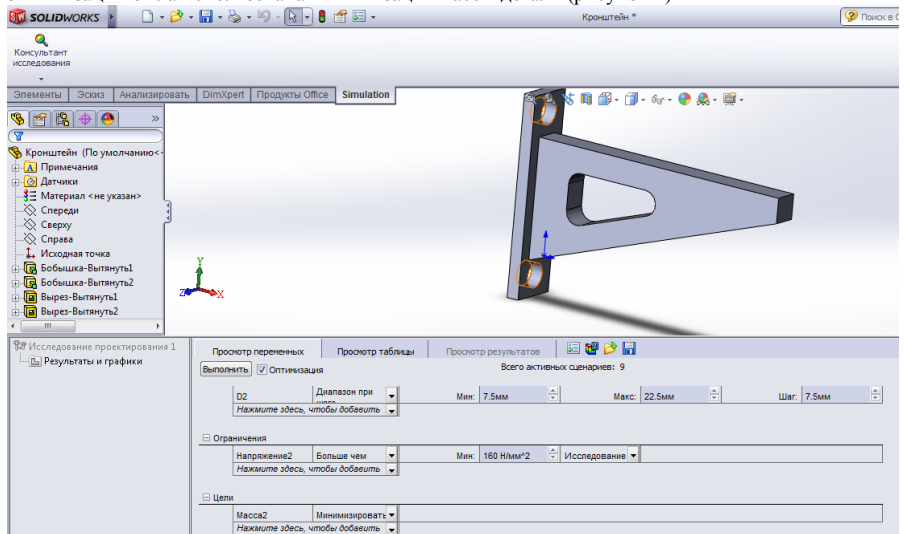


Рисунок 4 – Задача параметров оптимизации

В ходе оптимизации было перебрано 29 вариантов и оптимальным был признан вариант номер 6 (рисунок 5).

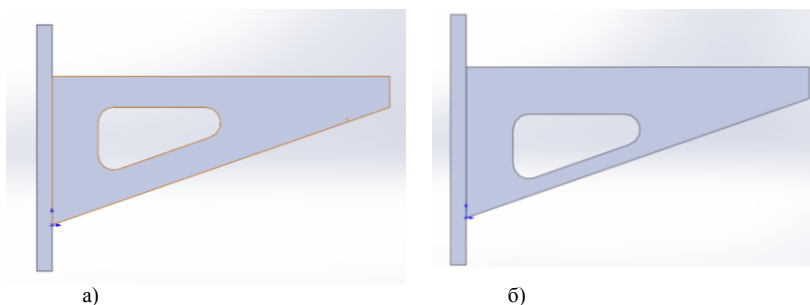


Рисунок 5 – Исходный (а) и оптимальный (в) варианты конструкции кронштейна

Список литературных источников

1. Андронов С.А. Методы оптимального проектирования. - СПб.: СПбГУАП, 2001. — 169 с.
2. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. — СПб.: Питер, 2005. — 768 с.: ил.
3. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 448 с.: ил.
4. Трушин С.И. Метод конечных элементов. Теория и задачи. - М.: АСВ, 2008 - 256 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Л.В. Музыка, А.В. Прядко

Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск

Введение. В технологии обработки полезных ископаемых процессы тонкого измельчения (диспергирования) являются самыми энергоемкими. В связи с этим актуальной является проблема установления оптимальных условий измельчения [1]. Последние открытия в физике прочности и разрушения дали толчок исследованиям физического механизма измельчения. Формирование нового подхода к исследованию эффектов диспергирования в процессах разрушения и измельчения основано на использовании принципа подобия энергетических спектров при разрушении лабораторных образцов и горного массива, закономерностей разрывных (релаксационных) автоколебаний конденсированного вещества в теории предразрушения, вывода об определяющей роли накопления повреждений в моделях объемно-деформированного состояния горных пород [2].

Анализ последних достижений и публикаций.

Тонкое измельчение материалов реализуется в нескольких видах мельниц: шаровой, стержневой, планетарной, струйной. Для каждой из них развиваются методы оптимизации процесса. Существует несколько способов автоматического контроля и регулирования шарового процесса измельчения на основе замеров активной мощности двигателя мельницы и производительности загрузки мельницы, контроле плотности слива классификатора и др. Для струйной мельницы использовались способы контроля давления в камере, перепада давления по тракту. Однако эти способы не позволяют оперативно принимать решения по изменению режима или технологических параметров без остановки процесса измельчения.

Известные технические решения оптимизации струйного измельчения путем контроля температуры или разрежения по тракту струйной мельницы имеют значительную погрешность в оценке показателей измельчения: производительности, энергопотребления мельницы, тонины продукта и обладают задержкой в реагировании на нарушения технологических показателей.

Согласно исследованиям [3], метод акустической эмиссии (АЭ) дает информацию обо всех стадиях кинетического процесса разрушения (трещинообразование, измельчение, диспергирование) и ожидаемых эффектах измельчения. Ведущими акустическими

характеристиками в прогнозе эффектов измельчения являются удельное акустическое излучение, кинетика амплитуд и активности АЭ на стадии запредельного деформирования. В [4] показано, что существует корреляционная связь амплитуды акустических сигналов (АС) с размером разрушения при сжатии лабораторных образцов горных пород и ударах частиц в процессе струйного измельчения. Из этого следует, что изменение размеров частиц в процессе измельчения обусловит трансформацию амплитудных распределений АС.

Проверка теоретических выводов о применимости акустического метода для мониторинга процесса измельчения проводилась на примере струйной мельницы, механизм которой обеспечивает технологические требования получения тонкодисперсных активированных порошков минерального сырья.

Цель работы – рассмотреть комплексный подход к разработке системы управления и оптимизации процесса измельчения на основе акустического мониторинга.

Изложение основного материала.

В последнее время при тонком измельчении для реализации известного принципа обогатителей «не измельчать ничего лишнего» применяются схемы замкнутого цикла, в которых из помольной камеры извлекается заведомо недоизмельченный материал и направляется в классификатор. Там материал разделяется на готовый продукт требуемой крупности и циркулирующую нагрузку, т.е. материал крупнее требуемого, который возвращается в камеру на доизмельчение. Схема замкнутого цикла представлена на рис.1

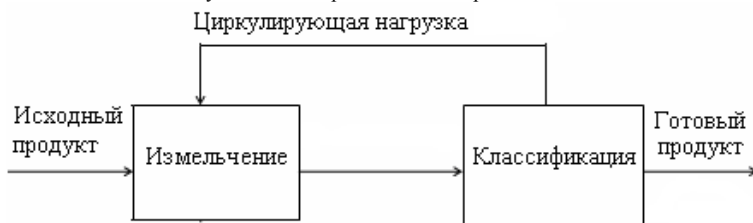


Рисунок 1 – Схема замкнутого цикла измельчения

В результате измельчения материалов различных физических свойств и заданных технологических параметрах установлены связи параметров акустических сигналов и технологических режимов измельчения. Создана база данных, включающая характеристики материалов, дисперсность и гранулометрический состав продуктов измельчения, записи исследуемых параметров и показателей.

Применение акустического мониторинга параметров для оптимизации процесса струйного измельчения отличается следующими преимуществами:

- непрерывный контроль процесса и изменение величины загрузки мельницы идет без остановок технологического процесса,
- с учетом связи акустических и технологических параметров процесса рекомендации по управлению процессом измельчения выдаются в текущем времени.
- по сигналам зоны классификации идет непрерывный контроль качества (дисперсности) получаемого продукта. В случае необходимости выдаются рекомендации по изменению режима классификации.

В данной работе предложено управление процессом измельчения с целью повышения производительности (соответственно, с целью снижения энергопотребления) мельницы при соблюдении необходимых требований к дисперсности продуктов измельчения на основе контроля величины амплитуды сигналов зоны помола

В работах [3-5] апробирован акустический мониторинг работы струйной мельницы для контроля загрузки струй материалом и крупности измельчаемых частиц. Режим измельчения оценивался по количеству измельченного продукта, расчетной величине производительности мельницы и степени дисперсности продукта. Испытания показали, что производительность мельницы отклоняется от максимального уровня в случаях, как перегрузки, так и недогрузки струй.

На основе результатов акустического мониторинга разработано несколько направлений оптимизации процесса измельчения [6]:

- 1) контроль процесса измельчения на основе установленных технико-акустических критериев и коэффициентов;
- 2) непрерывный энергетический анализ акустических сигналов;
- 3) система Вейвлет-анализа акустических сигналов зоны измельчения;
- 4) нейросетевой анализ режимов измельчения;
- 5) анализ поверхности функции плотности распределения вероятности значений амплитуд сигналов характерных зон;
- 6) моделирование процесса измельчения на основе цепей Маркова.

Измерение уровня акустической активности зоны помола проводилось с помощью акустического датчика, соединенного с латунным волноводом, установленным внутри помольной камеры мельницы. Для контроля качества измельченного продукта второй волновод и датчик устанавливался в зоне классификации. Датчики через аналого-цифровой преобразователь соединены с компьютером, на котором реализован анализ сигналов и их сохранение.

На рис. 2 показана схема аппаратной базы акустического мониторинга процесса измельчения.

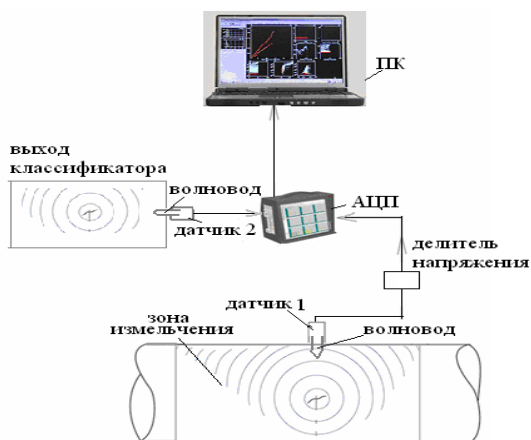


Рисунок 2 – Схема аппаратной базы акустического мониторинга

Установленные закономерности изменения величины амплитуды акустических сигналов зоны измельчения для различных режимов процесса уточнены дополнительными исследованиями частот сигналов. В [7] показаны характерные частоты, амплитуды сигналов которых отличаются при разных режимах измельчения. По амплитудам сигналов с информационными частотами можно судить о режиме измельчения и заполненности мельницы материалом. Для измельчения кварцевого песка эти частоты находились в диапазоне $102 < f < 103 \text{ кГц}$.

Проведенные экспериментальные измельчения различных материалов позволили уточнить диапазоны характерных частот. Так для измельчения шлака характерные частоты: $114 \text{ кГц} < f < 115 \text{ кГц}$ (см. рис. 3), для циркона : $122 \text{ кГц} < f < 135 \text{ кГц}$.

Таким образом, текущий анализ величины амплитуд сигналов зоны измельчения с характерными частотами позволяет упростить и ускорить процесс идентификации режима измельчения.

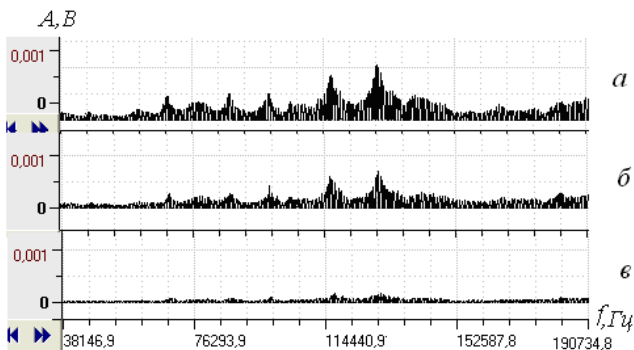


Рисунок 3 – Записи амплитудно-частотных характеристик сигналов на разных режимах работы лабораторной струйной мельницы при измельчении шлама
 а) – загрузка мельницы; б) – рабочий режим измельчения; в) – разгрузка мельницы

Оптимизация и управление процесса струйного измельчения основаны на контроле степени наполнения струй материалом. Отклонения от оптимальной загрузки струй отрицательно сказываются на производительность мельницы: как перегрузка материалом зоны измельчения, так и недогрузка или разгрузка струй вызывает снижение эффективности измельчения. Поэтому управление процессом измельчения для достижения оптимальной производительности при требуемой дисперсности заключается в контроле загрузки струй материалом и сохранении, тем самым, рабочего режима измельчения. Как показали исследования, режим измельчения идентифицируется по величине амплитуд сигналов характерных частот, записываемых в ходе акустического мониторинга зоны измельчения.

На основе установленной связи закономерностей изменения технологических параметров процесса струйного измельчения и амплитудно-частотных характеристик данных акустического мониторинга разработан алгоритм и программа управления этим процессом. На рис. 4 показана схема управления процессом измельчения на основе акустического мониторинга.

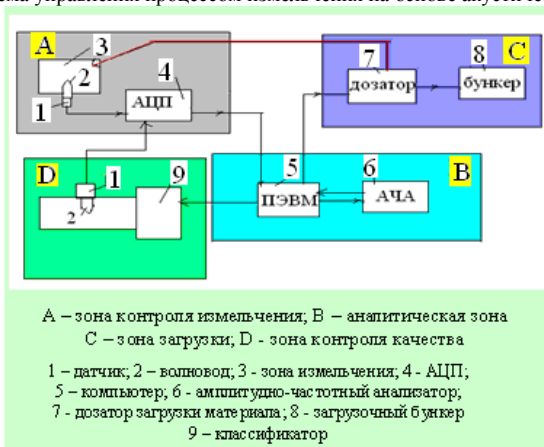


Рисунок 4 – Общая схема системы управления процессом измельчения

Комплексная система управления процессом измельчения включает четыре структурные зоны: зону контроля сигналов в процессе измельчения, зону управления загрузкой, область

анализа полученных сигналов и выдачу рекомендаций по изменению технологических и режимных параметров процесса и область контроля качества продукта.

После обработки сигналов зоны измельчения и сравнения текущей величины амплитуд сигналов характерных частот срабатывает контрольно-передающий сигнал.

В случае отклонения контролируемых параметров на недопустимую величину поступает сигнал на изменение параметров загрузки в соответствующую зону С (рис. 4). Из бункера загрузки подается необходимая порция материала. Процесс измельчения продолжается. В случае аварийной ситуации подается сигнал на остановку процесса.

Выводы. Разработан алгоритм и схема оптимизации струйного измельчения на основе использования результатов акустического мониторинга процесса. Проведено уточнение информационных характерных частот сигналов зоны измельчения. Необходимо продолжить работу по доработке системы загрузки мельницы по итогам сравнения контролируемых параметров оптимизации. Дальнейшее направление исследований состоит в формализации функциональных зависимостей, которые составят основу создания программы управления процессом.

Список литературных источников

1. Pivnyak G.G. Decrease of Power Consumption in Fine Grinding of Minerals /G.G. Pivnyak, P.I/ Pilov, N.S. Pryadko // Mine Planning and Equipment Selection C Drebenstedt and R. Singhal (eds), DOI: 10.1007/978-3-319-02678-7_104@ Springer International Publishing Switzerland 2014.–P. 1069 -1079.
2. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушений крупномасштабных объектов// ФТТ, 2005, том 47, вып. 5.– С. 788 – 794.
3. Прядко Н.С. Акустические исследования струйного измельчения / LAP LAMBERT Academic Publishing.–OmniScriptum GmbH&Co.Kg.–2013.– Saarbrucken Germany.–172с.
4. Прядко Н.С. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль 2012.–№ 6.- С. 46 – 52
5. Спосіб моніторингу струминного подрібнення і газоструминний млин/ П.И. Пилов, Л.Ж. Горобец, Н.С. Прядко// Патент України № 104427 МПК В 02С 25/00 / опубл. 10.02.2014, бюл. № 3, заявка № а201016004 опубл. 10.07.2012, бюл. № 13.
6. Прядко Н. С. Информационные технологии для управления тонким измельчением / Н. С. Прядко, Г. А. Стрельников // Техническая механика. – 2014. – №4. – С. 118 – 125
7. Прядко А.В. Мешеряков Л.И., Новодранова В.А., Методика контроля режимов работы струйной мельницы/ Л.И. Мешеряков, В.А. Новодранова, А.В. Прядко // Збагачення корисних копалин. – 2014. – № 55 (96). – С. 98 – 107.

ПОБУДОВА НЕЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ ТРИВАЛОСТІ ВИКОНАННЯ ПРОЄКТІВ ПІДГОТОВКИ ЖІНОК-БОКСЕРІВ ДО ЗМАГАНЬ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЖОНСОНА

С.Б. Приходько, Н.В. Князь

Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Миколаїв

При підготовці жінок-боксерів високої кваліфікації до змагань існує проблема визначення часу для виводу спортсменів на пік форми перед важливими боями. На сьогодні не враховується, по-перше, те, що підготовка до змагань є певним проектом і потребує управління низкою ресурсів, зокрема часом, а, по-друге, що час підготовки є випадковою величиною, яка залежить від ряду факторів, в тому числі і від тривалості тренувань. Подібних залежностей у вигляді математичних моделей на сьогодні не розроблено. А існують лише загальні рекомендації наближених строків підготовки жінок-боксерів до змагань, а самі строки, як правило, є точковими оцінками, що отримані експертним шляхом [2]. Згідно [5] замість експертного оцінювання тривалості проекту можна використовувати регресії. Проте для оцінювання тривалості підготовки жінок-боксерів до змагань неможливо побудувати адекватну лінійну регресію, тому що розподіл тривалості тренувань або тривалості проєктів підготовки жінок-

боксерів до змагань не є нормальним [4]. Через це виникає необхідність побудови рівняння нелінійної регресії та знаходження її довірчого інтервалу. Це дозволить покращити спортивну майстерність боксерів і досягти кращих результатів на змаганнях. Таку регресію можна побудувати без перебору моделей-претендентів, використавши нормалізуюче перетворення, наприклад, перетворення Джонсона.

На сьогоднішній час для побудови нелінійної регресії є такі методи: метод простого перебору, методи лінеаризуючих та нормалізуючих перетворень. Метод простого перебору вимагає завдання різних видів рівняння регресії [1,6] і вибору найкращого наближення із заданих за певним критерієм [8], тому краще використовувати перетворення [7,9], в першу чергу нормалізуючі. У якості таких перетворень зазвичай застосовують логарифмічні перетворення, але вони не завжди дозволяють зробити задовільну нормалізацію. З цієї причини краще використовувати інші перетворення, наприклад, нормалізуюче перетворення Джонсона. В [4] для нормалізації тривалості проєктів підготовки жінок-боксерів до змагань було обрано саме таке перетворення Джонсона, тому це перетворення можна використати для побудови нелінійної регресії тривалості підготовки жінок-боксерів до змагань та знаходження довірчого інтервалу для значень цієї регресії.

В роботі виконано побудову як рівняння нелінійної регресії тривалості (у днях) виконання проєктів підготовки жінок-боксерів високої кваліфікації до змагань в залежності від часу (у хвилини) тренувань на основі перетворення Джонсона, так і її довірчого інтервалу. Для цього було обрано перетворення Джонсона певної сім'ї та знайдено його параметри, за яким виконано нормалізацію емпіричних даних. За нормалізованими даними були побудовані рівняння лінійної регресії та її довірчий інтервал (рис. 1), за якими на основі обраного перетворення були побудовані відповідно рівняння нелінійної регресії та її довірчий інтервал. Вони наведені на рис. 2.

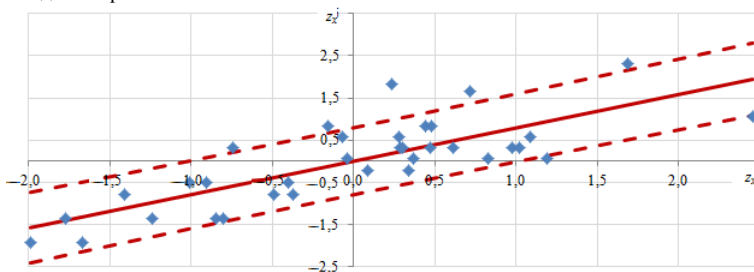


Рисунок 1 – Лінійна регресія та її довірчий інтервал для нормалізованих значень тривалості проєктів підготовки жінок-боксерів до змагань в залежності від нормалізованих значень тривалості тренувань: \blacklozenge - емпіричні дані; — - лінійна регресія на основі перетворення Джонсона; --- - верхня та нижня границі довірчого інтервалу лінійної регресії на основі перетворення Джонсона

Побудова лінійної регресії для нормалізованих значень задається як [1]:

$$z_y = b_0 + b_1 z_x, \quad (1)$$

де b_0 і b_1 - коефіцієнти лінійної регресії.

Значення коефіцієнтів b_0 і b_1 лінійної регресії (3) знаходяться за методом найменших квадратів:

$$b_1 = \frac{\overline{z_x z_y} - \overline{z_x} \cdot \overline{z_y}}{\overline{z_x^2} - \overline{z_x}^2}; \quad b_0 = \overline{z_y} - b_1 \cdot \overline{z_x}, \quad (2)$$

$$\text{де } \overline{z_x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{xi}; \quad \overline{z_y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{yi}; \quad \overline{z_x z_y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{xi} z_{yi}.$$

Довірчий інтервал для значень лінійної регресії (4) задається як [3]:

$$[\hat{z}_y(z_x)] = \hat{z}_y(z_x) \pm t_{\alpha/2, n-2} \cdot \sqrt{s_{z_y}^2 \sqrt{1 + 1/n + (z_x - \bar{z}_x)^2 / S_{z_x}}}, \quad (3)$$

де n - це кількість емпіричних даних; $s_{z_y}^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (z_{y_i} - \hat{z}_y(z_{x_i}))^2$; $S_{z_x}^2 = \sum_{i=1}^n (z_{x_i} - \bar{z}_x)^2$;

$t_{\alpha/2, n-2}$ - значення t-розподілу Стюдента з $n-2$ ступенями свободи.

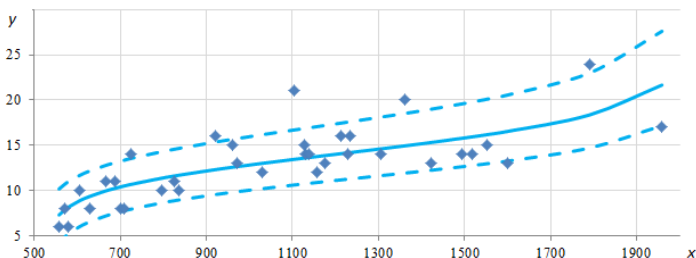


Рисунок 2 – Нелінійна регресія тривалості підготовки жінок-боксерів до змагань в залежності від тривалості тренувань та її 95%-вий довірчий інтервал: \blacklozenge - емпіричні дані; — - нелінійна регресія на основі перетворення Джонсона; --- - верхня та нижня границі довірчого інтервалу нелінійної регресії

Враховуючи (1) і те, що $z_y = \gamma_y + \eta_y \text{Arsh}\left(\frac{y - \varphi_y}{\lambda_y}\right)$, то нелінійна регресія тривалості

проектів підготовки жінок-боксерів до змагань в залежності від тривалості тренувань може бути представлена як

$$\hat{y}(x) = \lambda_y + \varphi_y \text{Sh}\left(\frac{\hat{z}_y(z_x) - \gamma_y}{\eta_y}\right), \quad (4)$$

де $\hat{z}_y(z_x) = b_0 + b_1 z_x$; $z_x = \gamma_x + \eta_x \ln\left(\frac{x - \varphi_x}{\lambda_x + \varphi_x - x}\right)$.

Враховуючи (3), довірчий інтервал $[\hat{y}(x)]$ для нелінійної регресії (4) задається як

$$[\hat{y}(x)] = \lambda_y + \varphi_y \text{Sh}\left(\frac{[\hat{z}_y(z_x)] - \gamma_y}{\eta_y}\right), \quad (5)$$

де $[\hat{z}_y(z_x)]$ задається як (3).

Також у роботі була побудована нелінійна регресія на основі десятичного логарифму. Для порівняння отриманих результатів та вибору кращої нелінійної регресії потрібно використати певні критерії.

Для порівняння нелінійних регресій було використано такий критерій, як сума квадратів відхилень між тривалістю, прогнозованою за регресією, та емпіричними даними:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}(x))^2, \quad (6)$$

де n - це кількість емпіричних даних; y_i - фактичне значення випадкової величини y ; $\hat{y}(x)$ - прогнозоване значення випадкової величини y .

Кращою є та регресія, для якої значення SSE є меншим (це регресія на основі нормалізуючого перетворення Джонсона). Також для порівняння регресій було використано коефіцієнт детермінації R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}(x))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (7)$$

де n - це кількість емпіричних даних; y_i - фактичне значення випадкової величини y ; $\hat{y}(x)$ - прогнозоване значення випадкової величини y ; \bar{y} - середнє значення випадкової величини y ,

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

Кращою була регресія на основі нормалізуючого перетворення Джонсона, тому що значення R^2 було більшим.

Висновки. В роботі були побудовані рівняння нелінійної регресії тривалості проєктів підготовки жінок-боксерів високої кваліфікації до змагань в залежності від тривалості тренувань та рівняння її довірчого інтервалу з використанням перетворення Джонсона.

Список літературних джерел

1. Демиденко, Е.З. Линейная и нелинейная регрессии [Текст] / Е. З. Демиденко. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 302 с.
2. Ділення, М.О. Бокс: Жінки. Навчальна програма для дитячо-юнацьких спортивних шкіл, спеціалізованих дитячо-юнацьких шкіл олімпійського резерву, шкіл вищої спортивної майстерності [Текст] / М. О. Ділення, В. Н. Ост'янов, Г. І. Комісаренко [та інші]. – К.: НОК України, 2009. – 112 с.
- 3 Орлов, А.И. Прикладная статистика. Учебник. [Текст] / А. И. Орлов. – М.: Издательство "Экзамен", 2004. – 656 с.
4. Приходько, С.Б. Вибір нормалізуючого перетворення для інтервального оцінювання часу виконання проєктів підготовки боксерів-жінок до змагань [Текст] / С. Б. Приходько, Н. В. Князь // 36. наук. праць НУК. – 2014. – № 5 (455). – С.87–91.
5. A guide to the project management body of knowledge. Fifth edition [Text] / Project Management Institute, 2013. – 589 p.
6. Bates, Douglas M. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications [Text] / Douglas M. Bates, Donald G. Watts. – Wiley, 1988. – 384 p.
7. George, A. F. Nonlinear Regression [Text] / George A. F. Seber, C. J. Wild. – John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 792 p.
8. Pardoe, Iain. Applied regression modeling [Text] / Iain Pardoe. – Wiley, 2012. – 325 p.
9. Ryan, T. P. Modern Regression Methods [Text] / T. P. Ryan – Wiley, 2008. – 672 p.

ОЦІНКА ВПЛИВУ СПОТВОРЕНЬ КІНЕМАТИЧНОЇ СТРУКТУРИ ПОТОКУ НА ТОЧНІСТЬ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІН ГІДРОДИНАМІЧНОГО КОЕФІЦІЄНТА

А.М. Рак

ДП «Укрметртестстандарт», Київ

Задача підвищення точності обліку природного газу на сьогодні є важливою науково-прикладною задачею, оскільки без її вирішення не можливі як побудова ефективних систем енергозбереження, так і раціональне та економне споживання, які в свою чергу є визначними факторами для досягнення енергетичної незалежності держави. При цьому одним з ключових чинників є ґрунтовні дослідження приладового у газотранспортних мережах [1], підґрунтям яких є створення та ефективна експлуатація сучасних приладів обліку об'єму та об'ємної витрати природного газу, до яких можна віднести ультразвукові вимірювальні перетворювачі.

На сьогоднішній день ультразвукові витратоміри можна розглядати в якості реальної конкурентоспроможної альтернативи засобам вимірювальної техніки витрати та кількості газу, які ще широко застосовуються у вітчизняній витратометрії, таким як турбінні і роторні прилади та витратоміри, що базуються на методі змінного перепаду тиску, тощо[2].

Ультразвуковому методу притаманно ряд переваг, таких як незначні втрати тиску та мінімальний вплив на вимірюваний потік, великий динамічний діапазон, можливість вимірювання витрати та кількості газу у трубопроводах великих діаметрів, розвинена система самодіагностики та відсутність рухомих частин, висока швидкодія, тощо. Водночас, найсуттєвішим недоліком таких приладів є значний вплив на точність вимірювань спотворень газодинамічної структури потоку [3] та відсутність експериментальної бази для оцінки подібних впливів на їх, метрологічні характеристики, в тому числі і впливів акустичних явищ, які невідворотно виникають у реальних гідравлічних технологічних мережах.

А тому для побудови ефективного вузла обліку природного газу на базі ультразвукового лічильника-витратоміра необхідно окреслити найвагоміші чинники впливу на метрологічні характеристики приладу і методологію їх компенсації похибок, а також розробити рекомендації щодо раціонального місця їх монтажу на технологічній мережі і їх просторової орієнтації відносно вертикальної осі трубопроводу [4].

Враховуючи відсутність експериментальної бази та складність проведення натурних досліджень одним з підходів для вирішення задачі можуть слугувати методи обчислювальної гідрогазодинаміки, що дозволяють з високою ймовірністю визначити значення кінематичних та термодинамічних параметрів потоку по його протяжності та поперечних перерізах [5].

Для найпоширенішого в комерційному обліку часоімпульсного різницевого методу значення вимірної витрати пропорційне усередненій за ультразвуковим променем l швидкості

потоку $\frac{1}{l} \int_0^l u(t) dt$, площі поперечного перерізу вимірювальної камери S та гідродинамічному

коефіцієнту k , що визначає співвідношення вимірної швидкості потоку за променем та середньою по поперечному перерізу швидкістю потоку $\frac{1}{S} \iint_S u(S) dS$ [6].

$$k = \frac{\frac{1}{S} \iint_S u(S) dS}{\frac{1}{l} \int_0^l u(t) dt} \quad (1)$$

Таким чином, одним з підходів до оцінки точності може бути знаходження відхилення значення гідродинамічного коефіцієнта k , викликане неоднорідністю потоку вимірюваного середовища, відносно його значення для осесиметричного розвиненого турбулентного потоку у трубопроводі з круглим поперечним перерізом.

Дослідження були проведені для місцевих гідравлічних опорів у формі коліна з поворотом на кут $\pi/2$ рад та просторового коліна (два коліна з поворотом на кут $\pi/2$ рад кожний і розміщених в одній площині), які є найбільш розповсюдженими частинами реальних гідравлічних систем (рис.1).

Оцінювання якісних і кількісних показників впливу спотворень симетрії кінематичної структури потоку було проведено шляхом чисельного моделювання для поперечних перерізів на відстані $9D_u$ від вхідної площини ($3D_u$ від 1го місцевого опору), за чотирьох випадків розміщення вимірювальних площин, відносно вертикальної осі перетворювача, при відліку кута повороту за годинниковою стрілкою з дискретністю $\pi/4$ рад (Рис.1 а) з використанням програмного пакету Ansys CFX.

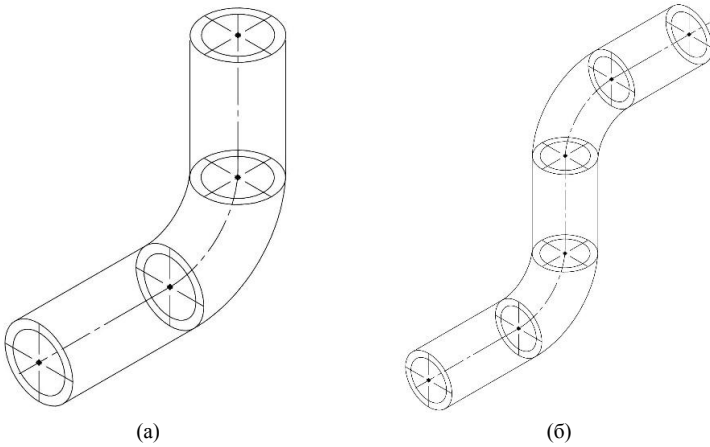


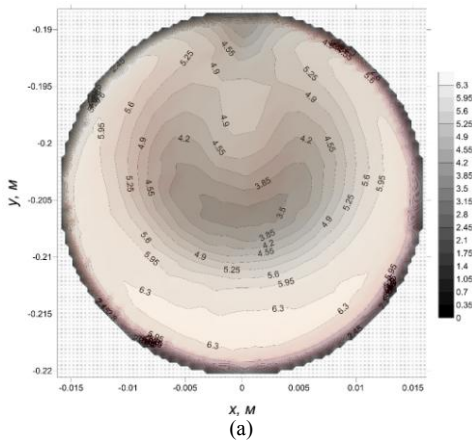
Рисунок 1 – Місцеві гідравлічні опори в формі коліна з кутом повороту $\pi/2$ (а) та подвійного просторового коліна (б)

Коефіцієнт k для неспотвореного профілю потоку розраховувався для осесиметричного потоку, що описується залежністю [7] (Рис.1 б):

$$\frac{V}{V_m} = 1,1523 + 0,09211 \ln \left(1 - \frac{r}{R} \right) + 0,1858 \Phi \left(\frac{r}{R} \right), \quad (2)$$

де функція $\Phi \left(\frac{r}{R} \right)$ є поліномом четвертого порядку і описується виразом:

$$\Phi \left(\frac{r}{R} \right) = -0,5530347 \left(\frac{r}{R} \right)^4 + 1,6066064 \left(\frac{r}{R} \right)^3 - 1,8782031 \left(\frac{r}{R} \right)^2 + 0,6044168 \left(\frac{r}{R} \right) + 0,0026893. \quad (3)$$



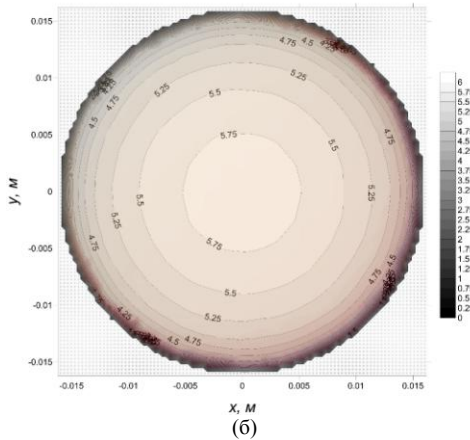


Рисунок 2 – Ізотахи швидкостей для осесиметричного розподілу Grego [7] (б) та для перерізу на відстані $9D_u$ від входу (а) для втрати $4,16 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Результати моделювання похибки, що вноситься у результати вимірювання однопроменевого ультразвукового витратоміра асиметрією (спотворенням кінематичної структури) потоку, отримані шляхом моделювання гідродинамічного коефіцієнту k наведено на рис.3.

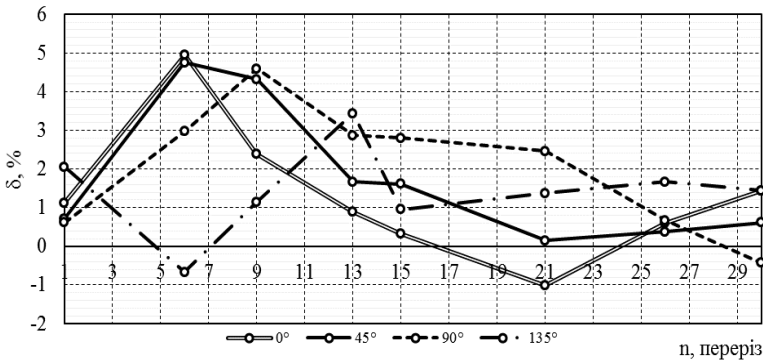


Рисунок 3 – Похибка однопроменевого витратоміра в залежності від кута встановлення на трубопроводі для різних відстаней від місцевого опору в формі подвійного просторового коліна

Аналізуючи отримані результати можна зробити наступні висновки:

1. Для однопроменевого ультразвукового перетворювача результат вимірювання хордової швидкості залежить від викривлення осьової симетрії профілю і зменшується з віддаленням контрольного перетину від місцевого опору;
2. Величина похибки залежить від просторової орієнтації приладу відносно вертикальної вісі трубопроводу. Оптимальним можна вважати кут розташування $\pi/2$ або $3\pi/4$ – відносно вертикальної осі вимірального перетворювача;
3. Отримані результати дають можливість окреслити вимоги до локального місця встановлення однопроменевого ультразвукового вимірального перетворювача на технологічній мережі при вирішенні задачі досягнення оптимальної точності вимірювань з врахуванням особливостей експлуатаційних умов.

Список літературних джерел

1. Матіко Ф.Д. Вивчення балансу об'єму природного газу в системах його транспортування та розподілу/ Ф.Д. Матіко Є.П. Пістун // Метрологія та прилади. – 2014. – №1.– С. 10-16.
2. Lunde P. GERG Project on Ultrasonic Gas Flow Meters, Phase II/ P. Lunde, K.E. Froysa, M Vestrheim, 2000. – 114p.
3. Tony R. Kuphaldt. Lessons In Industrial Instrumentation, 2008.–655p.
4. Коробко І.В., Рак А.М. Дослідження дії асиметричності потоку рідини, викликаної місцевими гідравлічними опорами у вигляді двох колін, на точність перетворювачів витрати ультразвукового класу// Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування.– 2014.– №3(72). – С.72-80.
5. Gryshanova, I. CFD modeling of turbine flow meters [Text] / I. Gryshanova, I. Korobko // Innovations on discrete productions. – 2014. - №1. – P.6 – 8.].
6. ISO 17089-2:2010 Measurement of fluid flow in closed conduits - Ultrasonic meters for gas - Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.
7. Grego G., 2000, Comparison of the velocity distribution in circular penstocks measured with current-meters to assess the efficiency of hydraulic machinery in generating and pumping operations, IGHEM 2000, Kempton, July 10-12, 15 p.

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДА ОРМ У ЗАДАЧІ РОЗМІЩЕННЯ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

С.А. Ус, М.С. Павлов

Національний гірничий університет, Дніпропетровськ

Стільниковий зв'язок є популярним і поширеним явищем нашого життя, тому підвищення ефективності роботи мереж стільникового зв'язку та їх оптимального проектування залишаються актуальними.

Розв'язуванню цих задач присвячено чисельні публікації, наприклад [3], в яких запропоновано методи і алгоритми, що дозволяють приймати рішення про розміщення станцій, враховуючи різні вимоги, які стосуються якості покриття, екологічних та технологічних обмежень. Але, як правило, ці алгоритми мають високу обчислювальну складність, отже побудова ефективних програмних комплексів, які їх реалізують, також є актуальною задачею.

В даній роботі представлено програмний комплекс для розв'язування задачі оптимального розміщення базових станцій на заданій території, який реалізує запропоновані в роботі [2] алгоритми і забезпечує зручне користування і дозволяє враховувати рельєф місцевості, густоту будівель та попит на послуги мобільного зв'язку.

Основою використаного алгоритму, є алгоритм оптимального розбиття множин [1]

Також варто зауважити, що для підрахунку рівня падіння радіосигналу програмний комплекс може використовувати наступні моделі:

- 1) Модель Окамура-Хати.
- 2) Модель Кся-Бертоні.

Структура програми включає три основні компоненти (рис.1):

1) Model (Модель). В ньому знаходяться компоненти, які виконують всі основні функції, необхідні для розв'язування поставленої задачі, а саме: реалізовано алгоритми оптимального розбиття множин, оптимального розміщення базових станцій стільникового зв'язку, алгоритм локальних околів та інші необхідні підмодулі.

2) View (вид). В ньому реалізовано лише графічний інтерфейс, необхідний для зручного користування програмою.

3) Controller (Контролер). Якщо перші два модулі можна назвати пасивними, то Controller – це активний модуль. Він реалізує взаємодію інтерфейсу та моделі.

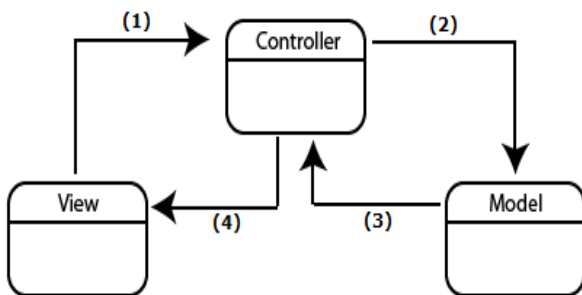


Рисунок 1 – Схема взаємодії модулів: 1 - дії користувача; 2- розрахунки, на основі даних користувача; 3 - результати розрахунків; 4 - повідомлення користувача про результати обчислень.

Вибір оптимального набору місць розташування реалізовано через алгоритм локальних околиць, який хоч і зменшує кількість переглядів, для великого числа можливих місць розташування потребує багато часу. Крім того, в процесі роботи алгоритму ОРМ доводиться неодноразово з'ясувати для кожної точки множини до якого з центрів відстань буде меншою. Якщо в один момент часу з'ясувати це питання тільки для однієї точки, то такий підхід ефективний лише для невеликого розміру вхідної множини. Тобто, для великих множин (кількість центрів > 50, кількість точок карти покриття > 1000000) виконання алгоритму є тривалою процедурою.

Для мінімізації часу виконня алгоритму було прийнято рішення організувати пул потоків.

Потік – це послідовність команд мови програмування, які виконуються. Пул потоків – це фіксована множина потоків.

Використання такого підходу дозволило зменшити час роботи програми.

Залежність часу виконання програми від кількості потоків показано у табл.1. Дані показані для таких умов: кількість точок у множині – 4000000; кількість центрів – 5; розмір буферу – 16384 точок.

Таблиця 1 – Залежність часу виконання від кількості потоків

Кількість потоків	Час виконання (мсек)	Кількість потоків	Час виконання (мсек)
1	3486	9	2512
2	3027	10	2478
3	2653	11	3056
4	2643	12	2294
5	2728	13	2388
6	2467	14	2830
7	2477	15	2392
8	2484	16	2562

На рис. 2 показано графічну інтерпретацію цієї залежності.

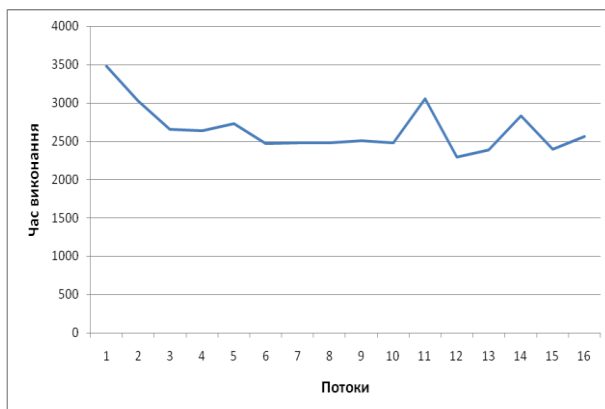


Рисунок 2 – Графік залежності часу виконання (мсек) від кількості потоків.

Таким чином, в роботі розглянуто основні особливості програмної реалізації алгоритму оптимального розбиття множин, а саме: структура програмного комплексу та виконання алгоритму в багатопотоковому середовищі.

Список літературних джерел

- 1 Киселева Е.М. Модели и методы решения непрерывных задач оптимального разбиения множеств / Е.М. Киселева, Л.С. Коряшкина. К.: Наукова думка, 2013. – 606 с.
- 2 Us S. A. Application of the optimal set partitioning method to problem of wireless network engineering / S. A. Us // Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems - International Forum on Energy Efficiency. – CRC Press/ Balkema - Taylor & Francis Group. – 2013. – P. 175–181
- 3 Оптимальное размещение базовых станций / С. Ю. Ермолаев , 2010.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ РАЗВИВАЮЩЕГОСЯ ПРЕДПРИЯТИЯ О.Е.Федорович, Ю.А. Лещенко

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Производство высокотехнологической конкурентоспособной продукции связано с модернизацией и развитием тех отраслей, которые обеспечат выход Украины на зарубежные рынки Европы, Азии и Америки. К ним относятся, в первую очередь, аэрокосмическая и машиностроительная отрасли, в которых большое внимание уделяется инновационным и информационным технологиям. Повышение качества выпускаемой продукции [1], требует использования не только существующих подходов и стандартов по качеству, но и поиска новых решений [2, 3]. Предлагается новый подход по обеспечению современных требований качества, основанный на учёте длительного жизненного цикла (ЖЦ) и логистики производства.

Поставлена и решена задача обеспечения требований качества высокотехнологической продукции с учётом ЖЦ сложных изделий и логистической цепи (ЛЦ) «снабжение – производство – сбыт». Исследован жизненный цикл с учётом иерархии компонент архитектуры изделий для удовлетворения требований качества на начальных этапах создания сложной техники. Для обеспечения качества при производстве сложных изделий поставлена и решена оптимизационная задача, связанная с выбором материалов, комплектующих и технологических процессов производства. С учётом иерархического представления ЛЦ производства сложных изделий решена задача оптимизации качества как для отдельных элементов ЛЦ, так и для всей

цепи. Проводится обоснование выбора мест контроля качества в ЛЦ с учётом ограниченности ресурсов отечественных предприятий.

Для моделирования материальных потоков в ЛЦ был использован метод агентного имитационного моделирования [4] и сформированы множества агентов: агент «Генератор заявок»; агент «Контроль качества»; агент «Исправимый брак»; агент «Управление качеством»; агент «Задержка заявки»; агент «Описание ЛЦ»; агент «Результаты моделирования».

В результате моделирования были получены: время реализация потока заявок без учёта брака; время реализация потока заявок с учётом петель исправимого брака; среднее время выполнения одной заявки в ЛЦ; количество и % исправимого брака; количество и % неисправимого брака.

Предложенный подход целесообразно использовать в задачах стратегического планирования развития предприятия при создании сложной техники, когда необходимо, в условиях ограниченных ресурсов, осуществить выпуск высококачественных конкурентоспособных изделий, востребованных на рынках сбыта высокотехнологической продукции.

Список литературных источников

1. Федорович, О. Е. Формирование архитектуры сложных изделий аэрокосмической техники на основе прецедентного подхода [Текст] / О. Е. Федорович, Л. Н. Лутай // *Радіоелектронні і комп'ютерні систем.* – 2010. – № 4 (45). – С. 138 – 142.
2. Roszak, M. T. Zarządzanie jakością w praktyce inżynierskiej [Text] / M. T. Roszak // *Open Access Library.* – 2014. – Vol. 1(31). – 150 p.
3. Pawluczuk Jurij K проблеме управления производственными ресурсами предприятия (problemy zarządzania zasobami produkcyjnymi przedsiębiorstwa) [Text] / Jurij Pawluczuk // *Zarządzanie. Teoria i praktyka.* – 2011. – № 1(3). – P. 17 – 26.
4. Федорович, О. Е. Гармонизация качества в логистической цепи производства [Текст] / О. Е. Федорович, Ю. А. Лещенко // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи.* – 2014. – № 2 (66). – С. 125 – 128.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРПОРАТИВНЫХ ОФИСОВ РАЗВИВАЮЩИХСЯ КОМПАНИЙ

О.Е.Федорович, Ю.Л. Прончаков, Т.С. Писклова

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Введение. Управление современным предприятием направлено на быстрое реагирование сложившейся ситуации на рынке, чтобы обеспечить устойчивое развитие производства и конкурентоспособность продукции [1]. В последнее время для минимизации затрат в управлении и коммуникациях стала использоваться стратегия «гибкого» офиса, позволяющая обеспечить рациональное управление планируемого портфеля заказов. В этом случае для многопрофильной корпорации в состав стационарных офисов, могут входить временные офисы, существующие на планируемый отрезок времени для реализации конкретного портфеля заказов. Преимуществом такого решения является минимизация затрат на арендуемые площади, оперативность в принятии решений, координируемость в управлении, минимизация рисков в реализации проектов. Дальнейшее развитие такого подхода связано с созданием виртуальных офисов с облачным хранением корпоративной информации. Отсюда вытекает актуальность предлагаемого доклада, в котором ставится и решается задача обоснования и выбора архитектуры корпоративного офиса, состоящего из локальных (региональных) офисов филиалов компании.

Содержание доклада. Для решения поставленную задачу исследования, из-за её сложности, разбиваем на три этапа:

1. Формирование множества возможных архитектур корпоративного офиса.
2. Обоснование и выбор рационального варианта архитектуры корпоративного офиса.

3. Моделирование управляющих и коммуникационных взаимодействий локальных офисов, входящих в состав корпорации.

Для оценки множества возможных архитектур корпоративного офиса, использован метод теории перечисления [2]. Для порождения возможных вариантов архитектуры корпоративного офиса использованы производящие функции и случайный поиск с лексикографическим упорядочиванием вариантов. Для обоснования и выбора рационального варианта архитектуры корпоративного офиса сформирован набор показателей: улучшение экономических показателей корпорации; улучшение организационного управления; затраты, связанные с реорганизацией корпоративного управления; время, потраченное на реорганизацию корпоративного офиса; риски, связанные с реорганизацией корпоративного офиса. Для относительно небольшого количества возможных вариантов реорганизации корпоративного офиса использованы качественные оценки экспертов и метод лексикографического упорядочивания вариантов. Если количество вариантов реорганизации корпоративного офиса велико, то использован метод целочисленной оптимизации с булевыми переменными [3]. Для оценивания эффективности работы корпоративного офиса использован метод мультиагентного моделирования.

Выводы. Предложенный подход целесообразно использовать при формировании стратегии реорганизации корпоративного офиса, когда необходимо диверсифицировать деятельность организации и рассмотреть возможность перехода на новые проекты и заказы.

Список литературных источников

1. Федорович, О. С. Наукові основи управління великомасштабними проектами та програмами розвитку машинобудування: моногр. [Текст] / О. С. Федорович, В. М. Глюшко, Е. Ю. Рубін. – Х.: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2015. – 200 с.
2. Де Брейн, Н. Обзор обобщенной перечислительной теории Пойа [Текст]: пер. с англ. / Н. Де Брейн // Перечислительные задачи комбинаторного анализа: сб. переводов; под ред. Г. П. Гаврилова. – М.: Мир, 1979. – С. 229 - 256.
3. Дубов, Ю. А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов системы [Текст] / Ю. А. Дубов, С. И. Травкин, В. Н. Якимец –М.: Наука, 1986. – 500с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЛОГИСТИКЕ ДОБЫЧИ, ТРАНСПОРТИРОВКИ, ПЕРЕРАБОТКИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ О.Е. Федорович, А.В. Прохоров, К.О. Западня

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

Введение. Современные системы, связанные с нефтедобычей и производством нефтепродуктов представляет собой геораспределенные комплексы с сложными иерархическими системами управления типа SCADA. Большое количество факторов влияния внутреннего и внешнего характера усложняют процесс планирования, управления и диспетчирования движения нефтепродуктов и требуют использования информационных технологий, основанных на моделях знаний и принятия решений. Поэтому актуальна тема доклада, в котором изложены результаты исследования логистической цепи добычи, транспортировки, переработки и распределения нефтепродуктов.

Содержание доклада. Весь логистический процесс, связанный с получением и продажей нефтепродуктов разбивается на два потоковых процесса:

1. Добыча нефти и доставка ее до нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ).
2. Формирование каналов дистрибуции нефтепродуктов.

На первом этапе осуществляется моделирование непрерывного потока нефтепродуктов по цепи добыча, первичная переработка, транспортировка по магистралям трубопроводов до НПЗ. При этом основными составляющими модели являются кустовые месторождения, заводы по первичной переработке, магистральные трубопроводы, компрессорные станции, резервуарные парки, подкачивающие станции, терминалы отгрузки нефти. Для задач управления сформирована многоуровневая алгоритмическая модель с использованием регулярной

алгоритмической алгебры. Для прогнозирования и планирования объемов передвижения нефти использован метод имитационного моделирования в виде агентного представления основных компонент. В качестве основных показателей для оценки непрерывного потокового процесса использованы: объемы передаваемой нефти, время транспортировки, объемы страховых запасов, отклонение от плановых показателей.

На втором этапе исследован дискретный потоковый процесс, связанный с движением бензовозов от НПЗ до АЗС. Учитывая сложные взаимодействия конкурентной природы, связанные с сетями и отдельными заправочными станциями, проведено мультиагентное моделирование процессов взаимодействия отдельных конкурирующих (конфликтующих) агентов между собой. Для этого задается сценарий взаимодействия агентов, а также, в зависимости от ролевых назначений агентов, стратегия и тактика поведения каждого агента. При этом сформированы правила принятия решений в виде баз знаний, которые пополняются как стереотипными, так и оригинальными оптимизационными решениями.

Такой подход позволяет сформировать рациональную ценовую политику для планирования и диспетчирования распределения нефтепродуктов.

Выводы. Предложенный подход был использован в управлении распределением нефтепродуктов в Харьковской области, а также в НИИ нефти Мексики и национальной нефтяной компании Ирака. Достоинством создаваемого комплекса моделей является возможность учета неопределенных и случайных факторов, которые возникают из-за изменений экономического и политического характера и влияют на нефтедобычу.

Список литературных источников

1. Геопространственные производственные системы. Часть 1. Анализ, моделирование, проектирование: моногр. [Текст] / В. М. Илюшко, О. Е. Федорович, О. Н. Замирец, Л. Д. Греков. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 250 с.

2. Геораспределенная производственные системы. Часть 2. Размещение на земной поверхности, оптимизация магистральных систем, космический мониторинг: моногр. [Текст] / В. М. Илюшко, О. Е. Федорович, Л. Д. Греков. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 250 с.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ФУР'Є ДЛЯ ЗНАХОДЖЕННЯ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗКУ БАГАТОВИМІРНИХ ОБЕРНЕНИХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ

В.В. Хайдуrow

Черкаський державний технологічний університет, Черкаси

Вступ. Актуальність статті обумовлюється тим, що існує ряд промислових задач, для яких потрібно побудувати ефективні методи, які б добре справлялись із ними. Для розв'язання оберненої задачі, як відомо з практики, потрібно досить багато обчислень і часу.

Як відомо, експериментальні методи дослідження теплофізичних процесів дають найбільш достовірну інформацію про тепловий стан об'єкта. Ясна річ, що всі дослідження подібного роду не можуть служити вичерпним джерелом інформації про однозначність, враховуючи те, що кожен експеримент сам по собі унікальний. Ці факти сприяли розвитку математичного моделювання як такого. У роботі описана методика розв'язання ОЗТ на основі методу найшвидшого спуску з попередньою побудовою хорошого наближення до початкової умови задачі із використанням методу Фур'є.

Теоретична частина. Пряма задача теплопровідності в однорідному стержні довжиною L формується наступним чином [2, 6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x \in [0; L], t \in [0, t_f]. \quad (1)$$

Початкові умови: $T(x,0) = \theta(x)$. Граничні умови можуть бути довільними. В якості прикладу візьмемо умови Дирихле:

$$T(0,t) = 0, T(L,t) = 1. \quad (2)$$

Розв'язавши пряму задачу, знаходиться розподіл температури у момент часу $t_f - T(x,t_f) = \Theta(x)$.

Тоді обернену задачу до (1), (2) можна сформулювати наступним чином: знаючи рівняння (1), граничні умови (2) та кінцевий розподіл температури $T(x,t_f) = \Theta(x)$, відновити початковий розподіл температури $T(x,0) = \theta(x)$.

Одна із найпопулярніших математичних постановок оберненої задачі має вид [4]: знайти $\theta(x)$ таке, що

$$J(\theta(x)) = \int_0^L (T(\theta, x, t_f) - \Theta(x))^2 dx \rightarrow \min, \quad (3)$$

де $T(\theta, x, t_f)$ результат розв'язку задачі

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, x \in [0; L], t \in [0, t_f], T(x,0) = \theta(x). \quad (4)$$

В якості граничних умов використовуються (2). Фактично задача (3), (1), (4), (2) являє собою задачу мінімізації з обмеженням у вигляді диференціальних рівнянь. Задачу мінімізації будемо розв'язувати у дискретній постановці. На відрізку $[0; L]$ введемо n вузлів $x_i, i = 1..n$. Отже, для розв'язання задачі (3) необхідно знайти значення $\theta_i = \theta(x_i) = T(x_i, 0), i = \overline{1, n}$ в цих вузлах, тобто розв'язок залежить від n параметрів. Критерій мінімуму

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta_i} = 0, i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Вважається, що $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$.

Один із найпопулярніших та швидкісних методів розв'язання цієї задачі є метод Ньютона. Нагадаємо, що для розв'язання задач мінімізації він має вигляд:

$$\begin{aligned} G^k \Delta \theta^k &= -R^k, \\ \theta^{k+1} &= \theta^k + \Delta \theta^k \end{aligned} \quad (6)$$

Тут $G = (G_{ij}) = \left(\frac{\partial^2 J}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right)$ – матриця Гессе, $\Delta \theta = (\Delta \theta_1, \dots, \Delta \theta_n)^T$ – вектор-стовпчик

приростів параметрів, $R = (R_1, \dots, R_n)^T = \left(\frac{\partial J}{\partial \theta_1}, \dots, \frac{\partial J}{\partial \theta_n} \right)^T$ – вектор-стовпчик похідних цільової функції.

Цей метод для квадратичних функцій взагалі збігається за одну ітерацію [7]. При пошуку мінімумів аналітичних виразів він, разом зі своїми модифікаціями, є безумовним лідером.

Слід відмітити, що аналітично продиференціювати розв'язок по значенню початкової умови у конкретній точці неможливо, тому всі частинні похідні в (6) доведеться обраховувати чисельно. Це можна зробити наступним чином. Введемо позначення $\theta + \Delta \theta_i = (\theta_1, \dots, \theta_{i-1}, \theta_i + \Delta \theta_i, \theta_{i+1}, \dots, \theta_n)$. Тоді

$$\frac{\partial J(\theta)}{\partial \theta_i} = \frac{J(\theta + \Delta \theta_i) - J(\theta)}{\Delta \theta_i} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 J(\theta)}{\partial \theta_i^2} = \frac{J(\theta + \Delta \theta_i) - 2J(\theta) + J(\theta - \Delta \theta_i)}{\Delta \theta_i^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 J(\theta)}{\partial \theta_i \partial \theta_j} = \frac{J(\theta + \Delta \theta_i + \Delta \theta_j) - J(\theta - \Delta \theta_i + \Delta \theta_j) - (J(\theta + \Delta \theta_i - \Delta \theta_j) - J(\theta - \Delta \theta_i - \Delta \theta_j))}{4\Delta \theta_i \Delta \theta_j} \quad (9)$$

Для елементів, які лежать на головній діагоналі гессіану, потрібно 3 виклики функції. Для кожного із інших елементів матриці Гессе потрібно рівно 4 виклики функції. Також потрібно врахувати, що на кожній ітерації методу Ньютона виконуються обчислення функції у новознайдених значеннях невідомих параметрів. Тепер слід відмітити, що кількість викликів функцій на кожній ітерації фіксоване та квадратично залежить від кількості невідомих параметрів. У даній задачі воно буде рівне:

$$N_f = 1 + 4(1 + 2 + \dots + n) + 2n = 1 + 2n(n + 1) + 2n = 2n^2 + 4n + 1.$$

Враховуючи, що кожен обрахунок значення $J(\theta)$ є розв'язком прямої задачі теплопровідності, отримуємо метод, який досить довго буде розв'язувати поставлену задачу із-за обчислень (9).

Як вже було сказано, відомий розв'язок у певний момент часу. Потрібно знайти розподіл температури у початковий момент часу. Загальний розв'язок однорідної нестационарної задачі теплопровідності можна представити у вигляді:

$$T(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{-k^2 t} \sin(kx).$$

Очевидно, що в початковий момент часу, будемо мати

$$T(x, 0) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(kx).$$

Введемо позначення

$$D_k = C_k e^{-k^2 t}.$$

Тоді у довільний фіксований момент часу розв'язок можна представити так:

$$T(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} D_k \sin(kx).$$

Отриманий експериментальним шляхом розподіл температури, розкладаємо в ряд та знаходимо невідомі D_k . Оскільки момент часу відомий, то з виразу $D_k = C_k e^{-k^2 t}$ легко знаходяться невідомі значення C_k , тим самим знаходимо досить хороше наближення до початкової умови. Дане наближення є урізаним рядом.

Нехай маємо стандартну пряму одновимірну задачу теплопровідності в однорідному середовищі, яка має вид (1), (2). Застосуємо до рівняння теплопровідності метод розділення змінних [6]. Якщо $L = \pi$, то розв'язок цього рівняння з нульовими граничними умовами першого роду буде мати наступний вигляд:

$$T(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{-k^2 t} \sin(kx) \quad (10)$$

Як вже було сказано, що загальний розв'язок задачі типу (1), (2) можна завжди записати у вигляді суми загального розв'язку однорідного рівняння та розв'язку неоднорідного рівняння. В таких задачах, як (1), (2), зробивши заміну змінних у рівнянні теплопровідності, її завжди можна звести до задачі з граничними умовами зі значеннями 0

та 1. У даному випадку розв'язок задачі (1), (2) в момент часу t_f можна буде записати наступним чином:

$$T(x, t_f) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{-k^2 t_f} \sin(kx) + \frac{x}{\pi} \quad (11)$$

Використавши ряд Фур'є, було отримано загальний розв'язок задачі (1), (2) з граничними умовами $T(0, t) = 0$, $T(\pi, t) = 1$. Тоді початкову умову цієї ж задачі можна записати у вигляді

$$T(x, 0) = \sum_{k=1}^{\infty} C_k \sin(kx) + \frac{x}{\pi} \quad (12)$$

Оскільки потрібно знайти початкову умову (4) оберненої задачі (3), (1), (4), (2), то константи C_k отримуються розкладом розв'язку прямої задачі теплопровідності у момент часу t_f . Значення $T(x, t_f)$ у реальних технічних задачах може бути отриманий експериментальним шляхом. Очевидно, що в (12) береться кілька членів розкладу початкової умови в ряд. В будь-якому випадку отримано досить хороше наближення до початкової умови. Візьмемо в (12) N перших доданків. Тоді

$$T(x, 0) \approx \sum_{k=1}^N C_k \sin(kx) + \frac{x}{\pi} \quad (13)$$

Вираз (13), як вже було сказано, є лише наближенням до початкової умови. У зв'язку з цим вводиться так звана функція поправки $f_{err}(x)$. Тоді будемо мати:

$$T(x, 0) = \sum_{k=1}^N C_k \sin(kx) + \frac{x}{\pi} + f_{err}(x) \quad (14)$$

Тепер розглянемо двовимірну обернену задачу теплопровідності. Тут ситуація та сама.

Нехай є рівняння

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} \right) \quad (15)$$

Розв'язок рівняння знаходиться в області $\Omega: [0; L_x] \times [0; L_y]$. На границях задані, наприклад, нульові умови першого роду. Застосовуючи метод розділення змінних, будемо шукати розв'язок у вигляді $T(x, y, \tau) = F_1(x)F_2(y)F_3(t)$. Тоді отримаємо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} F_1(x) = \bar{C}_1 \cos \lambda_1 x + \bar{C}_2 \sin \lambda_1 x; \\ F_2(y) = \bar{C}_3 \cos \lambda_2 y + \bar{C}_4 \sin \lambda_2 y; \\ F_3(t) = \bar{C}_5 e^{-\lambda^2 t}, \quad \lambda^2 = a(\lambda_1^2 + \lambda_2^2). \end{cases}$$

Використавши граничні умови, отримаємо, що загальний розв'язок однорідної задачі буде мати вигляд:

$$F_3(t) = e^{-a \left(\left(\frac{\pi m}{L_x} \right)^2 + \left(\frac{\pi m}{L_y} \right)^2 \right) t} \quad (16)$$

$$T(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{\pi n x}{L_x} \sin \frac{\pi m y}{L_y} F_3(t)$$

Далі процедура аналогічна одновимірному випадку. Тепер вже функція поправки буде мати вигляд $f_{err}(x, y)$. Описаний метод тестувався на певних задачах. Слід відмітити, що описаний метод так само ефективний на задачах, у яких граничні умови змінюються в часі.

Практична частина. Розглянемо дві обернені задачі теплопровідності. *Перша задача* має наступну постановку:

$$J(\theta(x, y)) = \int_0^1 \int_0^1 (T(\theta, x, y, t_f) - \Theta(x, y))^2 dx dy \rightarrow \min, \quad (17)$$

де $T(\theta, x, t_f)$ – розв’язок задачі

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2},$$

$$(x, y) \in [0; 1]^2, t \in [0, t_f], t_f = 0.1, \quad (18)$$

$$T(x, y, 0) = \theta(x, y).$$

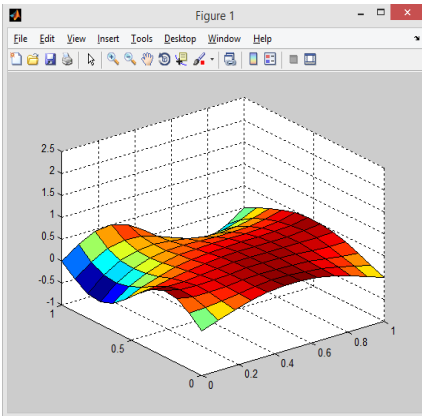
Граничні умови задачі мають наступний вигляд:

$$T(x, 0, t) = 0.5 \sin(\pi x), \quad T(x, 1, t) = 0.5 \sin(2\pi x),$$

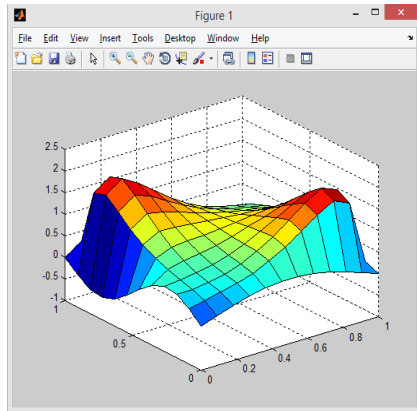
$$T(0, y, t) = 0.5 \sin(2\pi y), \quad T(1, y, t) = 0.5 \sin(\pi y). \quad (19)$$

Друга задача, на якій проводилось тестування розробленого методу відрізняється від першої тільки фінальним розподілом температури.

Нижче показані результати роботи методу на двох вищерозглянутих задачах.

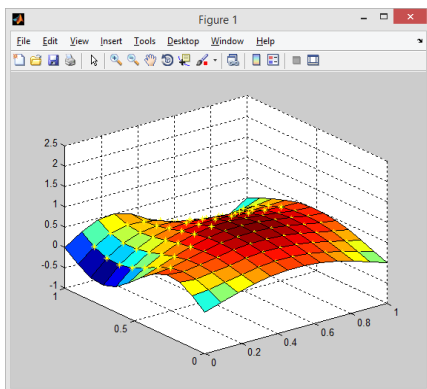


а) Розподіл температури у момент часу $t_f = 0.1$ для першої задачі

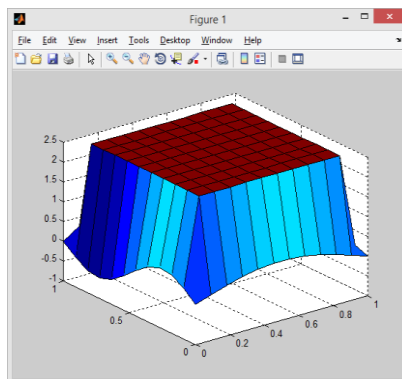


б) Відновлення початкової умови по заданому розподілу температури на рис.1.а

Рисунок 1 - Процес відновлення початкової умови першої задачі



а) Розподіл температури у момент часу $t_f = 0.1$ для другої задачі



б) Відновлення початкової умови по заданому розподілу температури на рис.2.а

Рисунок 2 - Процес відновлення початкової умови другої задачі

Висновки. Розроблений метод працює ефективно на задачах подібних до (2)-(4) та (17)-(19). Тестування цього методу було виконано на різних двовимірних задачах. Збіжність результатів досить хороша. Описаний метод досить швидко справляється з поставленим завданням. Основна її перевага полягає в тому, що для отримання бажаного результату, використовується дуже хороше наближення. Так само, певною перевагою методу є те, що кількість обчислень функції є вже не квадратично залежить від кількості вузлів сутки, як в методах типу Ньютона, а лінійно, що значно скорочує час обчислень.

Список літературних джерел

1. Engel. A MG Method for the Numerical Solution of Optimization Problems Constrained by PDE. 2009. – 40 p.
2. Engel. A Newton-Multigrid Method for PDE Constrained Optimization. 2009. – 72 p.
3. Isakov V., Inverse Problems for Partial Differential Equations. / V. Isakov. – USA.: Springer, 2005. – 40 p.
4. Klivanov M.V. Approximate Global Convergence and Adaptivity for Coefficient Inverse Problem. / M.V. Klivanov, L. Beilina. – USA.: Springer, 2012. – 407 p. ISBN 978-1-4419-7804-2.
5. Xin-She. Real-time PDE-constrained optimization. 2010. – 45 p.
6. Лаптев Г.И., Лаптев Г.Г. Уравнения математической физики. М.: 2003. – 82 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БАЗОВЫХ РЕЖИМОВ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВАНИИ КОМПРОМИССНЫХ РЕШЕНИЙ В МОДЕЛИ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ А.И. Швачка

Украинский государственный химико-технологический университет, Днепропетровск

ВВЕДЕНИЕ. Современные тенденции развития науки и техники характеризуются разработкой, внедрением и широким использованием компьютерных систем поддержки принятия решений, в основу которых положены методы математического моделирования.

В тоже время в развитие технологии доменного производства, решении проблем энергосбережения, повышения качества продукции требует совершенствования математических методов и моделей, современной расчетной базы, средств измерения и в целом высокого уровня автоматизации процесса доменной плавки, в том числе процессов сжатия в турбовоздуходувках, обогащения кислородом и нагрева дутья в воздухонагревателях и иных агрегатов и машин, обслуживающих печь [1, 2]. Необходимы надежные методы переработки информации для анализа и прогноза, для принятия решений и контроля их исполнения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. Основные тенденции ведения современной доменной плавки, связанные со снижением расхода кокса и топлива, нашли свое отражение в разработанной модели топливоиспользования [3, 4]. В качестве объекта исследования принята доменная печь №9 ПАО «АрселлорМиттал Кривой Рог». Рассмотрим постановку задачи топливоиспользования.

Целевая функция:

$$K(t_0, O_2, m, n) \rightarrow \min (P(t_0, O_2, m, n) \rightarrow \max, T_{yca}(t_0, O_2, m, n) \rightarrow \min), \quad (1)$$

где P – производительность печи, т чуг/час; K – удельный расход кокса, кг/т чуг; T_{yca} – удельный расход условного топлива, кг/т чуг; t_{0m} – температура дутья, °С; O_2 – содержание кислорода в дутье, %; m (n)- доля углерода природного газа (пылеугольного топлива) от общего количества углерода сгораемого на фурмах, д.е.

Ограничения на независимые переменные:

$$918 \text{ } ^\circ\text{C} < t_0 < 1200 \text{ } ^\circ\text{C}, 21\% < O_2 < 31\%, 0 < m < 0,18, 0 < n < 0,4 \quad (2)$$

Технологические ограничения $t_{kc} > 100 \text{ } ^\circ\text{C}$ $t_{kc} > 100 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$1800 \text{ } ^\circ\text{C} < T_{фз} < 2300 \text{ } ^\circ\text{C}, t_{kc} > 100 \text{ } ^\circ\text{C}, rd > 0 (K < 500 \text{ кг/м}^3 \text{ чуг}, P > 200 \text{ т чуг/час}), \quad (3)$$

где $T_{фз}$ – температура фурменной зоны, °С; t_{kc} – температура колошникового газа, °С; rd – степень прямого восстановления железа по А. М. Павлову, %

Необходимо оценить техническую возможность обеспечения экстремума основных показателей базового режима доменной плавке, в том числе: производительности, удельных расходов кокса и условного топлива и формирование на основании расчетов перспективных режимов плавки. Кроме того, представляет интерес оценки результатов моделирования при увеличении числа оптимизируемых величин, их взаимная корреляция, а также преемственность и установление основных тенденций при решении задачи множественного выбора (в дальнейшем, векторной оптимизации).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. Идеологию исследования основана на последовательном увеличении числа оптимизируемых величин а также использования результатов для целей управления.

Однокритериальная задача в классической постановке, сформулированная выше, была решена (табл. 1) с учетом современных тенденций топливо- и энергопотребления. Максимум производства определяется максимальной температурой фурменной зоны с учетом повышения температуры дутья и максимального содержания кислорода в дутье. Минимум удельного расхода кокса получено при минимальной температуре фурменной зоны и перераспределении состава топливных добавок, т.е. корректирующего вдувания природного газа при наращивании вдувания угольной пыли. Минимум расхода условного топлива характеризуется минимальной температурой фурменной зоны, что связано с минимальным содержанием кислорода в дутье, отсутствием природного газа при наличии угольной пыли. Полный отказ от использования природного газа в качестве топливной добавки (табл. 1, знаменатель) сопровождается ухудшением значением основных показателей процесса при сохранении на постоянном уровне / незначительном росте показателей теплового режима: коэффициент использования теплоты топлива, степень прямого восстановления. Введенные ограничения не повлияли на результаты решения задачи поиска минимума условного топлива.

Таблица 1 – Результаты расчета в однокритериальной оптимизационной задаче

Параметры дутья и показатели плавки	Критерии эффективности		
	$P \rightarrow \max$	$K \rightarrow \min$	$T_{\text{усл}} \rightarrow \min$
Оптимальные параметры комбинированного дутья			
$t_{\text{от}}, ^\circ\text{C}$	1200 / 1200	1200 / 1200	1200 / 1200
$O_2, \%$	31 / 31	29,5 / 21,13	21 / 21
$V_{\text{пз}}, \text{м}^3/\text{т чуг}$	0 / 0	115 / 0	0 / 0
$G_{\text{нпт}}, \text{кг}/\text{т чуг}$	138 / 128	151 / 132	69 / 69
Расчетные показатели доменной плавки			
$P, \text{т чуг}/\text{час}$	447 / 429	371 / 303	309 / 309
$K, \text{кг}/\text{т чуг}$	428 / 436	330 / 422	483 / 483
$T_{\text{усл}}, \text{кг}/\text{т чуг}$	582 / 579	641 / 570	558 / 558
$\eta, \text{д.е.}$	0,33 / 0,33	0,26 / 0,35	0,36 / 0,36
$rd, \%$	58,78 / 58,91	37,91 / 58,59	59,73 / 59,73
$t_{\text{кз}}, ^\circ\text{C}$	149 / 157	345 / 313	244 / 244
$T_{\text{фз}}, ^\circ\text{C}$	2300 / 2300	1800 / 2100	2300 / 2300

^{*)} $V_{\text{пз}}$ – удельный расход природного газа; $G_{\text{нпт}}$ – удельный расход пылеугольного топлива; η – коэффициент использования теплоты топлива; $T_{\text{фз}}$ – температура фурменной зоны; числитель / знаменатель – снижение потребления природного газа / отсутствие его вдувания.

Полученные решения задач с использованием классических оптимизационных процедур по одному критерию не могут быть обеспечены параметрами комбинированного дутья определенного рабочего номинала. Требования интенсификации и мобильности доменного производства определяет переход к задаче поиска оптимума в области двух и более параметров показателей процесса. Причем, полученные результаты оценки основных целевых функций необходимо рассматривать не как оптимальные, а как компромиссные, поскольку улучшение одного из показателей процесса связано с одновременным ухудшением иного и определяется использованием принципа Парето [5, 6] и рассмотрении бинарного отношения предпочтения в задаче векторной (многокритериальной) оптимизации.

В развитие информационного обеспечения ведения доменной плавки был применен алгоритм векторной оптимизации по двум показателям плавки:

$$(K, -P) \rightarrow \min \quad (4)$$

Для сравнения точек подозрительных по Парето был выполнен обход множества точек решения задачи векторной оптимизации с использованием понятие «конуса» [7]. Точки компромиссных решений (•, рис. 1) огибают область множества возможных решений в диапазоне варьирования параметров дутья со стороны экстремальных значений функций. Каждой точке анализируемой плоскости соответствует свой дутьевой режим. С точки зрения оптимальности данные точки конкурируют между собой исходя из текущих условий производства и обеспечения энергией и топливом. Полученные экспериментальные данные соответствуют статистической информации на объекте (рис. 2) и литературы [8].

Для определения рационального варианта принимаемого решения в задаче векторной оптимизации предложено анализировать экстремальный характер полученной кривой, а также экономическую целесообразность повышения производительности при заданном расходе кокса. Производительности $P=428$ т чуг/час будет достигнута при удельном расходе кокса $K=427$ кг/т чуг. Полученные данные корреспондируются с результатами поиска рационального режима при одном параметре эффективности [8].

Практическая целесообразность совместного рассмотрения основных показателей плавки в задаче векторной оптимизации заключается в возможности повышения производительности доменной плавки при одновременном снижении затрат по коксу и

топливу. Это определяет постановку задачи в области поиска «производительность – удельный расход кокса – удельный расход условного топлива»:

$$(K, -P, T) \rightarrow \min \quad (5)$$

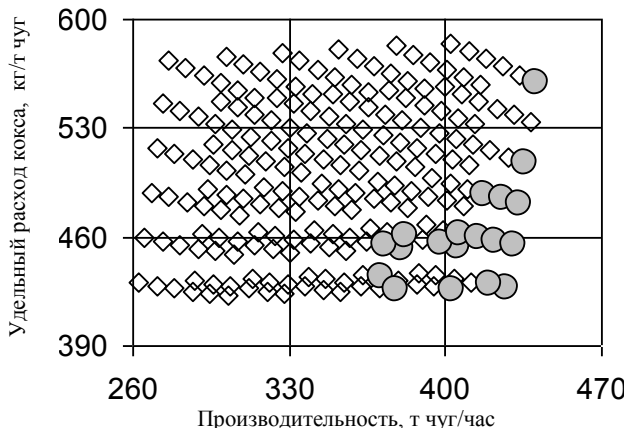


Рисунок 1 - Решение задачи векторной оптимизации в области поиска «удельный расход условного топлива - производительность»: \diamond - множество возможных решений, \bullet - компромиссные решения

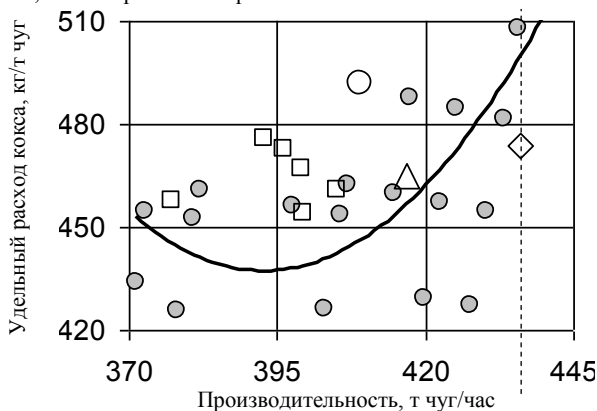
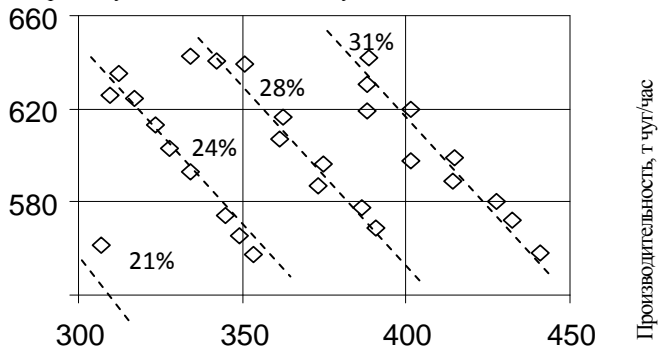


Рисунок 2 – Точки компромиссных решений в области поиска «удельный расход условного топлива - производительность»: \bullet - результаты вычислительного эксперимента; (—)- тоже, тенденция изменения; (---)-тоде, экстремальная тенденция производственные данные ДП№9 ПАО «АМКР»: \diamond - 1977 г., Δ - 1981 г., \square - (1985-1990)гг., \circ - 2007 г.

Превышение количества параметров поиска более двух, для которых необходимо оценить компромиссные решения, определяет множество решений в виде поверхности в пространстве. Это усложняет анализ полученных результатов, поэтому, принято решение перенести множество решений в пространстве на плоскость. Это усложняет анализ полученных результатов, поэтому, решение перенесено на плоскость искомым величин (рис. 3). Управление тепловым режимом плавки может быть выполнено на основании

представленной проекции (рис. 3а) по анализу соотношения используемых видов энергоресурсов с дальнейшим переходом на показатель производительности [9].

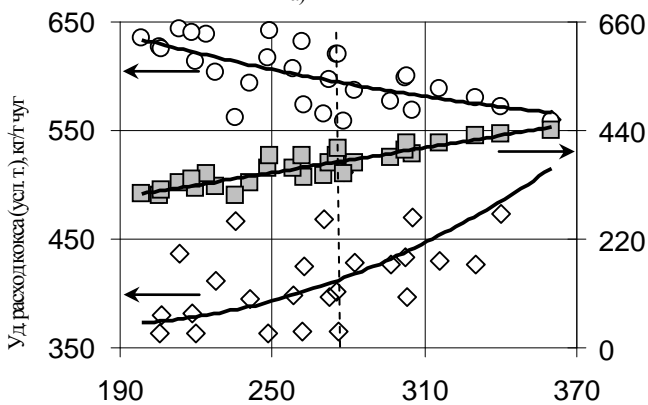
Уд. расход условного топлива, кг/т чугу



Производительность, т чугу/час

(---) – линия тенденций по содержанию кислорода в дутье

а)



Уд. расход кокса (уд. т.), кг/т чугу

Уд. расход условного топлива, кг/т чугу

Уд. расход кокса (уд. т.), кг/т чугу

Уд. расход условного топлива, кг/т чугу

Уд. расход кокса (уд. т.), кг/т чугу

Уд. расход условного топлива, кг/т чугу

Уд. расход кокса (уд. т.), кг/т чугу

Уд. расход условного топлива, кг/т чугу

Уд. расход кокса (уд. т.), кг/т чугу

Уд. расход условного топлива, кг/т чугу

Уд. расход кокса (уд. т.), кг/т чугу

Уд. расход условного топлива, кг/т чугу

Уд. расход кокса (уд. т.), кг/т чугу

Уд. расход условного топлива, кг/т чугу

Уд. расход кокса (уд. т.), кг/т чугу

Уд. расход условного топлива, кг/т чугу

Рисунок 3 – Характеристики решения задачи поиска компромиссных решений в области «производительность- уд. расход кокса – уд. расход условного топлива»

Рассмотрены точки компромиссных решений в плоскости параметра усвоенной тепловой мощности (рис. 3б) как характеристики теплового режима печи. Зависимость между производительностью и удельным расходом кокса (удельным расходом условного топлива) имеет более или менее выраженный экстремальный характер, определяющий повышение производительности до 402 т чугу/час с удельным расходом кокса (условного топлива) 364 кг/т чугу (619 кг/т чугу). Анализ дутьевого режим в задаче векторной

оптимизации «К-Р-Т» (рис. 3а) показал, что плотность расположения точек на плоскости (согласно рис. 2) определяется постоянной концентрацией кислорода в дуге.

Переход к задаче векторной оптимизации и повышения количества оптимизируемых величин определяет необходимость контроля полученных решений и их соответствия.

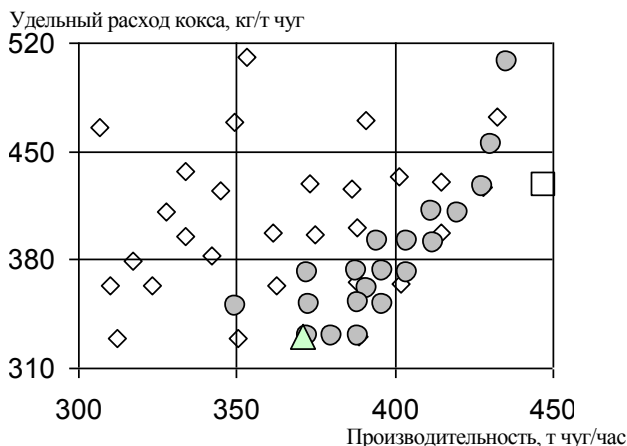


Рисунок 4 - Решение оптимизационной задачи в области поиска «удельный расход кокса - производительность»: \diamond - векторная оптимизация (K-P-T), \bullet - тоже (K-P), \blacktriangle - однокритериальная оптимизация (K), \blacksquare - тоже (P)

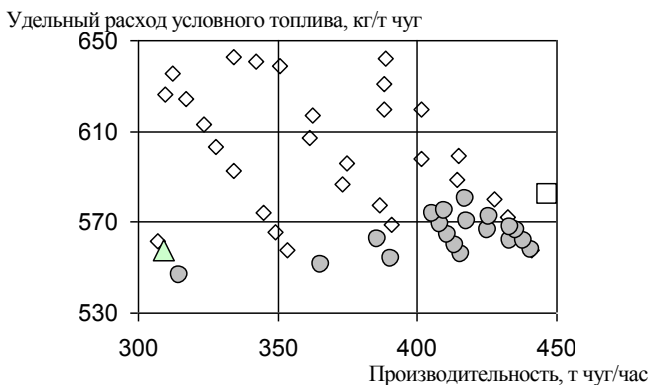


Рисунок 5 - Решение оптимизационной задачи в области «удельный расход условного топлива – удельный расход кокса»: \diamond - векторная оптимизация (K-P-T), \bullet - тоже (T-P), \blacktriangle - однокритериальная оптимизация (T), \blacksquare - тоже (P)

Анализ полученных результатов (рис. 4, 5) показал, что увеличение количества показателей плавки, требующих поиска компромиссного решения обуславливает переход в менее экономичную область ведения доменной плавки. Сужение количества оптимизируемых величин до двух (K-P, T-P) приводит к переходу области решений (\bullet) к границе области в выше рассмотренной задаче. Однокритериальная задача (\blacktriangle , \blacksquare) имеет более выраженное целевое назначение, поэтому область ее расположения на границе или пограничной области результатов двухкритериальной задачи.

ВЫВОДЫ 1. Получил развитие метод определения области компромиссных решений для показателей: производительность, удельный расход кокса, удельный расход условного топлива в условиях ДП №9 ПАО «АМКР» с учетом анализа решений при увеличении количества оптимизируемых величин, что отражается как на применяемых моделях, так и на общей методологии управления.

2. В задачах многокритериальной оптимизации абсолютно лучшее решение выбрать невозможно, так как при переходе от одного варианта к другому часто значения одних критериев улучшаются, а значения других ухудшаются. В связи с этим введена область компромиссов, где все решения равнозначны, а окончательный выбор решения связан с рассмотрением показателей процесса в плоскости показателя тепловой мощности и сопоставлением экстремальных тенденций кривых, соответствующих снижению потреблению топлива и кокса.

3. Задача множественного выбора позволила сделать вывод, что показатели плавки удовлетворительно коррелируются при увеличении числа целевых функций, причем снижение неопределенности по целям оптимизации обеспечивают более высокие показатели плавки. Проанализировав дутьевой режим точек компромиссных решений установлено, что отдельные тренды области решений соответствуют показателям плавки с постоянным содержанием кислорода в дутье.

4. Использование алгоритма решения задачи векторной оптимизации в составе АСУ ТП доменной печи позволяет дополнить информационно-управляющую систему доменного процесса формализованными методами поддержки выбора управляющих решений для обеспечения базовых режимов плавки, а также поиска перспективных режимов.

Список литературных источников

1. Бородулин А.В. Дома в энергетическом измерении [Текст] / А.В. Бородулин /, А.Д. Горбунов, В.И. Романенко, Г.И. Орел - Кривой Рог, 2004. - 436с.
2. Бородулин А.В. О научном обеспечении управляющих решений по сокращению энергоемкости производства черных металлов [Текст] / А.В. Бородулин, О.В. Дубина, В.И. Романенко [и др.] // *Металлургическая теплотехника. Сб. научных трудов Национальной металлургической академии Украины.* – Днепропетровск: НМетАУ, 2001. С.173 – 190.
3. А.Г. Байбуз, И.А. Лукьяненко, А.А. Сохачкий, А.Л. Чайка, А.И. Швачка. Об использовании методов математического программирования в расчетах показателей доменной плавки. Тр. III научно – практической конференции «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова». М.: МИСиС. 2006, с.136 – 141.
4. А.В. Бородулин, О.В. Дубина, И.А., Лукьяненко В.И., Романенко А.Л. Чайка, А.И. Швачка. О путях оптимизации параметров комбинированного дутья при выплавке чугуна. Тр. между. научно – техн. конференции «Пылевидное топливо – альтернатива природному газу при выплавке чугуна Донецк: УНИТЕХ. 2006. с. 193 – 207.
5. В.Д. Ногин. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. М.: Физмат, 2002.- 144с.
6. И.М. Макаров, Т.М. Винорадов, А.А. Рубинский, В.Б. Соколов. Теория выбора и принятия решений. – М.: Наука, 1982.- 327с.
7. Поиск компромиссных решений по управлению при нескольких критериях качества / А.И. Швачка, Е.В. Лещенко // *Гірнична електромеханіка та автоматика.* –Вып. 89. – С. 66 – 71.
8. Развитие информационной базы принятия управляющих решений по ведению доменной плавки / А. И. Швачка, А. Л. Чайка, Зайцев В.Г. // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии.* – 2012. – Вып. 26. – С. 52–61.
9. Развитие информационных методов по управлению тепловым режимом доменной плавки / А.И. Швачка, А.Л. Чайка, В.Г. Зайцев, А.Г. Шевелев, А.В. Бородулин // *Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в металлургии и машиностроении» (24-26 марта 2015 г.) – Д., 2015.- С. 79.*

МАТЕРІАЛИ
I Всеукраїнської науково-технічної конференції
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА
ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ
I ЧАСТИНА

Шеф-редактор:
Комп'ютерна верстка
та коректура:

д.т.н., проф. Зеленцов Д.Г.

к.т.н., доц. Науменко Н.Ю.

к.т.н., доц. Коротка Л.І.