

*М.А. Гамов, В.М. Задорский*

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННОЙ ПРОПИТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

ДВНЗ “Украинский государственный химико-технологический университет”, г. Днепр

Выполнен полный факторный эксперимент процесса капиллярно-пористой обработки капилляров, на примере пропитки топливных гранул (пеллет) мискантуса растительными маслами. Получены результаты оптимальных параметров процесса пропитки пеллет. Проведен анализ основных стадий традиционного технологического процесса обработки капиллярно – пористых тел жидкостью и показано, что лимитирующей, определяющей общую скорость процессов экстрагирования, выщелачивания и пропитки являются две, протекающие непосредственно в капиллярах/порах, синергетически совмещенные стадии – относительно медленное удаление из капилляров воздуха за счет молекулярной диффузии и по мере удаления воздуха замещение его жидкостью за счет капиллярных сил. Отмечено сильное взаимное влияние этих совмещенных стадий. При помощи программы PlanExp V-D13 – программа для обработки данных трехфакторных планированных экспериментов, выполнено построение диаграммы линий равного уровня и обнаружены точки экстремума.

**Ключевые слова:** пропитка, перегретый пар, диффузия, экстрагент, лимитирующая стадия, синергия.

Известно [1–13], что исследователи выделяют следующие факторы, влияющие на качество пропитки: пористость, размеры и форма пор, шероховатость, влажность капиллярно-пористого тела; поверхностное натяжение, вязкость, краевой угол смачивания пропиточной жидкости; состав и парциальные давления паров, сжимаемость, растворимость, дисперсность, диффузионная и реакционная способность входящих в пропиточную жидкость компонентов и др. В связи с этим, целесообразно использовать математическое моделирование пропитки и использование математической модели в качестве имитационной с целью определения оптимальных условий протекания процесса и управления им, а также для переноса результатов расчетов на реальный объект. В ранее опубликованных нами работах [1–4] указывается, что при использовании эффекта конденсации, перегретого пара увеличивается полнота пропитки, однако этот эффект пока мало изучен. Существующие математические модели пропитки не отражают влияние на процесс многих факторов, не всегда соответствуют реально получаемым на практике результатам. В таких случаях целесообразно использование методики факторного эксперимента. Сущность факторного эксперимента состоит в одновременном варьировании

всех факторов объекта исследования по определенному плану, представлении математической модели в виде линейного полинома и исследовании последнего методами математической статистики, что значительно экономит экспериментатору время и ресурсы.

Целью данной работы является получение математического описания процесса и оптимизация конденсационной пропитки путем реализации полного факторного эксперимента, а также получение оптимальных параметров процесса пропитки на примере пеллет мискантуса [5].

В качестве материала для пропитки были выбраны топливные гранулы (пеллеты) – биотопливо, получаемое из торфа, древесных отходов и отходов сельского хозяйства, которые представляют собой цилиндрические гранулы стандартного размера. В нашем случае пеллеты были выбраны из биотопливной культуры мискантус. Для исследования и эксперимента нами были использованы пеллеты из мискантуса, любезно присланные нам нашими партнерами в Англии, которые непосредственно занимаются их производством. Пеллеты из мискантуса оказались более однородными по структуре и пористости в сравнении с пеллетами из шелухи подсолнечника или опилок. Это триплоидное стерильное растение, которое выращивается не

инвазивным способом, а именно путем посадки его корневищ (ризомов). Стебли этой уникальной травы могут достигать 4–5 метров в высоту при диаметре до 2–3 см. В сухом виде их собирают после вызревания, в период с февраля по март, когда содержание влаги становится менее 17%. Мискантус имеет множество применений: в первую очередь как альтернативный источник энергии – твёрдое биотопливо. Также его применяют в качестве строительного материала, для производства целлюлозы, в животноводстве и др.

Плотность нарезанного мискантуса составляет около 150 кг/м<sup>3</sup>, а плотность гранулированного мискантуса составляет около 600 кг/м<sup>3</sup>. Такие гранулы легче хранить и транспортировать.

Энергетическая ценность сжигания биомассы мискантуса по сравнению с другими видами топлива (табл. 1) [6].

Таблица 1

Сравнение энергетической стоимости материалов

Материал для получения энергии	Энергетическая стоимость, МДж/кг
Мазут	41,0
Каменный уголь	27,0–30,0
Бурый уголь	27,0
Кора	19,5
Древесина тополя	18,7
Мискантус	17,0–19,0
Солома	17,0
Сухой торф	14,7

Проведенный нами предварительный анализ возможных источников веществ для пропитки с учетом физико-химических и экономических показателей показал, что пропитку можно осуществлять отработанным растительным маслом; отработанным автомобильным, трансформаторным маслом; мазутом, специальными составами для пропитки и др. Это должно помочь устранить один из основных недостатков пеллет – низкую удельную весовую теплотворную способность.

Для чистоты эксперимента в качестве наполнителя капилляров нами было выбрано подсолнечное масло, так как оно имеет отличный показатель теплоты сгорания – 39,5 МДж/кг. Для ускорения скорости высыхания масла в капиллярах и порах использовался сиккатив резинат марганца – неорганические соединения, соли марганца и смоляных кислот с формулой  $Mn(C_{19}H_{29}COO)_2$ , светло-коричневое вещество, не растворимое в воде. Количество сиккатива составляло 3–5% от массы продукта [7].

На начальной стадии планирования экспе-

римента с учетом поставленных целей были отобраны независимые переменные (факторы), которые в дальнейшем будут использоваться в эксперименте. Факторы выбираются на основе анализа априорной информации, что требует использования различных методов систематизации полученных знаний. Для решения задачи такого рода были использованы методы экспертной оценки [8]. Эти методы основаны на получении и обработке данных, полученных в результате опроса специалистов. На основе всего вышеперечисленного, литературных данных, использования экспертной ранжировки факторов и предварительного эксперимента в план эксперимента включены следующие факторы:  $X_1$  – температура перегретого пара, °С;  $X_2$  – масса подаваемого перегретого пара, г/с;  $X_3$  – время пропитки, с.

В качестве переменной состояния выбран показатель «относительный привес образца после конденсационной пропитки».

Растительное масло в своём естественном виде, даже при большом содержании линоленовой кислоты, высыхает чрезвычайно медленно. Для сокращения времени высыхания масла, нами был добавлен в него сиккатив в объеме 3–5% от массы масла, что обеспечивает более быстрое высыхание.

Эксперименты по конденсационной пропитке проводились на лабораторной установке (рис. 1), Лабораторная установка состоит из пропиточной камеры, обмотанной проволокой из нихрома диаметром  $d=0,7$  мм 1, цилиндрической формы, со съёмной крышкой на резьбовом соединении 2, патрубками для ввода и вывода перегретого водяного пара и подачи пропиточной жидкости. Во внутренней части установки устанавливаются полка с отверстиями для размещения образцов, которые пропитываются. Установку обеспечивают также парогенератором 3, пароперегревателем 4, краном для регулирования расхода пара 5, ЛАТР 6, с помощью которого регулируют температуру, краном 9 для слива пропитывающей жидкости. В пропиточную камеру 1 помещают образец нагревают его выше температуры конденсации. В парогенераторе подогревают воду до температуры кипения. Водяной пар проходит через пароперегреватель, на выходе из которого с помощью термодомы измеряют температуру перегретого пара. Перегретый пар поступает в пропиточную камеру через патрубок. После обработки образца в течение заданного времени, перекрывают подачу пара 7 и через кран 8 подают пропиточную жидкость в камеру до полного заполнения образца. На этой стадии повторяется необходимое количество циклов до момента максимального заполнения капилляров. Экспериментально было предвари-

тельно показано, что оптимальное отношение времени обработки пропитываемого образца паром к времени заполнения камеры пропиточной жидкостью составляет примерно 4. После пропитки в течение заданного времени, жидкость сливают через нижний кран 9.

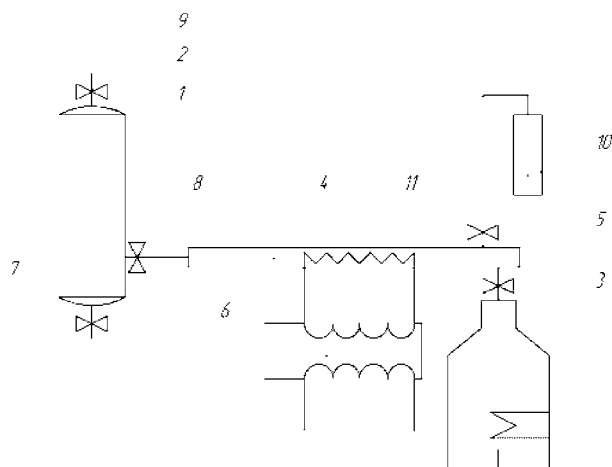


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

**Постановка задачи оптимизации**

Найти условия конденсационной пропитки, которые обеспечили бы максимальный привес пропитываемого образца при определенных ограничениях на факторы. Математически это можно выразить в виде получения математической модели:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3, \quad (1)$$

$y$  – выходная переменная;  $b_0, \dots, b_i$  – коэффициенты в линейном уравнении регрессии;  $x_i$  – факторы.

*Оценка области определения факторов*

Итак, в качестве пропиточной жидкости использовалось растительное отработанное масло с добавлением сиккатива. В качестве пористых тел использовались pellets из мискантуса. Для всех факторов по результатам предваритель-

ного эксперимента и литературным данным [9] была принята следующая область существования факторов:

$$110 \leq X_1 \leq 140^\circ\text{C};$$

$$30 \leq X_2 \leq 60, \text{ г/с};$$

$$30 \leq X_3 \leq 90, \text{ с}.$$

*Выбор нулевых уровней*

Предполагается центр плана поместить в точку с координатами:

$$X_{10} - 125^\circ\text{C};$$

$$X_{20} - 45 \text{ г/с};$$

$$X_{30} - 60 \text{ с}.$$

*Выбор интервалов варьирования факторов*

Для реализации этого этапа планирования эксперимента в факторном пространстве выбирается область проведения эксперимента со следующими интервалами варьирования относительно нулевых уровней:

$$\Delta X_1 = 15^\circ\text{C};$$

$$\Delta X_2 = 15 \text{ г/с};$$

$$\Delta X_3 = 30 \text{ с}.$$

*Построение матрицы планирования эксперимента*

Постановка задачи требует получения линейной математической модели. Воспользуемся полным факторным экспериментом типа ПФЭ  $2^3$  – планирование двухуровневое (три фактора, 8 опытов, два параллельных опыта в одной точке (табл. 2)).

От систем координат  $z_1, \dots, z_k$  необходимо перейти к новой безразмерной системе координат  $x_1, \dots, x_k$  с помощью линейного преобразования:

Таблица 2

**Матрица планирования эксперимента и результаты расчетов**

Номер опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат				Выходной Параметр $y$	Прибавка массы в % $y\%$
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$		
1	140	60	90	+1	+1	+1	+1	2,39	23,0
2	110	60	90	+1	-1	+1	+1	1,86	18,0
3	140	30	90	+1	+1	-1	+1	1,73	16,5
4	110	30	90	+1	-1	-1	+1	1,78	17,0
5	140	60	30	+1	+1	+1	-1	1,40	14,0
6	110	60	30	+1	-1	+1	-1	1,49	14,5
7	140	30	30	+1	+1	-1	-1	1,35	13,0
8	110	30	30	+1	-1	-1	-1	0,93	9,0

$$x_i = \frac{z_i - z_i^0}{\Delta z_i}, \quad (2)$$

где  $i=1,2,3,\dots,k$ .

В безразмерной системе координат верхний уровень  $+1$ , нижний уровень  $-1$ , координаты центра равны нулю и совпадают с началом координат.

$s_0^2=0,94$  ошибка опыта по четырем опытам в одной точке:

$$z_1^0 = \frac{140+110}{2} = 125, \quad z_2^0 = \frac{60+30}{2} = 45,$$

$$z_3^0 = \frac{30+90}{2} = 60;$$

$$\Delta z_1 = \frac{140-110}{2} = 15, \quad \Delta z_2 = \frac{60-30}{2} = 15,$$

$$\Delta z_3 = \frac{90-30}{2} = 30.$$

Проверка показала, что экспериментальные данные являются нормально распределенными и однородными. Прирост теплотворной способности пропитанных пеллет указан в табл. 3.

Таблица 3  
Сравнение теплотворной способности

№ опыта	Теплотворная способность не пропитанных пеллет МДж/кг	Теплотворная способность пропитанных пеллет МДж/кг
1	19	28
2		26,11
3		25,51
4		25,72
5		24,53
6		24,73
7		24,14
8		22,56

Рассчитаем линейные коэффициенты регрессии в уравнении (1) по формуле

$$b_0 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 y_i = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 2,39+1,86+1,73+ \\ +1,78+1,4+1,49+ \\ +1,35+0,93 \end{pmatrix} = 1,616;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 \cdot 2,39 - 1 \cdot 1,86 + 1 \cdot 1,73 - \\ -1 \cdot 1,78 + 1 \cdot 1,4 - 1 \cdot 1,49 + \\ +1 \cdot 1,35 - 1 \cdot 0,93 \end{pmatrix} = 0,101;$$

$$b_2 = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 \cdot 2,39 + 1 \cdot 1,86 - 1 \cdot 1,73 - \\ -1 \cdot 1,78 + 1 \cdot 1,4 + 1 \cdot 1,49 - \\ -1 \cdot 1,35 - 1 \cdot 0,93 \end{pmatrix} = 0,168;$$

$$b_3 = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 \cdot 2,39 + 1 \cdot 1,86 + 1 \cdot 1,73 + \\ +1 \cdot 1,78 - 1 \cdot 1,4 - 1 \cdot 1,49 - \\ -1 \cdot 1,35 - 1 \cdot 0,93 \end{pmatrix} = 0,323.$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии

Для оценки влияния каждого из факторов на переменную состояния используют проверку значимости каждого коэффициента двумя равноценными способами [10].

Найдем сначала дисперсию коэффициентов регрессии по формуле

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_0^2}{N}; \quad (3)$$

$$s_{b_i}^2 = \frac{0,94}{8} = 0,1175;$$

$$s_{b_i} = \sqrt{s_{b_i}^2} = \sqrt{0,1175} = 0,3427,$$

где  $s_0^2$  – ошибка опыта (дисперсия воспроизводимости);  $s_{b_i}^2$  – дисперсии коэффициентов;  $s_{b_i}$  – среднее квадратичное отклонение.

По первому способу оценку значимости коэффициентов выполняют по формуле:

$$t_{i_p} = \frac{|b_i|}{s_{b_i}}, \quad (4)$$

где  $t_{i_p}$  – расчетное значение критерия Стьюдента;  $|b_i|$  – абсолютное значение  $i$ -го коэффициента регрессии, и условию:

$$t_{i_p} > t_T, \quad (5)$$

где  $s_{b_i}$  – среднее квадратичное отклонение  $b_i$ ;  $t_T$  – табличное значение критерия Стьюдента [11], которое находят по числу степеней свободы  $f_0=N_0-1$  и уровню значимости  $q$ .

По второму способу для проверки значимости коэффициентов регрессии используют доверительный интервал  $\Delta b_i$ , который, вследствие равенства  $s_{b_i}^2$  для всех коэффициентов, одинаков для всех  $b_i$ :

$$\Delta b_i = \pm t_T \cdot s_{b_i}. \quad (6)$$

Тогда значимость оценивают, сравнивая абсолютные значения коэффициента и доверительного интервала:

$$|b_i| > |\Delta b_i|. \quad (7)$$

Если выполняются условия (5) и (7), то  $i$ -й коэффициент признается значимым.

При уровне значимости  $q=0,05$  и  $f_0=4-1=3$  табличное значение критерия Стьюдента  $t_T=3,18$ .

Проверим значимость коэффициентов регрессии по двум способам, результаты расчетов сведем в табл. 4.

Таблица 4

**Результаты расчетов**

$t_T=3,18$	$\Delta b_i=3,18 \cdot 0,2424=0,771$
$t_{0_p} = \frac{1,616}{0,3427} = 3,384$	$b_0=1,616$
$t_{1_p} = \frac{0,101}{0,3427} = 0,294$	$b_1=0,101$
$t_{2_p} = \frac{0,168}{0,3427} = 0,49$	$b_2=0,168$
$t_{3_p} = \frac{0,323}{0,3427} = 0,942$	$b_3=0,323$

Из табл. 4 видно, что для коэффициентов  $b_1$  (температура пара) и  $b_2$  (масса подаваемого пара) не выполняются условия (5) и (7) ( $t_{1_p} < 3,18$  и  $t_{2_p} < 3,18$ ,  $|b_1| < 0,771$  и  $|b_2| < 0,771$ ) следовательно  $b_1$  и  $b_2$  являются незначимыми. Однако, по априорным сведениям, температура пара и масса подаваемого пара имеют влияние на полноту пропитки [12], поэтому оставим их в числе значимых факторов.

*Проверка адекватности линейного уравнения регрессии*

Адекватность проверяют, оценивая отношение дисперсии адекватности к дисперсии воспроизводимости по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_0^2}, \quad (8)$$

где  $F_p$  – расчетное значение критерия Фишера;  $s_{ад}^2$  – дисперсия адекватности;  $s_0^2$  – дисперсия воспроизводимости (ошибка опыта).

Линейное уравнение признается адекватным при выполнении условия:

$$F_p < F_T, \quad (9)$$

где  $F_T$  – табличное значение критерия Фишера для степеней свободы  $f_{ад}=N-l$ ,  $f_0=N_0-l$  и уровня значимости  $q=0,05$ .

Дисперсию адекватности рассчитаем по результатам последнего столбца табл. 2 и формуле:

$$s_{ад}^2 = \frac{m}{(N-l)} \sum_{u=1}^N (y_u - \tilde{y}_u)^2, \quad (10)$$

где  $m$  – число параллельных опытов;  $N$  – число строк матрицы планирования;  $l$  – число членов в уравнении регрессии, оставшихся после оценки значимости.

Тогда после подстановки значений в формулу (10) имеем:

$$s_{ад}^2 = \frac{1}{(8-5)} \cdot 34,3284 = 3,12.$$

Расчетное значение критерия Фишера по формуле (8):

$$F_p = \frac{3,12}{0,94} = 3,32.$$

Табличное значение критерия Фишера  $F_T=8,74$  для  $f_{ад}=N-l=16-5$ ,  $f_0=N-l=4-1$  и  $q=0,05$  [13].

Таким образом, условие (9) выполняется, следовательно, полученное линейное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные. Также для проверки адекватности линейной модели всегда рассчитывают коэффициенты взаимодействий факторов, значимость хотя бы одного из которых позволяет сделать вывод о неадекватности линейной модели.

Для нахождения коэффициентов при взаимодействиях факторов план ПФЭ дополняют столбцами, представляющими собой произведения столбцов соответствующих факторов. Для нашего случая матрица планирования с учетом эффекта взаимодействия представлена в табл. 4. Коэффициенты взаимодействия  $b_{ij}$  рассчитывают по формуле:

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u, \quad (i \neq j), \quad (11)$$

и проверяют значимость коэффициентов взаимодействия.

Рассчитаем коэффициенты парного взаимодействия. Для этого составим дополнительную таблицу (табл. 5).

Коэффициенты рассчитаем по формулам:

$$b_{12} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_1 x_2 y_i = \frac{1}{8} \left( 1 \cdot 2,39 - 1 \cdot 1,86 - 1 \cdot 1,73 + 1 \cdot 1,78 + \right. \\ \left. + 1 \cdot 1,4 - 1 \cdot 1,49 - 1 \cdot 1,35 + 1 \cdot 0,93 \right) = 0,00875;$$

$$b_{13} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_1 x_3 y_i = \frac{1}{8} (1 \cdot 2,39 - 1 \cdot 1,86 + 1 \cdot 1,73 - 1 \cdot 1,78 - (-1 \cdot 1,4 + 1 \cdot 1,49 - 1 \cdot 1,35 + 1 \cdot 0,93)) = 0,01875;$$

$$b_{23} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_2 x_3 y_i = \frac{1}{8} (1 \cdot 2,39 + 1 \cdot 1,86 - 1 \cdot 1,73 - 1 \cdot 1,78 - (-1 \cdot 1,4 - 1 \cdot 1,49 + 1 \cdot 1,35 + 1 \cdot 0,93)) = 0,01625;$$

$$b_{123} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_1 x_2 x_3 y_i = \frac{1}{8} (1 \cdot 2,39 - 1 \cdot 1,86 - 1 \cdot 1,73 + 1 \cdot 1,78 - (-1 \cdot 1,4 + 1 \cdot 1,49 + 1 \cdot 1,35 - 1 \cdot 0,93)) = 0,13625.$$

Таблица 5  
Коэффициенты парного взаимодействия

Номер опыта	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	y
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	2,39
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	1,86
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	1,73
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1,78
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	1,40
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	1,49
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	1,35
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	0,93

Полученное уравнение регрессии, полученное при проведении планирования эксперимента для трех факторов:

$$y(x_1, x_2, x_3) = 1,616 + 0,101x_1 + 0,168x_2 + 0,323x_3 + 0,00875x_1x_2 + 0,01875x_1x_3 + 0,01625x_2x_3 + 0,13625 \cdot x_1x_2x_3. \quad (12)$$

Проверка значимости коэффициентов, проведенная по критерию Стьюдента с использованием параллельных опытов, показана значимость всех коэффициентов полученного уравнения. Проверка адекватности уравнения осуществлялась с использованием критерия Фишера.

При помощи программы PlanExp B-D13 – программа для обработки данных трехфакторных планированных экспериментов, выполнено построение диаграммы линий равного уровня и обнаружены точки экстремума. Графическое интерпретация математической модели про-

цесса (12) представлена на рис. 2. Из графика видно, что все факторы, использованные в факторном эксперименте находятся выше уровня шумов эксперимента. Анализируя график приходим к выводу, что наиболее значимым в выбранной области параметров является время проведения процесса пропитки. Менее значимы в порядке убывания являются расход пара и температура перегретого пара. Время пропитки в сочетании с другими факторами также оказывает наибольшее влияние на глубину пропитки. Зависимости между факторами и функцией отклика прямо пропорциональны.

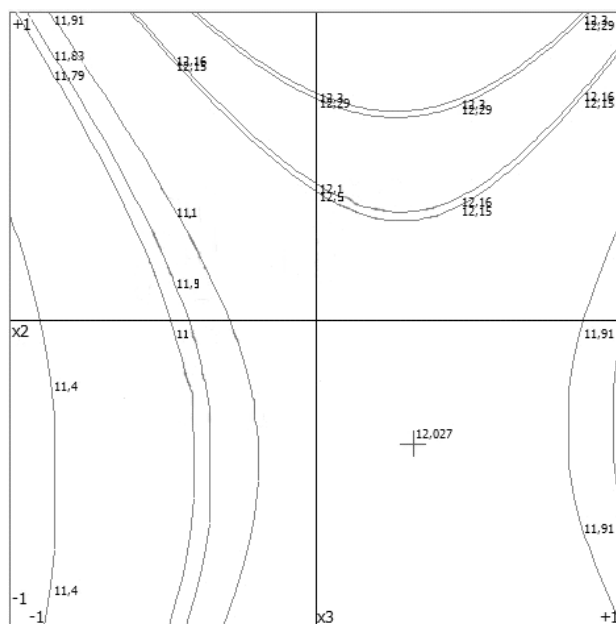


Рис. 2. Контурные кривые функции отклика области оптимума, описываемой уравнением второго порядка

Для целей оптимизации исследуемого объекта, который описывается уравнением второго порядка, существует преобразование, позволяющее получить графическую интерпретацию области оптимума. Упомянутое преобразование называется каноническим.

В нашем случае на рис. 2 показано, что коэффициенты  $B_{11}$  и  $B_{22}$  имеют разные знаки; контурные кривые в этом случае являются гиперболами; центр фигуры называется «седлом» или «минимаксом»; в зависимости от соотношения абсолютных значений коэффициентов  $B_{11}$  и  $B_{22}$  изменение выходной переменной по осям  $X_1, X_2$  будет различным.

Экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Значение экстремума составляет  $Y_{opt} = 12,027$ . Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов:  $x_2 = -0,407$  (167,79) и  $x_3 = 0,317$

(69,51) при  $x_1=0$  (125).

Также был выполнен регрессионный анализ данных (табл. 6), и дисперсионный анализ данных (табл. 7) с помощью программы Microsoft Excel:

Таблица 6

**Регрессионный анализ**

Показатель	Значение
Множественный R	0,943562
R-квадрат	0,890309
Нормированный R-квадрат	0,808040
Стандартная ошибка	1,794088
Наблюдения	8

Таблица 7

**Дисперсионный анализ**

Источник вариации	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	3	104,5	34,833	10,822006	0,021718
Остаток	4	12,88	3,2188	—	—
Итого	7	117,4	—	—	—

Результатом эксперимента является определение оптимальных параметров пропитки мискантуса растительными маслами. Такими являются факторы эксперимента № 1, температура перегретого пара 140°C; масса подаваемого пара 60 г/с; время пропитки 90 с. При данных параметрах удается достичь увеличение массы пеллеты на 23–25%, при этом сохраняя стабильный режим работы установки, увеличение полноты заполнения капилляров до 90%, уменьшение времени пропитки с 24 ч до 90 с [9], что позволяет увеличить скорость производства пропитанных пеллет в 1440 раз при достижении примерно той же полноты пропитки. Найдена возможность использования вторичного сырья для пропитки пеллет. Таким сырьем может быть отработанные масла пищевых производств, трансформаторное масло, автомобильное масло, мазут и т.п. Решена проблема утечки масла после пропитки, путем добавления сиккатива и обработки теплым воздухом в конце последнего цикла обработки. Увеличение калорийности пеллеты более чем на 23%, тем самым обеспечивает увеличение продолжительности горения закладки, что позволит уменьшить количество циклов загрузки пеллеты по сравнению с использованием традиционных пеллет, увеличение энергетической калорийности пеллет до 27–29 МДж/кг пропитанных пеллет, что можно сравнить с калорийностью каменного угля. Пропитанные по новой технологии пеллеты уменьшают процент зольности в соотношении с маской продукта.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Gamov M.A., Zadorsky V.M. Synergetic Basis Tools and Methods of Process Control in Capillary-Porous Materials // Journal Scientific Israel-Technological Advantages. – Migdal HaEmek, Israel. – 2.16. – Vol.18. – № 2. – P.3-9.
2. Гамов М.А., Задорский В.М. Синергические основы средств и методов обеспечения устойчивого развития технических систем – Научно-издательская деятельность института прогрессивных исследований в Араде (ИПИ). Израиль. 2016. <http://ipi-science.net/articlesVForm.aspx>
3. Заявка а 2016 1600189 Украина, МПК (2015.12) B05D 3/00, B29B 15/10, B05D 1/18. Спосіб обробки капілярно-порозних тіл рідинами / Гамов М.А., Задорський В.М.; заявник та патентовласник ДВНЗ УДХТУ. – № а 2016 1600189; заявл. 11.01.16].
4. Гамов М.А., Задорский В.М. Математическое моделирование конденсационной пропитки капиллярно пористых тел // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2016: Сборник научных трудов междунар. конф. – Днепр. – 2016. – 192-203 с.
5. Бондарь А.Г., Статюха Г.А. Планирование эксперимента в химической технологии (основные положения и задачи). – К.: Вища школа, 1976. – 182 с.
6. Андреев Л.А. Физикохимия поверхностных явлений. Пропитка пористых материалов: учеб. пособие. – М.: Издат. дом МИСиС. – 2011. – 117 с.
7. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.И. Коллоидная химия. – СПб: Изд-во Лань, 2003. – 336 с.
8. Тарасов Р.В, Макарова Л.В., Акжигитова О.Ф. К вопросу применения экспертных методов в прогнозировании процессов, оценке уровня качества и принятии управленческих решений // Современные научные исследования и инновации. – 2014. – № 4. – [Электронный ресурс]. URL:<http://web.snauka.ru/issues/2014/04/33142>.
9. Аксельруд Г.А., Альтшуллер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию. – Химия, 1983. – 264 с.
10. Кононюк А.Е. Основы научных исследований (общая теория эксперимента) К.3: Монография. – Киев, 2011. – 456 с.
11. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. – М.: Химия, 1982. – 320 с.
12. Воюцкий С.С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых материалов дисперсиями полимеров. – Л.: Химия, 1969. – 336 с.
13. Грибанова Е.В., Молчанова А.И. Исследование зависимости угла смачивания от скорости движения мениска // Колл. журн. – 1978. – Т.40. – № 2. – С.217-223.

Поступила в редакцию 28.02.2017

STUDY OF CONDENSATION IMPREGNATION USING A FULL FACTORIAL EXPERIMENT

M.A. Gamov, V.M. Zadorsky

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

A full factorial experiment for the process of capillary-porous treatment of capillaries was made by the example of impregnation of fuel granules (pellets) of miscanthus with vegetable oils. The data on optimal parameters of pellets impregnation process were obtained. The analysis of the main stages of the traditional process of the treatment of capillary-porous materials by fluid was performed. It was shown there are two limiting, synergistically combined stages, which determine the overall rate of the extraction, leaching and impregnating process. These stages occur directly in capillaries and pores; they are a relatively slow removal of air from the capillary due to molecular diffusion and a replacement of air by liquid due to capillary forces when air being removed. These combined stages strongly influence each other. The construction of equal level line chart was carried out and the points of extremum were found using the software PlanExp B-D13, a program for processing the planned three-factor experiments.

**Keywords:** impregnation; superheated steam; diffusion; extractant; limiting stage; synergy.

REFERENCES

1. Gamov M.A., Zadorsky V.M. Synergetic basis tools and methods of process control in capillary-porous materials. *Scientific Israel—Technological Advantages*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 3-9.
2. Gamov M.A., Zadorsky V.M., Sinergicheskie osnovy sredstv i metodov obespecheniya ustoichivogo razvitiya tekhnicheskikh sistem [Synergetic fundamentals of means and methods to ensure sustainable development of technical systems]. *Proceedings of the conference «Research in the field of applied sciences – 2016»*. Israel, 2016. Available at: <http://ipi-science.net/articlesVForm.aspx>. (in Russian).
3. Gamov M.A., Zadorsky V.M., Sposib obrobky kapilyarno-porozhnikh til ridynami [Method of processing capillary severally materials by fluids]. Patent Application UA, no. 2016 1600189, 2016. (in Ukrainian).
4. Gamov M.A., Zadorsky V.M., Matematicheskoe modelirovaniye kondensatsionnoi propitki kapilyarno-poristykh tel [Mathematical modeling of condensation infiltration of capillary-porous materials]. *Proceedings of the international conference «Modern innovative technologies training of engineers for the mining industry and transport in 2016»*. Ukraine, Dnipro, 2016, pp. 192-203. (in Russian).
5. Bondar' A.G., Statyukha G.A., *Planirovanie eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii* [Scheduling experiment in chemical technology]. Vyscha Shkola, Kyiv, 1976. 182 p. (in Russian).
6. Andreev L.A., *Fizikokhimiya poverkhnostnykh yavlenii. Propitka poristykh materialov* [Physical chemistry of surface phenomena. Impregnation of porous materials]. Benefit Publishers, Moscow, 2011. 117 p. (in Russian).
7. Gel'fman M.I., Kavalevich O.V., Yustratov V.I., *Kolloidnaya khimiya* [Colloid chemistry]. Lan' Publishers, St. Petersburg, 2003. 336 p. (in Russian).
8. Tarasov R.V., Makarova L.V., Akzhigitova O.F. K voprosu primeneniya ekspertnykh metodov v prognozirovanii processov, otsenke urovnya kachestva i prinyatii upravlencheskikh reshenii [On the question of the application of expert methods in the forecasting process, assessing the quality and level of management decisions]. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Innovatsii*, 2014, no. 4. Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2014/04/33142>. (in Russian).
9. Akselrud G.A., Altshuler M.A., *Vvedenie v kapilyarno-khimicheskuyu tekhnologiyu* [Introduction to capillary-chemical technology]. Khimiya, Moscow, 1983. 264 p. (in Russian).
10. Kononyuk A.E., *Osnovy nauchnykh issledovaniy (obshchaya teoriya eksperimenta)* [Fundamentals of scientific research: general theory of the experiment]. Monograph Publishers, Kyiv, 2011. 456 p. (in Russian).
11. Heifetz L.I., Neumark A.V., *Mnogofaznye processy v poristykh sredakh* [Multiphase processes in porous media]. Khimiya, Moscow, 1982. 320 p. (in Russian).
12. Voyutsky S.S., *Fiziko-khimicheskie osnovy propityvaniya i impregnirovaniya voloknistykh materialov dispersiyami polimerov* [Physical and chemical fundamentals of impregnation and impregnation of fibrous materials with polymer dispersions]. Khimiya, Leningrad, 1969. 336 p. (in Russian).
13. Gribanova E.V., Molchanov A.I., Issledovanie zavisimosti ugla smachivaniya ot skorosti dvizheniya meniska [Dependence of the contact angle of the speed of movement of the meniscus]. *Kolloidnyi Zhurnal*, 1978, vol. 40, no. 2, pp. 217-223. (in Russian).