

Мета роботи полягає в дослідженні процесів колапсу бульбашок на поверхні електроліту з утворенням і розпадом кумулятивного струменя, утворенням аерозолю і вплив на ці процеси щільності, поверхневого натягу і в'язкості розчинів. Процес утворення бульбашок та вихід їх на поверхню присутній у багатьох електрохімічних синтезах органічних та неорганічних речовин, тому аналіз утворення газових бульбашок та дослідження їх впливу на технологічні процеси на прикладі синтезу фератів(VI) лужних металів є дуже актуальною темою для розгляду.

Завданням цієї роботи стало проведення теоретичного аналізу колапсу бульбашок на поверхні електроліту. Вивчення закономірностей виносу електроліту в процесі синтезу сполук Fe(VI) проводилось методом титрування, результати, отримані експериментально, порівнювалися з теоретично розрахованими даними.

За результатами розрахунків, радіус кумулятивного струменя збільшується з розміром бульбашок, а висота кумулятивного струменя при цьому зменшується. Обсяг крапель аерозолю збільшується при зростанні розмірів бульбашок. Унесення луку аерозолем збільшується з концентрацією електроліту.

Безпосередній вклад автора у проведенні експерименти:

У цій конкурсній роботі автор самостійно провів аналітичний огляд технічної літератури для аналізу утворення газової фази на поверхні електроліту в процесі синтезу фератів(VI).

Також автором були проведені експериментальні дослідження та теоретичні розрахунки колапсу бульбашок, оброблені в програмах Excel та Mathcad, і встановлено основні залежності уносу електроліта з розчину від параметрів кумулятивного струменя та утвореного аерозолю.

Ключові слова: унос електроліту, виділення газової фази, утворення аерозолю, синтез сполук Fe(VI), колапс бульбашок.

Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт
зі спеціальності
Хімічні технології та інженерія

НАУКОВА РОБОТА
на тему «Аналіз уносу електроліту електрогенерованими газовими
бульбашками»

Шифр «Унос електроліту»

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	5
1.1 Колапс газових бульбашок на поверхні розчину.....	5
1.2 Розпад кумулятивного струменя на краплі.....	7
1.3 Унос електроліту з розчину.....	8
2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	9
2.1 Методика електрохімічного синтезу фератів(VI).....	9
2.2 Опис установки	10
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	12
3.1 Аналіз факторів, що впливають на виникнення аерозоліу при колапсі газових бульбашок на поверхні розчину	12
3.2 Умови розпаду кумулятивного струменя на краплі	17
3.3 Розрахунок уносу електроліта з розчину.....	20
ВИСНОВКИ.....	24
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	25

ВСТУП

Явище електролітичного газовиділення виникає у багатьох процесах прикладної електрохімії. Вплив, що спричиняється явищем електролітичного газовиділення є неоднозначним і може грати як позитивну, так і негативну роль. Газонаповнення зростає при збільшенні щільності струму або за рахунок зменшення відстані між електродами. На розмір і кількість бульбашок газу впливають матеріал і конструкція електродів, природа газу і електроліту, тиск і інші чинники. В результаті електролітичного газовиділення збільшується опір електроліту, що має прямий вплив на увесь хіміко-технологічний процес.

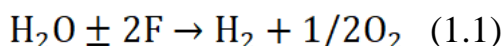
Процес утворення бульбашок та вихід їх на поверхню присутній у багатьох електрохімічних синтезах органічних та неорганічних речовин, тому аналіз утворення газових бульбашок та дослідження їх впливу на технологічні процеси на прикладі синтезу фератів(VI) лужних металів є дуже актуальною темою для розгляду.

Існує декілька способів отримання сполук Fe(VI), але найбільше розповсюдження здобув саме процес електрохімічного синтезу фератів. В ході електрохімічного розчинення залізного анода в розчинах лугів на катоді виділяється водень, а на аноді йде виділення кисню та безпосередньо ферату. У електросинтезі сполук Fe(VI) газовиділення – це побічний процес, але саме утворення газової фази впливає на умови проведення та вихід кінцевого продукту реакції. Саме це робить синтез фератів(VI) гарним прикладом процесу електролітичного газовиділення та викликає інтерес до вивчення утворення газової фази у концентрованих лужних розчинах, аналізу впливу різних факторів на виникнення і зростання газових бульбашок, а також їх вихід на поверхню електроліту.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

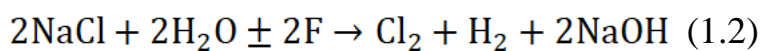
1.1 Колапс газових бульбашок на поверхні розчину

Багато процесів у харчовій та хімічній промисловості протікають при барботажі газу, утворенні газових бульбашок в результаті хімічних і біохімічних реакцій і електролітичному розкладанні води. Як приклад можна привести такі великотоннажні процеси, як флотаційне збагачення і поділ мінералів в гідрометалургійних процесах [1], процеси абсорбції, ректифікації, органічний і нафтохімічний синтези [2], водопідготовка і очищення води [3], і, звичайно, застосування в електрохімічних процесах. Так, при електролізі води протікають процеси, які можна описати сумарним рівнянням реакцій:

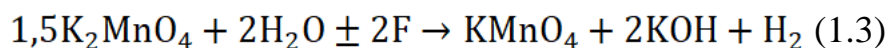


Де F - число Фарадея

Електролізу зазнають 6-8М розчини NaOH або KOH, а одержуваний водень використовується в синтезі аміаку, для охолодження генераторів електростанцій, в тонкому органічному синтезі та при генерації енергії в паливних елементах [4]. Виникнення на електродах газових бульбашок спостерігається при отриманні хлору і лугу:

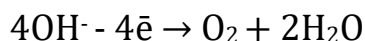
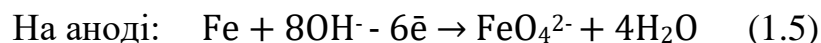
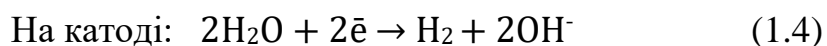


Водень виділяється також у напівелектрохімічному процесі отримання перманганату калію:



Електроліз ведеться в розчині, що містить до 450 г/л KOH.

Електролітичне газовиділення відбувається і при синтезі фератів(VI) завдяки виділенню побічних реакційних газів при електролізі [5]. На катоді виділяється водень, а на аноді - кисень:



В технології електросинтезу фератів(VI), газовиділення впливає на умови синтезу і масоперенос [3]. Також утворення водневих бульбашок змінює концентрацію ферата в приелектродному шарі.

Процеси утворення бульбашок використовуються і в гальванотехніці, наприклад, при електрохімічному знежиренні деталей і нанесенні хромових покриттів. На відміну від хімічного знежирення, завдяки виділенню

бульбашок водню, електрохімічне знежирення проходить в рази швидше і набагато якісніше [6].

Оскільки щільність газу приблизно на три прядка менше щільності водних розчинів, бульбашки спливають на поверхню. У тому випадку, якщо поверхня розчину не вкрита пінним шаром або шаром полістирольних кульок (так званими плаваючими тілами), бульбашки руйнуються з утворенням кумулятивного струменя, що розпадається на мікрокраплі аерозолі. Саме ці процеси спостерігаються при електролізі води, отриманні хлору і лугів, перманганату і фератів(VI) [7].

З закритих апаратів аерозоль виноситься потоком відхідних газів. Оскільки розчини можуть бути отруйними, агресивними, корозійноактивними, потрібно їх додаткове очищення.

Кількість аерозолі, що утворився, залежить як від кількості колапсуючих газових бульбашок, їх розмірів, так і від фізико-хімічних властивостей розчину: концентрації, щільності, поверхневого натягу та інших.

Розглянемо процеси, що проходять при руйнуванні бульбашки на поверхні розділу розчин-повітря (газ). Форма бульбашки залежить від її розміру, щільності та поверхневого натягу розчину [8]. Якщо бульбашка має розмір менше 5 мм, можна вважати, що на поверхні розділу фаз він зберігає сферичну форму.

При виході бульбашки на поверхню електроліту зникає частина поверхні, що дорівнює діаметральному перерізу бульбашки і утворюється нова поверхня, рівна внутрішній поверхні кулі радіусом R і зовнішній поверхні, що дорівнює половині поверхні кулі, рис.1.1.

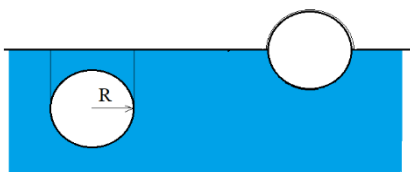


Рис.1.1 До визначення запасу енергії бульбашки на поверхні розділу фаз

Зміна площі поверхні ΔS в цьому випадку дорівнюватиме:

$$\Delta S = 4\pi R^2 + 2\pi R^2 - \pi R^2 = 5\pi R^2 \quad (1.6)$$

Надлишкова поверхнева енергія в цьому випадку буде дорівнює:

$$A_{\text{пов}} = \sigma \Delta S = 5\pi \sigma R^2 \quad (1.7)$$

Де σ – величина поверхневого натягу, Н/м.

Напівзанурена бульбашка здійснює роботу проти сили Архімеда:

$$F_{\text{АРХ}} = V\rho g = \frac{1}{2} \times \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g \quad (1.8)$$

$$A_{\text{АРХ}} = \frac{2}{3} \pi \rho g \int_0^R R^3 dR = \frac{2}{3} \pi \rho g R^4 \quad (1.9)$$

ρ - щільність рідини, кг/м³; g - прискорення сили тяжіння м/с².

Поверхневий натяг підтримує сферичну форму бульбашки, а архімедова сила прагне її деформувати. Прирівнявши (2) і (3), отримуємо величину розміру бульбашки, при якому він зберігає сферичність:

$$R = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \quad (1.10)$$

1.2 Розпад кумулятивного струменя на краплі

Після стоншування і руйнування плівки відбувається колапс бульбашки з утворенням кумулятивного струменя приблизно циліндричної форми [9]., енергія якої дорівнює енергії колапсу бульбашки.

На Рис. 1.2 представлені параметри кумулятивного струменя, а саме радіус струменя та його висота.

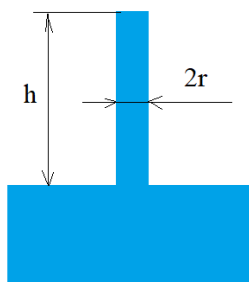


Рис.1.2 Параметри кумулятивного струменя

Вона витрачається на створення поверхні і роботу проти сил гравітації:

$$A_{\sigma} = 2\pi r h \sigma \quad (1.11)$$

$$F_{\text{ГРАВ}} = \pi r^2 \rho g h \quad (1.12)$$

$$A_{\text{ГРАВ}} = \pi r^2 \rho g \int_0^h h dh = \pi \rho g r^2 h^2 \quad (1.13)$$

З рівності енергій бульбашки і кумулятивного струменя можна визначити її параметри, висоту і діаметр:

$$\pi\rho g r^2 h^2 + 2\pi\sigma r h - 5\pi R^2\sigma = 0 \quad (1.14)$$

Отримали квадратне рівняння, вирішення якого дає:

$$rh = \frac{\sigma \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{5\rho g R^2}{\sigma}} \right)}{\rho g} \quad (1.15)$$

1.3 Унос електроліту з розчину

На рисунку 1.3 представлені основні параметри розпаду кумулятивного [10] струменя на краплі, а саме радіус крапель, довжина кумулятивної хвилі, відстань, на якій утворюються краплі. Також важливим параметром є обсяг краплі утвореного аерозолю, що буде використовуватися у подальших розрахунках.

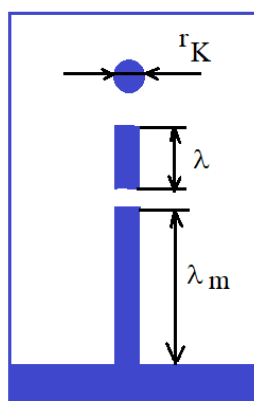


Рис.1.3 Параметри розпаду кумулятивного струменя на краплі

Першопричиною розпаду кумулятивного струменя на краплі є кумулятивні хвилі, приблизна довжина яких розраховується за формулою Релея [11]:

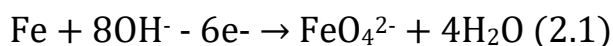
$$\lambda = 2\pi r \quad (1.16)$$

Довжина кумулятивної хвилі збільшується зі зростанням радіусу кумулятивного струменя та концентрації електроліту.

2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Методика електрохімічного синтезу фератів(VI)

До теперішнього часу запропоновано велику кількість технологій отримання сполук Fe (VI) [12]. Одним з найбільш екологічних і легко реалізованих способів є електрохімічний синтез [13], заснований на явищі анодного розчинення маловуглецевої сталі з низьким вмістом Mn, Ni, Co в концентрованих лужних розчинах (14 NaOH):



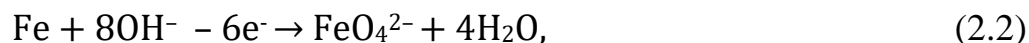
Електроліз проводили 4 години при температурі 273 К. Для експерименту використовували джерела постійного струму Б5-47 в комірці. Електрохімічний реактор виготовлений з поліметилметакрилату, у якому електродні простори розділені між собою діафрагмою виготовленою з полівінілхлориду. Об'єм анодної та катодної камер становить по 100 мл.

Для проведення експерименту використали пластини ($S=78,5 \text{ см}^2$) із сталі ВСт3 у якості електродного матеріалу. Електроди перед початком синтезу зачищали наждачним папером для запобігання іржі, знежирювали етиловим спиртом, обробляли соляною кислотою та промивалися водою[14].

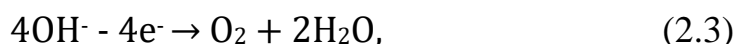
В якості електроліту використовували розчини гідроксиду натрію концентрації $C = 14\text{M}$. Для всіх експериментів площа аноду буде $78,5 \text{ см}^2$.

Процес синтезу фератів(VI) включає в себе такі хімічні реакції:

- утворення ферату на аноді:



- паралельно протікає реакція електрохімічного виділення на аноді кисню:



- процес утворення водню на катоді:



Утворення значних обсягів газоподібних продуктів реакцій (2.2) та (2.4) неминуче призводить до уносу електроліту. Кількісні характеристики цього явища становлять значний інтерес, оскільки вони необхідні для складання матеріального балансу, конструювання основних апаратів, розробки технологічного регламенту виробництва фератів і очищення водню і кисню з метою їх подальшого використання[15].

Встановлення оптимальних умов отримання фератів, а також вивчення закономірностей виносу електроліту в процесі синтезу сполук Fe(VI) вивчали в реакторі (рис.2.1).

2.2 Опис установки

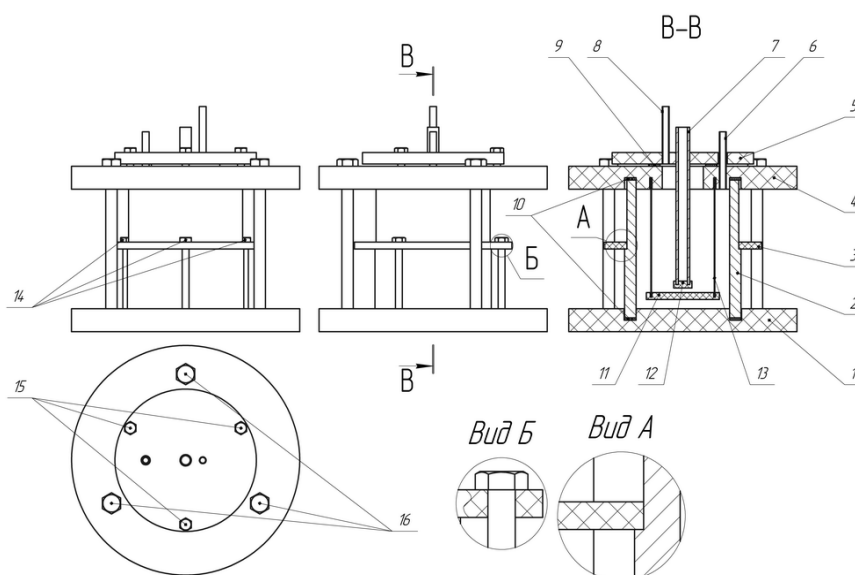


Рис. 2.1 Пілотний реактор для синтезу фератів(VI) лужних металів.

1- основа, 2- анод, 3- кільце, 4- кришка, 5- пластина, 6- патрубок для кисню, 7- катод, 8- патрубок для водню, 9,10- прокладки, 11- днище, 12- заглушка, 13- мембрана, 14,15,16- з'єднання.

Реактор (рис. 2.1) складається з основи 1, на якій кріпиться товстостінний порожнистий циліндричний анод 2, що обмежує анодний простір і власне реактор зовні. На зовнішній стороні аноду по всьому периметру є виступ, на який встановлено кільце 3 з отворами. В кришку 4 реактора вмонтована мембрана 13, що служить для поділу катодного і анодного просторів, виконана у формі циліндра з жорстким днищем 11. Кришка герметично з'єднана з корпусом за допомогою гвинтів, має два

штуцери для відводу газів, які утворилися в процесі синтезу (H_2 і O_2) через силіконові трубки. До кришки реактора кріпиться пластина 5 з вмонтованим трубчастим порожнистим катодом 7 з заглушкою 12. Така конструкція дозволяє коаксиально розташувати анод 2, мембрану 13 і катод 7. Підстава 1, анод 2 і кільце 3, а також кришка реактора 4, анод 2 і підстава 1 стягнуті різьбовими з'єднаннями (рис. 3). У верхній частині розташований патрубок 6 для відводу кисню, а в пластині, що закриває катодного відділення - патрубок 8 для відводу водню. Після складання в катодного і анодного відділення через штуцери (на рис.1 не показані) заливають водний розчин гідроксиду лужного металу. Далі катод і анод з'єднують за допомогою токопідводів з джерелом струму і включають постійний електричний струм.

Для оцінки уносу аерозолі на штуцер для відводу газу з анодного простору одягали шланг [16], іншим кінцем занурювали в склянку з водою. Після закінчення експерименту вода з лужним аерозолем титрувалась для визначення кількості уносу лугу.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Аналіз факторів, що впливають на виникнення аерозолі при колапсі газових бульбашок на поверхні розчину

Мета роботи: Дослідження процесів колапсу бульбашок на поверхні електроліту з утворенням і розпадом кумулятивного струменя, утворенням аерозолі і вплив на ці процеси щільності, поверхневого натягу і в'язкості розчинів. Залежність щільності і поверхневого натягу розчинів гідроксиду натрію від концентрації приведені в таблиці 1.

Загальним для більшості цих процесів є використання концентрованих лужних розчинів, тому для досліджень обрані саме розчини гідроксиду натрію, що дозволяють оцінити особливості утворення аерозолі в широкому діапазоні концентрації, щільності рідини.

Таблиця 1.

Залежність щільності, в'язкості і поверхневого натягу розчинів гідроксиду натрію від концентрації.

Концентрація	2	4	6	8	14	18
Щільність	1020	1042	1064	1086	1130	1197
Поверхневий натяг	0,073	0,074	0,075	0,076	0,078	0,081

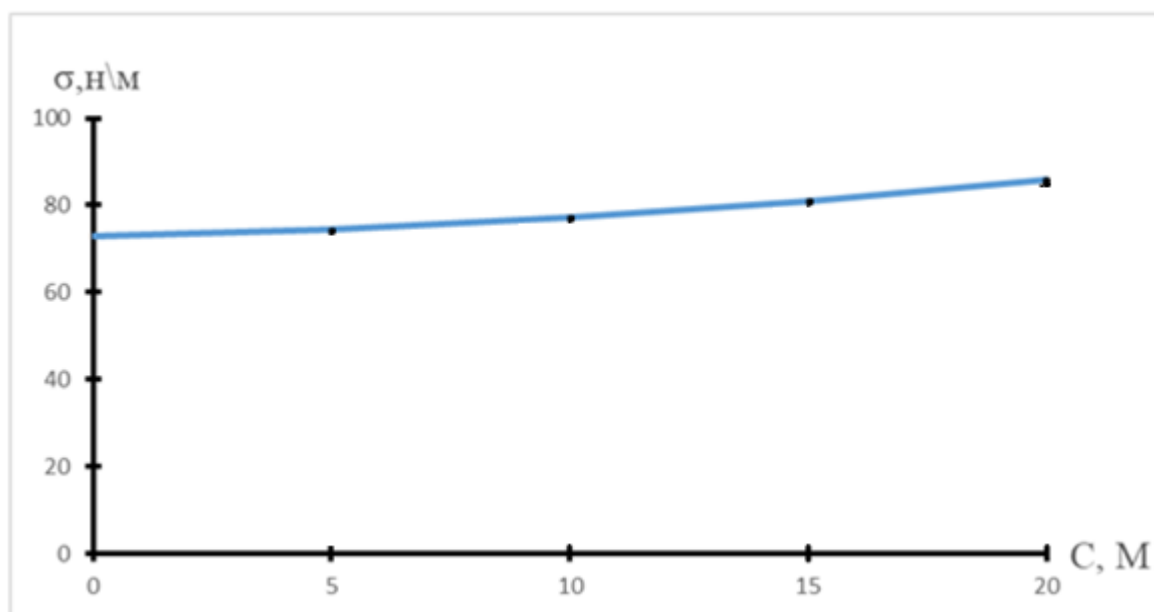


Рис.3.1 Графік залежності поверхневого натягу від концентрації натрій гідроксиду

Дані поверхневого натягу для таблиці 1 було взято з джерела [17]. Для розрахунку поверхневого натягу у діапазоні концентрацій, не приведених у довіднику був побудована залежність (Рис.3.1) для відомих значень σ від концентрації.

Залежність граничного розміру бульбашки, що зберігає сферичну форму, від щільності та поверхневого натягу електроліту приведені в таблиці 2. Для візуалізації залежності радіусу бульбашки сферичної форми від концентрації електроліта побудований графік(Рис.3.2).

Таблиця 2.

Залежність граничного розміру бульбашки, що зберігає сферичну форму, від щільності та поверхневого натягу електроліту при $g=9,81 \text{ м/с}^2$, $t=20^\circ\text{C}$

C, М	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
ρ , кг\м ³	998,2	1020	1042	1064	1086	1108	1130	1153	1175	1197
σ , Н\м	0,072	0,073	0,074	0,075	0,076	0,077	0,078	0,079	0,08	0,081
R, мм	2,71	2,70	2,69	2,68	2,67	2,66	2,65	2,64	2,63	2,62

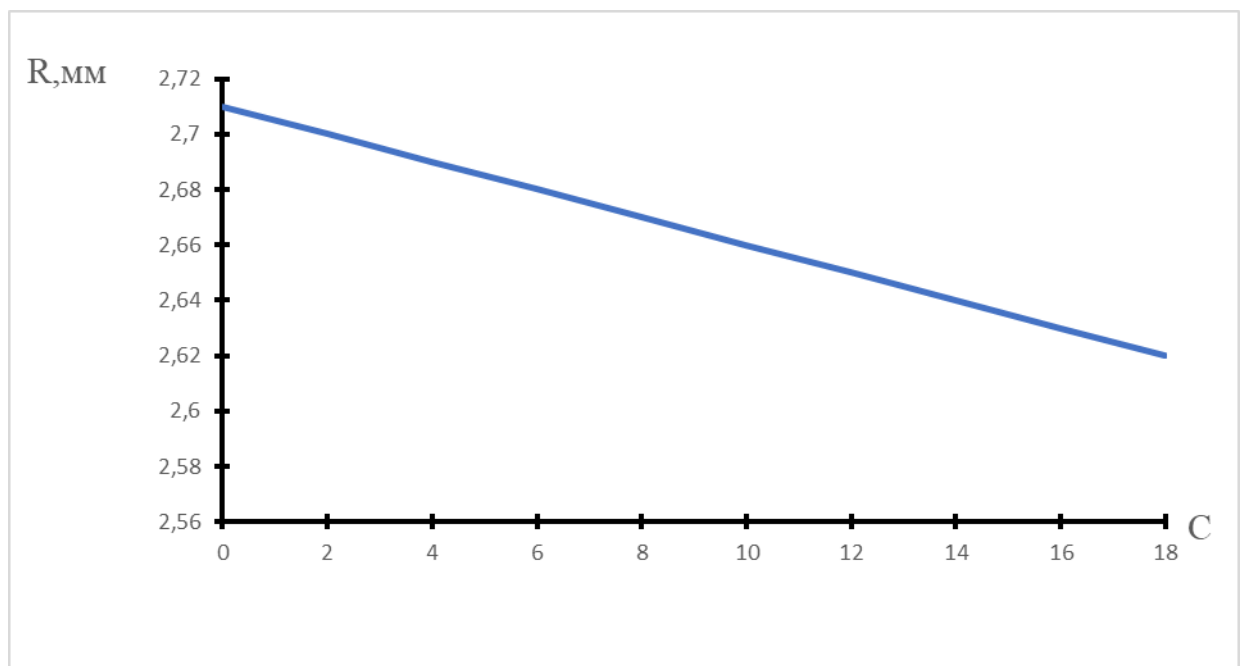


Рис.3.2 Залежність радіусу бульбашки сферичної форми від концентрації електроліта

Для води ($\sigma = 0,072 \text{ Н/м}$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$) [18] ця величина складає близько 2,7 мм. По мірі збільшення поверхневого натягу граничний

радіус сферичної бульбашки буде збільшуватися. Для цих умов наші подальші розрахунки будуть коректними.

Таким чином, надлишкова енергія бульбашки на поверхні розділу фаз становить:

$$A_{\text{ИЗБ}} = A_{\text{ПОВ}} + A_{\text{АРХ}} \quad (3.1)$$

Оцінимо співвідношення поверхневих і архімедових сил для концентрації гідроксиду натрію $C_{\text{NaOH}} = 14\text{M}$ ($\sigma = 0,079 \text{ н\м}$, $\rho = 1153 \text{ кг\м}^3$) в діапазоні розмірів бульбашок від 20 до 200 мкм. Отримані дані приведені на рис.3.3.

Аналізуючи графік, видно, що поверхнева сила приблизно на 4 порядки перевищує архімедову і при подальших розрахунках нею можна знехтувати.

Аналогічні розрахунки було проведено для усього діапазону концентрацій від 0 до 18М.

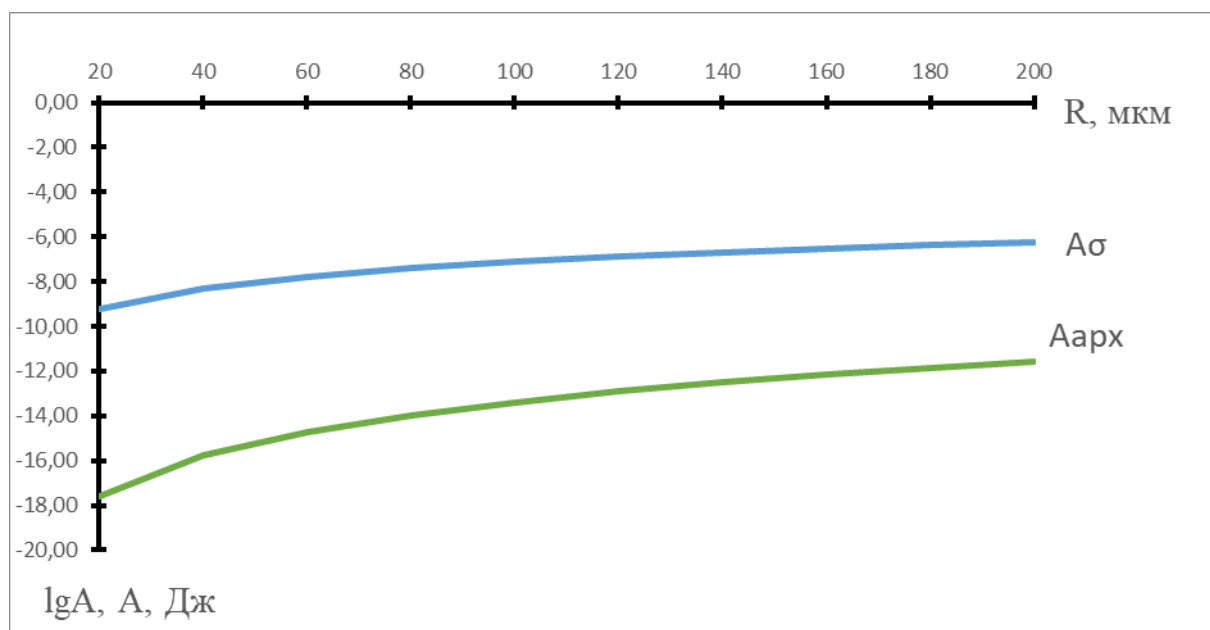


Рис 3.3 Порівняння роботи сил поверхневого натягу і роботи проти сил Архімеда при $C = 14$

Приклад залежності висоти кумулятивного струменю від концентрації при радіусі бульбашки $R = 100$ мкм приведений в таблиці 3.

Таблиця 3.

Залежність висоти кумулятивного струменя від концентрації при радіусі бульбашки $R = 100$ мкм.

Концентрація, M	0	4	14	18
rh, m^2	$2,496 \cdot 10^{-8}$	$2,496 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$

З таблиці 3 видно, що в усьому діапазоні концентрацій параметр rh кумулятивного струменя зостається сталим та приблизно дорівнює $2,5 \cdot 10^{-8} m^2$.

Було проведено розрахунок радіусів кумулятивного струменя при різних радіусах бульбашок та різних концентраціях електроліту.

Для визначення r і h кумулятивного струменя розглянемо зміну щільності енергії на каверні, що створює кумулятивний струмінь.

$$w_{\text{пов}} = \frac{A_{\text{пов}}}{V} = \frac{5\pi R^2 \sigma}{0,5 \frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{30\sigma}{4R} \quad (3.2)$$

Де V - об'єм

Енергія кумулятивного струменя, що рухається:

$$A_{\text{движ}} = m \frac{v^2}{2} = V\rho \frac{v^2}{2} \quad (3.3)$$

А щільність енергії:

$$w_{\text{движ}} = \frac{A_{\text{движ}}}{V} = \rho \frac{v^2}{2} \quad (3.4)$$

Прирівнявши (12) і (14) отримуємо:

$$\rho \frac{v^2}{2} = \frac{30\sigma}{4R} \quad (3.5)$$

Звідси:

$$v^2 = \frac{30\sigma}{2R\rho} \quad (3.6)$$

Висота струменя:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (3.7)$$

$$h = \frac{30\sigma}{2R\rho} * \frac{1}{2g} = \frac{15\sigma}{2R\rho g} \quad (3.8)$$

Залежність висоти h кумулятивного струменю від радіусів бульбашок при концентрації $C_{\text{NaOH}} = 14\text{M}$ можна прослідкувати у таблиці 4.

Таблиця 4.

Залежність висоти кумулятивного струменю від радіусів бульбашок при $C_{\text{NaOH}} = 14\text{M}$.

R, мкм	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
h, м	2,67	1,34	0,89	0,67	0,53	0,45	0,38	0,33	0,30	0,27

З таблиці 4 видно, що висота кумулятивного струменя значно зменшується зі збільшенням радіусу бульбашки в усьому діапазоні концентрацій від 0 до 18М за рахунок значного збільшення щільності розчину.

Тепер можна визначити і радіус кумулятивного струменя.

$$r = \frac{hr}{h} = \frac{\sigma \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{5\rho g R^2}{\sigma}} \right)}{\rho g} * \frac{2R\rho g}{15\sigma} = \frac{2R \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{5\rho g R^2}{\sigma}} \right)}{15} \quad (3.9)$$

На рис.3.4 представлено графік залежності на прикладі результатів розрахунку r кумулятивного струменя при C від 2М до 18М. Необхідно зауважити, що залежність від концентрації радіусів бульбашок практично співпадає у всьому діапазоні їх розмірів.

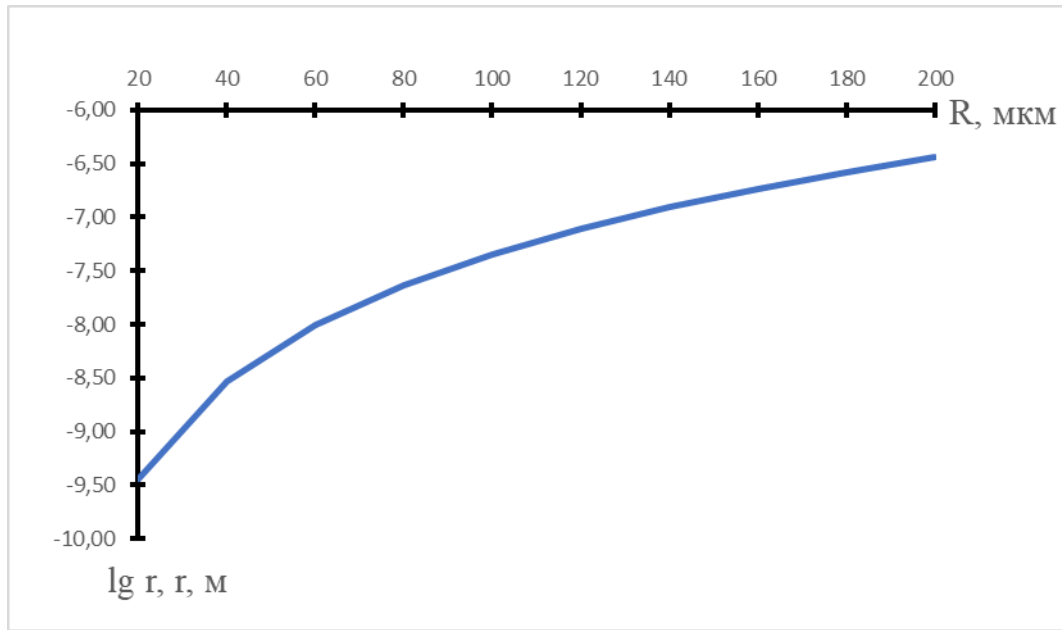


Рис.3.4 Залежність r від R бульбашки при концентрації електроліту від $C=2$ до $C=18$. Величини практично співпадають.

3.2 Умови розпаду кумулятивного струменю на краплі

Як видно з таблиці 5, у якій представлено залежність довжини кумулятивної хвилі від концентрації C та r при радіусі бульбашки $R = 100$ мкм. Аналогічні розрахунки проведено для всіх концентрацій електроліту та в усьому діапазоні радіусів бульбашки.

Таблиця 5.

Залежність довжини кумулятивної хвилі від концентрації електроліту.

Концентрація C , М	2	4	6	8	12	18
Радіус кумулятивного струменя r , м	$4,56 \cdot 10^{-8}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$4,63 \cdot 10^{-8}$	$4,66 \cdot 10^{-8}$	$4,73 \cdot 10^{-8}$	$4,82 \cdot 10^{-8}$
Довжина хвилі, м	$2,86 \cdot 10^{-7}$	$2,89 \cdot 10^{-7}$	$2,91 \cdot 10^{-7}$	$2,93 \cdot 10^{-7}$	$2,97 \cdot 10^{-7}$	$3,03 \cdot 10^{-7}$

Краплі утворюються не відразу, а на деякій відстані від основи, так як для їх утворення потрібен час:

$$\lambda_m = \sqrt{12\pi r} \quad (3.10)$$

На рис.3.5 на прикладі мінімальної та максимальної концентрації електроліту показано, що зі збільшенням концентрації луку та з ростом радіусу бульбашки збільшується і дистанція утворення крапель кумулятивного струменя.

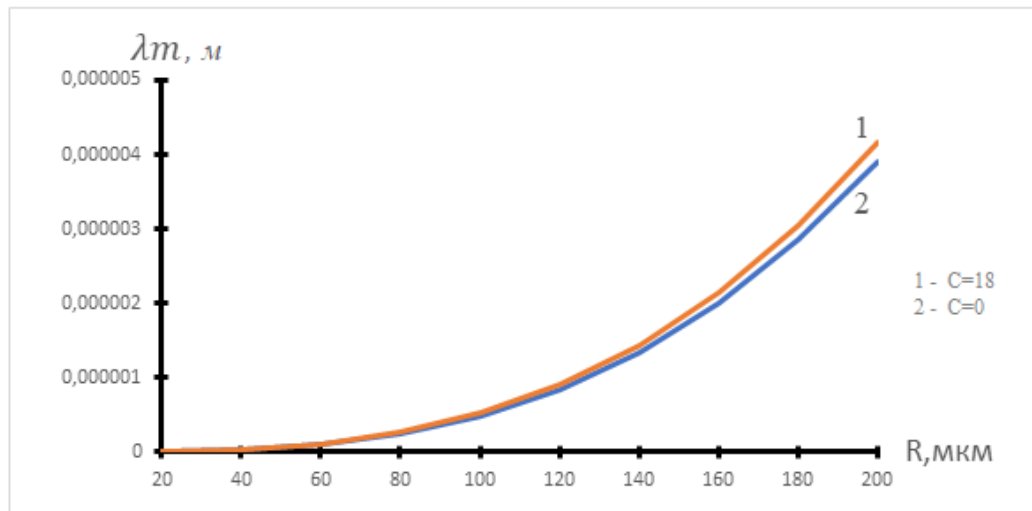


Рис.3.5 Залежність відстані, на якій утворюються краплі від радіусу бульбашки при концентраціях: 1) $C = 0\text{M}$ та 2) $C = 18\text{M}$

Обсяг крапель, що утворюються з кумулятивного струменя довжиною λ :

$$V_K = \pi r^2 \lambda = 2\pi^2 r^3 \quad (3.11)$$

А радіус краплі утвореного аерозолю:

$$r_K = (1,5\pi r^3)^{1/3} \quad (3.12)$$

Розглянемо, від чого залежить розмір та обсяг крапель аерозолю. Для цього побудовано графік порівняння (Рис 3.6) та таблиця 6 в усьому діапазоні значень радіусу бульбашки від 20 до 200, при концентрації $C = 14\text{M}$. З ростом радіусу бульбашки обсяг та радіус крапель буде збільшуватися.

Таблиця 6.

Порівняння обсягу та радіусу краплі утвореного аерозолі та їх залежність від радіусу бульбашки

D, мкм	40	110	160	220	360
$V_K, \text{м}^3$	$2,87 \cdot 10^{-18}$	$7,5 \cdot 10^{-17}$	$2 \cdot 10^{-16}$	$1,01 \cdot 10^{-15}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$
$r_K, \text{м}^3$	$6 \cdot 10^{-10}$	$1,64 \cdot 10^{-8}$	$7,58 \cdot 10^{-8}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	$6,04 \cdot 10^{-7}$

Для візуалізації залежності обсягу краплі аерозолі від діаметру бульбашки при концентрації електроліту $C=14$, дані V_K з таблиці 6 були відображені у вигляді графіка залежності (Рис.3.6).

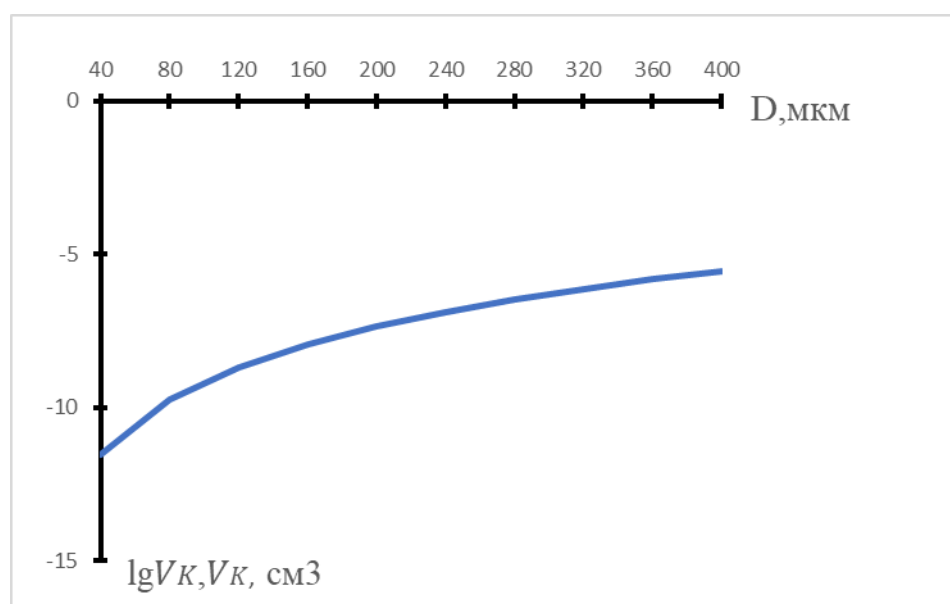


Рис.3.6 Залежність обсягу краплі аерозолі від діаметру бульбашки при $C=14$

Щоб порахувати, скільки луку в одній краплі утвореного аерозолі використаємо формулу:

$$m_{\text{NaOH}} = V_K C \quad (3.13)$$

У таблиці 7 представлено результати для кожної концентрації електроліту в діапазоні від 0М до 18М.

Таблиця 7.

Залежність маси лугу в одній краплі утвореного аерозолію від концентрації

C, M	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
m _{NaOH}	0	1·10 ⁻¹¹	2·10 ⁻¹¹	3·10 ⁻¹¹	4·10 ⁻¹¹	5·10 ⁻¹¹	6·10 ⁻¹¹	7·10 ⁻¹¹	9·10 ⁻¹¹	1·10 ⁻¹⁰

3.3 Розрахунок уносу електроліта з розчину

Унос лугу визначаємо з об'єму аерозолію та кількості бульбашок, що виділилися при колапсі однієї бульбашки певного діаметра:

$$V_{\text{унос}}^{O_2} = N_{O_2} \cdot V_{\text{аерозолію}} \quad (3.14)$$

N- кількість бульбашок, що виділилися при певній щільності струму за одиницю часу, м³/час.

Для цього знайдемо необхідні дані:

Об'єм газу, що виділився в електролізері за одиницю часу розраховується за законом Фарадея. Вибравши діапазон сили струму I = 1-3A, визначаємо V^{ел}_{O₂}:

$$V_{O_2}^{\text{ел}} = K_{O_2} \cdot I \cdot V_{T_{O_2}} \cdot t \quad (3.15)$$

$$\text{Де } K_{O_2} = \frac{22,4 \cdot 0,5}{2 \cdot 26,8} = 0,21 \text{ л/А*Г}$$

Об'єм газу, що виділився в електролізері за 4 години при C(NaOH)=14M, I = 1-3A, K_{O₂}= 0,21 представлений в таблиці 8.

Таблиця 8.

Залежність уносу електроліта від концентрації гідроксиду натрію при

C(NaOH) = 14M, I = 1-3A, K_{O₂} = 0,21, t = 4 години.

I	1	2	3
ΔV експ, мл	0,9	1,4	1,7
BT (O ₂), %	65	71	83
V ^{ел} _{O₂} , л	0,546	1,1928	2,0916
i, mA/cm ²	12,7	25	38
K _{O₂}	0,21		

У таблиці 8 представлена залежність уносу електроліту від концентрації гідроксиду натрію при $C(\text{NaOH}) = 14\text{M}$, $I = 1-3\text{A}$, $K_{\text{O}_2} = 0,21$, з якої можна побачити, що зі зростанням сили струму об'єм газу, що виділився в електролізері також збільшується.

Розрахуємо щільність струму:

$$i = I/S \quad (3.16)$$

Величини щільності струму також приведені в таблиці 8. З даних статті[3] залежність середніх розмірів кисневих бульбашок, що виділилися при концентрації електроліту $C=14$, від різних значення щільності струму (Таблиця 9) представлені на Рис.3.7.

Оцінка уносу лугу при синтезі фератів проводилася при щільності струму 12, 25, 38 mA/cm^2 .

Таблиця 9.

Залежність об'єму бульбашок O_2 від діаметру кислородної бульбашки та від щільності струму при $C=14\text{M}$.

$i, \text{mA}/\text{cm}^2$	10	12	20	25	30	38	40
$d, \text{мкм}$	90	110	145	160	175	220	200

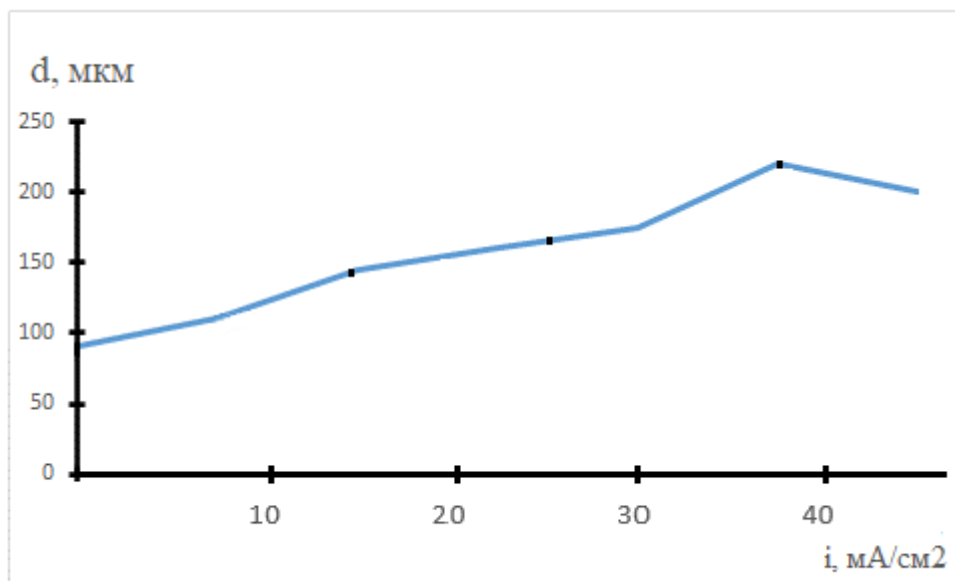


Рис.3.7 Залежність середніх розмірів кисневих бульбашок, що виділились від різних значення щільності струму при $C=14$.

Оскільки у статті приведені дані для щільності току, що відрізняється від приведених в табл. 9 нами була побудована залежність середніх розмірів бульбашок від щільності струму з якої були визначені середні розміри бульбашок, що складають (Табл.10):

$$V^{п} O_2 = \frac{\pi d^3 O_2}{6} \quad (3.17)$$

Таблиця 10.

Залежність середніх розмірів бульбашок O_2 від діаметру кислородної бульбашки при $C=14M$.

I	1	2	3
d, мкм	101	160	220
$V^{п} O_2, \text{см}^3$	$7 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$

Розрахуємо кількість бульбашок, що утворюється за час проведення електролізу:

$$N_{O_2} = \frac{V_{O_2}(\text{ел})}{V_{O_2}(\text{п})} \quad (3.18)$$

Дані порівняння обсягу газу, що виділився в електролізері за одиницю часу, середніх розмірів бульбашок та кількості бульбашок, що утворюється за час проведення електролізу приведені в таблиці 11.

Таблиця 11.

Залежність кількості бульбашок, що утворюється за час проведення електролізу від $V^{\text{ел}} O_2$ та $V^{п} O_2$.

$V^{\text{ел}} O_2, \text{см}^3$	546	1193	2091
$V^{п} O_2, \text{см}^3$	$7 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$
N_{O_2}	$7,84 \cdot 10^8$	$5,56 \cdot 10^8$	$3,75 \cdot 10^8$

По розрахованим даним визначаємо унос електроліта з розчину:

$$V_{\text{унос}}^{\text{NaOH}} = N_{O_2} \cdot V_{\text{аерозоль}} \quad (3.19)$$

Обсяг аерозолю, що виділився в процесі електролізу для діапазону сили струму $I = 1-3\text{A}$ взятий з Рис.3.6 по графіку залежності. Дані приведені в Таблиці 11.

Таблиця 11.

Залежність обсягу уноса електроліта з розчину від кількості бульбашок та обсягу аерозолю, що утворюються за час проведення електролізу

I	1	2	3
N_{O_2}	$7,84 \cdot 10^8$	$5,56 \cdot 10^8$	$3,75 \cdot 10^8$
$V_{\text{аерозолю}}, \text{cm}^3$	$7,5 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$V_{\text{унос}}^{\text{NaOH}}, \text{cm}^3$	0,05	0,1	0,3

Експериментально отримані дані для оцінки уносу луку з електролізера показані у таблицях 12,13.

Таблиця 12.

Залежність уносу електроліту від концентрації гідроксиду натрію
(Струм 1А, Температура 273 К, Час електролізу 4 години)

$C(\text{NaOH}), \text{M}$	12	14	16
$\Delta V, \text{мл}$	1,5	0,9	0,8
ВТ (O_2), %	72	65	61

Таблиця 13.

Залежність уносу електроліту від концентрації гідроксиду натрію
($C(\text{NaOH}) = 14\text{M}$, Температура 273 К, Час електролізу 4 години)

Струм, I (А)	1,0	2,0	3,0
$\Delta V, \text{мл}$	0,9	1,4	1,7
ВТ (O_2), %	65	71	83

ВИСНОВКИ

Проведено теоретичний аналіз колапсу бульбашок на поверхні електроліту. Показано, що радіус кумулятивного струменя збільшується з розміром бульбашок, а висота кумулятивного струменя при цьому зменшується.

В цілому, обсяг крапель аерозолу збільшується при зростанні розмірів бульбашок, що спостерігається з ростом щільності струму. Унесення лугу аерозолем також збільшується з концентрацією електроліту.

Порівнюючи експериментально виміряні і теоретично розраховані величини можна відзначити, що унос, розрахований експериментально приблизно на порядок більше розрахованого теоретично. Це може бути пов'язано з тим, що при електролізі відбувалося спінювання електроліту і плівки лугу могли потрапити в поглинаючу склянку разом з аерозолем.

У подальших експериментах потрібно передбачити значне збільшення газового обсягу електролізера для запобігання подібних помилок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Байрачний Б.І., Ляшок Л.В. Технічна електрохімія. – Ч.4. Гідроелектрометалургія. – Х.: ВАТ Видавництво «Прапор», 2012. – 494 с.
2. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н. Перспективы использования струйно-барботажных контактных устройств для повышения энергетической эффективности теплообменных аппаратов нефтехимических предприятий // Вестник Казанского технологического университета. - 2015. - №15.
3. Головкин Д.А., Нефедов В.Г., Гиренко Д.В., Черенкова О.А. Электролиз концентрированных щелочных растворов. 2. Влияние факторов на размеры выделяющихся кислородных пузырей // Вопросы химии и химической технологии. - 2013. - № 4
4. Борзенко В. И. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА - СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ // Окружающая среда и энерговедение. - 2020. - №3
5. Нефедов В.Г., Атапин А.Г., Головкин Д.А. Электролиз концентрированных щелочных растворов. 2. Факторы, влияющие на размеры выделяющихся водородных пузырей // Вопросы химии и химической технологии. - 2015. – Т.2.
6. А. М. Ямпольский, В. А. Ильин КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК ГАЛЬВАНОТЕХНИКА. - М.: ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, 1962. - С. 72,73, С. 163,164.
7. Мазанко А.Ф., Камарьян Г.М., Ромашин О.П. Промышленный мембранный электролиз. – М.: Химия, 1989. – 236 с.
8. Фиошин М.Я., Смирнова М.Г. Электрохимические системы в синтезе химических продуктов. - М.: Химия, 1985. – 286 с.
9. Кубасов В.Л., Банников В.В. Электрохимическая технология неорганических веществ. – М.: Химия, 1989. – 236 с.
10. Якименко Л.М., Серышев Г.А. Электрохимические процессы в химической промышленности: Электрохимический синтез неорганических соединений. – М.: Химия, 1984. -160 с.
11. Горбачов А.К. Технічна електрохімія. – Ч.1. Електрохімічні виробництва хімічних продуктів. – Х.: ВАТ Видавництво «Прапор», 2021. – 494 с.
12. Нефедов В.Г. Выделение газовой фазы при электролизе воды в полях массовых и электрических сил. – Днепропетровск: Изд-во УГХТУ, 2008. – 292 с.
13. Статистика распределения размеров пузырьков по размерам при электролизе воды / В.Г. Нефедов, В.М. Серебритский, О.В. Паламарчук, О.С. Ксенжек // Электрохимия. – 1987. – Т.23. - №10. – С.1382-1386.

14. Cheng K.J., Chaddock J.B. Effect of an electric field on bubble growth rate // Int. Commun. Heat and Mass Transfer. – 1985. - Vol.12. – №3. – P.259-268.
15. Janssen L.J.J., Hoogland J.G. The effect of electrolytically evolved gas bubble on the thickness of the diffusion layer // Electrochimica Acta. – 1970. – Vol.15. – №6. – P. 1013-1023.
16. Cunzhong Zhang, Fu-Ren F. Fan, Allrn J. Bard. Electrochemistry of Oxygen in concentrated NaOH Solutions: Solubility, Diffusion Coefficients, and Superoxide Formation // J. A. C. S. articles. – 2009. №131.- P. 177-181.
17. Химические источники тока. Справочник / Ред. Н.В. Коровина, А.М. Скундина. – М.: Издат. МЭИ, 2003 – 740 с.
18. Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. – М.: Советская школа, 2005. – 608 с.
19. Краткий справочник по химии / Под ред. А.Т. Пилипенко. – К.: Наукова думка, 1987. – 829 с.