

О.М. ДЗЕВОЧКО, М.О. ПОДУСТОВ, І.Г. ЛИСАЧЕНКО, А.І. ДЗЕВОЧКО, Р.М. ВОРОЖБИЯН

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ПРОДУКТІВ СУЛЬФАТУВАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ПАР

Процес нейтралізації продуктів сульфатування у виробництві поверхнево-активних речовин не є основним, проте на цій стадії закріплюються позитивні ефекти отримані на стадії сульфатування органічної речовини газоподібним триоксидом сірки. Для збереження отриманого ступеня сульфатування необхідно проводити процес нейтралізації в умовах, які виключають протікання гідролізу в кислому середовищі. Реакція нейтралізації проходить з великим виділенням тепла близько 40 кДж/моль. Аналіз літературних даних показав, що процес нейтралізації недостатньо висвітлений. Мало даних і по апаратурно-технологічному оформленню даного процесу. Процес нейтралізації в промислових умовах проводиться в апаратах з механічними турбінними мішалками, для зняття тепла екзотермічної реакції паста з нейтралізатора подається в водяний виносний теплообмінник і знову повертається в нейтралізатор. Метою даного дослідження є визначення оптимальних технологічних параметрів процесу нейтралізації продуктів сульфатування та розробка математичної моделі даного процесу. Наведено результати експериментальних досліджень процесу нейтралізації продуктів сульфатування водним розчином гідроксиду натрію. При проведенні досліджень визначався вплив технологічних параметрів на якісні показники продуктів нейтралізації, основним з яких є ступінь сульфатування. Знайдено оптимальні технологічні параметри для проведення даного процесу в реакторі з мішалкою у лабораторних умовах. На основі отриманих даних в основі даного процесу є використання реактора неперервної дії з турбінною мішалкою і з комбінованим теплообмінником. Для переходу до промислового реактора-нейтралізатора розроблена математична модель, що дає можливість методом математичного моделювання скорегувати технологічні параметри у промислових умовах.

Ключові слова: поверхнево-активна речовина, процес нейтралізації, реактор з мішалкою, математична модель, оптимальні технологічні параметри.

А.М. ДЗЕВОЧКО, М.А. ПОДУСТОВ, І.Г. ЛИСАЧЕНКО, А.І. ДЗЕВОЧКО, Р.М. ВОРОЖБИЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПРОДУКТОВ СУЛЬФАТИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПАВ

Процесс нейтрализации продуктов сульфатирования в производстве поверхностно-активных веществ не является основным, однако на этой стадии закрепляются положительные эффекты полученные на стадии сульфатирования органического вещества газообразным триоксидом серы. Для сохранения полученной степени сульфатирования необходимо проводить процесс нейтрализации в условиях, исключающих протекания гидролиза в кислой среде. Реакция нейтрализации проходит с большим выделением тепла около 40 кДж / моль.

Анализ литературных данных показал, что процесс нейтрализации недостаточно освещен. Мало данных и по апаратурно-технологическому оформлению данного процесса. Процесс нейтрализации в промышленных условиях проводится в аппаратах с механическими турбинными мешалками, для снятия тепла экзотермической реакции паста с нейтралізатора подається в водяной выносной теплообменник и снова возвращается в нейтралізатор. Целью данного исследования является определение оптимальных технологических параметров процесса нейтрализации продуктов сульфатирования и разработка математической модели данного процесса. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса нейтрализации продуктов сульфатирования водным раствором гидроксида натрия. При проведении исследований определялось влияние технологических параметров на качественные показатели продуктов нейтрализации, основным из которых является степень сульфатирования. Найдены оптимальные технологические параметры для проведения данного процесса в реакторе с мешалкой в лабораторных условиях. На основе полученных данных в основе данного процесса использование реактора непрерывного действия с турбинной мешалкой и с комбинированным теплообменником. Для перехода к промышленному реактору-нейтралізатору разработана математическая модель, дающая возможность методом математического моделирования скорректировать технологические параметры в промышленных условиях.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество, процесс нейтрализации, реактор с мешалкой, математическая модель, оптимальные технологические параметры.

О.М. DZEVOCHKO, M.O. PODUSTOV, I. H. LYSACHENKO, A. I. DZEVOCHKO, R. VOROZHBIAN

INVESTIGATION OF THE NEUTRALIZATION PROCESS OF SULFATION PRODUCTS IN THE SURFACTANTS PRODUCTION

The process of sulfation products neutralization in the production of surfactants is not basic, but at this stage the positive effects obtained at the stage of sulfation of organic matter with sulfur trioxide gas are fixed. To preserve the degree of sulfation obtained, it is necessary to carry out the neutralization process under conditions precluding the occurrence of hydrolysis in an acidic medium. The neutralization reaction takes place with a high heat release of about 40 kJ / mol. Analysis of the literature data showed that the neutralization process is not well covered. Little data and hardware and technological design of the process. The process of neutralization in industrial conditions is carried out in apparatus with mechanical

© О.М. Дзевочко, М.О. Подустов, І.Г. Лисаченко, А.І. Дзевочко, Р.М. Ворожбіян, 2021

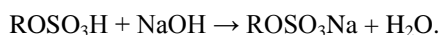
turbine mixers, to remove the heat of the exothermic reaction, the paste from the neutralizer is fed into a water-borne heat exchanger and returns to the neutralizer again. The purpose of this study is to determine the optimal technological parameters of the process of neutralization of sulfate products and the development of a mathematical model of this process. The results of experimental studies of the process of sulfation products neutralization with an aqueous solution of sodium hydroxide are presented. During the research, the influence of technological parameters on the quality indicators of neutralization products was determined, the main of which is the degree of sulfation. The optimal technological parameters for carrying out this process in a reactor with a stirrer under laboratory conditions were found. Based on the data obtained in the basis of this process, the use of a continuous-action reactor with a turbine mixer and with a combined heat exchanger. For the transition to an industrial reactor-neutralizer, a mathematical model has been developed, which makes it possible, by means of mathematical modeling, to correct technological parameters in industrial conditions.

Keywords: surfactant, neutralization process, stirred reactor, mathematical model, optimal technological parameters.

Вступ. Виробництво поверхнево-активних речовин складається з наступних основних стадій: отримання сульфатуючого агенту, сульфатування органічної сировини, нейтралізація продуктів сульфатування, очистка газових викидів [1].

На стадії отримання сульфатуючого агенту проводять каталітичне окислення двооксиду сірки до триоксиду сірки, на стадії сульфатування відбувається взаємодія триоксиду сірки з органічними продуктами, на стадії нейтралізації кислі продукти сульфатування нейтралізують водними розчинами лугів з отриманням готового продукту, на стадії очистки газових викидів нейтралізуються залишки двооксиду і триоксиду сірки водними розчинами лугів. Слід зазначити, що процес нейтралізації продуктів сульфатування у виробництві ПАР не є основним, проте на цій стадії закріплюються позитивні ефекти отримані на стадії сульфатування.

Одним з основних органічних продуктів для виробництва ПАР є вищі спирти. Основна реакція процесу нейтралізації продуктів сульфатування вищих спиртів наступна



Нейтралізовані продукти сульфатування характеризуються високою в'язкістю і піноутворенням. Для збереження отриманого ступеня сульфатування необхідно проводити процес нейтралізації в умовах, які виключають протікання гідролізу в кислому середовищі. Реакція проходить з великим виділенням тепла близько 40 кДж/моль. Аналіз літературних даних [2, 3] показав, що процес нейтралізації недостатньо висвітлений. Мало даних і по апаратурно-технологічному оформленню даного процесу.

Тому є необхідність у проведенні лабораторних досліджень. Хотілося б відзначити, що результати лабораторних досліджень переносити на дослідну або промислову установку потрібно з урахуванням показників масштабного переходу [4]. Одним з варіантів перенесення лабораторних досліджень є метод математичного моделювання [5]. Для розробки

математичної моделі необхідно провести аналіз апаратурного оформлення процесу нейтралізації, який застосовується в промислових умовах.

Процес нейтралізації в промислових умовах проводиться в апаратах з мішалками. Перемішування є одним з найбільш поширеним процесом в хімічній технології. Основне поширення набуло механічне перемішування. Найчастіше використовуються пропелерні і турбінні мішалки [6, 7]. Робочим органом пропелерної мішалки є втулка із закріпленим на ній лопатками зі змінним кутом нахилу. Турбінні мішалки мають прямі або похилі лопатки, які закріплені на ступиці або горизонтальному диску. У літературі [8] є опис процесу нейтралізації з турбінною мішалкою. У нейтралізатор безперервно подають продукти сульфатування і водний розчин гідроксиду натрію. Для зняття тепла екзотермічної реакції паста з нейтралізатора подається в водяний теплообмінник і знову повертається в нейтралізатор.

Структура потоків в нейтралізаторі залежить не тільки від конструкції мішалки, але і від способу установки її в апараті. Рідина, яка відкидається мішалкою в радіальному напрямку поблизу стінок апарату змінює напрямок руху на аксіальний, рухається вгору, на рівні рідини повертається вниз по центральній частині апарату. Щоб зменшити подачу рідини до стінки апарату встановлюють перегородки. Вони забезпечують додаткову турбулізацію рідини. Пропелерні і турбінні мішалки використовуються для рідких середовищ з відносно невисокою в'язкістю. Для більш в'язких середовищ використовуються пропелерні мішалки з внутрішнім дифузором. Певний інтерес представляють шнекові мішалки [9]. В цьому випадку апарат має внутрішній теплообмінник, по осі якого встановлено шнек. Однак в виробництвах поверхнево-активних речовин найбільшого поширення набули нейтралізатори з турбінною мішалкою та висосним теплообмінником.

Мета роботи. Метою даного дослідження є визначення оптимальних технологічних параметрів процесу нейтралізації продуктів сульфатування та розробка математичної моделі даного процесу.

Методика досліджень. Дослідження процесу нейтралізації проводилося на лабораторній установці що наведена на рисунку 1.

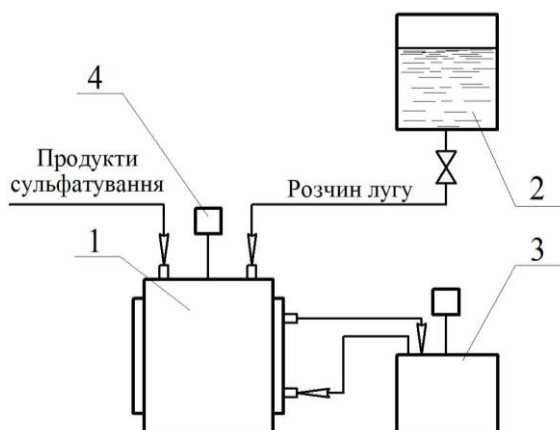


Рис 1. Схема лабораторної установки процесу нейтралізації:
1 – реактор-нейтралізатор; 2 – ємність розчину лугу;
3 – термостат; 4 – електродвигун мішалки

Робота на установці проводилася в наступному порядку. У реактор-нейтралізатор 1 завантажувалися продукти сульфатування в необхідній кількості. Після чого вмикали електродвигун мішалки 4. Одночасно вмикався термостат для підтримки розрахункової температури. З ємності 2 у відповідній кількості подавався водний розчин гідроксиду натрію з концентрацією 12% мас. Процес нейтралізації закінчувався при рН готового продукту на рівні 7,5-8,0. Вимірювання рН проводилось автоматично.

Раніше [10] нами проводилися дослідження процесу сульфатування вищих спиртів (ВС) фракцій C_{12} – C_{14} і суміші вищих спиртів фракцій C_{12} – C_{14} і моноетаноламідів жирних кислот (МЕА) кокосового масла. Було показано, що поверхнево-активні речовини отримані на основі такої вихідної сировини можуть знайти широке використання в різних галузях народного господарства. У зв'язку з цим для досліджень процесу нейтралізації були взяті продукти сульфатування саме такої сировини.

Результати досліджень. При проведенні досліджень визначався вплив технологічних параметрів на якісні показники продуктів нейтралізації, основним з яких є ступінь сульфатування. В першу чергу визначали залежність ступеню сульфатування від швидкості подачі водного розчину гідроксиду натрію (табл. 1). При цьому підтримувалась температура 313 К та число обертів мішалки 120 об/хв.

З табл. 1 видно, що при швидкій подачі розчину гідроксиду натрію (більше $3,0 \times 10^{-3}$ кг/(кг×с)) відбувається зниження ступеня сульфатування за раху-

нок місцевих перегрівів продуктів сульфатування. При тривалій подачі (менше $3,0 \times 10^{-3}$ кг/(кг×с)) також відбувається зниження ступеня сульфатування за рахунок гідролізу реакційної маси. Для подальших досліджень було обрано швидкість подачі водного розчину гідроксиду натрію $3,0 \times 10^{-3}$ кг/(кг×с).

У табл. 2 наведено дані залежності ступеня сульфатування органічної сировини від кількості обертів мішалки при температурі рівній 313 К.

Дані табл. 2 показують екстремальний характер такої залежності. При невеликій кількості обертів мішалки тепловідвід погіршується, виникають місцеві перегріву і ступінь сульфатування знижується. При великій кількості обертів реакційна маса піниться, що також призводить до погіршення тепловідводу, а значить до зниження ступеня сульфатування. Необхідно відзначити, що кращі показники якості реакційної маси були при різній кількості числах обертів мішалки: для вищих спиртів – 210 об/хв., для суміші вищого спирту і МЕА – 240 об/хв, що на нашу думку пов'язано з різною величиною в'язкості реакційних мас. Ці показники були взяті за основу для подальших досліджень.

У табл. 3 наведені дані залежності ступеня сульфатування органічної сировини від температури в реакторі-нейтралізаторі.

З наведених експериментальних даних видно, що характер залежності також екстремальний: оптимальною температурою реакційної маси на основі вищих спиртів є 313К, а для суміші вищого спирту і моноетаноламіда жирних кислот – 318К. Такі величини температур також пов'язані з величиною в'язкості реакційних мас.

Була перевірена можливість використання водного розчину гідроксиду натрію з вмістом в ньому 0,1-0,3% мас. сульфату натрію. Такі продукти можуть утворитися як рідкі відходи на стадії очищення газоповітряного потоку від газоподібного двооксиду сірки (табл. 4).

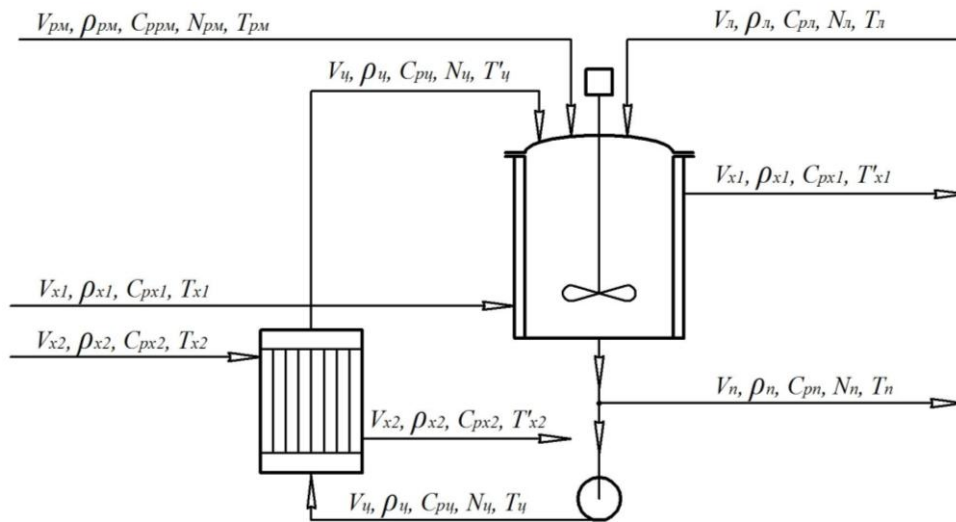
Як видно з табл. 4 присутність 0,1-0,3 % мас. сульфату натрію у водному розчині гідроксиду натрію практично не впливає на процес нейтралізації.

Другою частиною даної роботи є розробка математичної моделі процесу нейтралізації продуктів сульфатування в реакторі-нейтралізаторі. На основі отриманих літературних даних можна стверджувати що основною схемою даного процесу є використання апарату з турбінною мішалкою з зовнішнім охолодженням: зовнішня рубашка та виносний теплообмінник. Як видно це реактор неперервної дії з

комбінованим теплообмінником. Основою математичних моделей таких реакторів є рівняння, які відбивають закон збереження маси і енергії [11, 12]. Закон збереження маси відображають рівняння загального та покомпонентного матеріальних балансів. Закон збереження енергії записують у вигляді порівнянь балансів основних форм енергій теплової та кінетичної. Структура балансів рівнянь визначається структурою потоку в апараті. В даному випадку

структуру потоку можна представити у вигляді моделі ідеального змішення. Прийняття такого допущення справедливо в умовах інтенсивності перемішування реакційної маси в ємнісних апаратах з співвідношенням висоти до діаметру менше 1.

Схема матеріальних потоків процесу нейтралізації продуктів сульфатування може бути представлена наступним чином (див. рис. 2).



Рівняння теплового балансу

$$\frac{dQ}{dt} = \sum_{i=1}^p v_i \cdot \rho_i \cdot C_{pi} \cdot T_i - v_n \cdot \rho_n \cdot C_{pn} \cdot T_n - v_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{ц}} \cdot C_{\text{pc}} \cdot T_{\text{ц}} + \sum Q_{\text{T,CM}} \quad (6)$$

де Q – кількість тепла, кДж;

C_{pi}, C_{pc}, C_{pn} – молярна теплоємність i -го вхідного потоку, потоку рециркуляції і вихідного потоку, Дж/(моль·К);

$T_i, T_{\text{ц}}, T_n$ – температура i -го вхідного потоку, потоку рециркуляції і вихідного потоку, К;

$\sum Q_{\text{T,CM}}$ – сумарний результуючий тепловий потік, кДж/с;

$$i = 1 - p$$

Розглянемо доданок $\sum Q_{\text{T,CM}}$, який характеризує сумарний тепловий потік, який утворений джерелами та стоками речовини всередині реактора і теплообмінника

$$\sum Q_{\text{T,CM}} = \sum Q_{\text{V}} + \sum Q_{\text{F}} \quad (7)$$

де $\sum Q_{\text{V}}$ – сума об'ємних джерел і стоків теплоти, кДж;

$\sum Q_{\text{F}}$ – сума поверхневих джерел і стоків теплоти, кДж.

Для $\sum Q_{\text{V}}$ можна записати

$$\sum Q_{\text{V}} = V_{\text{рм}} \cdot \rho_{\text{рм}} \cdot q, \quad (8)$$

де q – тепловий ефект реакції, Дж/моль.

Для $\sum Q_{\text{F}}$ можна записати

$$\sum Q_{\text{F}} = -K_1 \cdot F_1 \cdot \Delta T_{x1} - K_2 \cdot F_2 \cdot \Delta T_{x2}, \quad (9)$$

де K_1, K_2 – коефіцієнти теплопередачі від потоку до охолоджуючої води в реакторі і теплообміннику, Вт/(м²·К);

F_1, F_2 – поверхня теплообмінника в реакторі і теплообміннику, відповідно, м²;

$\Delta T_{x1}, \Delta T_{x2}$ – різниця температур між потоком і охолодженою водою в реакторі і теплообміннику, К.

Враховуючи, що вхідних потоків 3, а вихідних 2 можна записати

$$\frac{dQ}{dt} = v_{\text{рм}} \cdot \rho_{\text{рм}} \cdot C_{\text{ррм}} \cdot T_{\text{рм}} + v_{\text{л}} \cdot \rho_{\text{л}} \cdot C_{\text{рл}} \cdot T_{\text{л}} + v_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{ц}} \cdot C_{\text{рц}} \cdot T_{\text{ц}} - v_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{н}} \cdot C_{\text{рн}} \cdot T_{\text{н}} - v_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{ц}} \cdot C_{\text{рц}} \cdot T_{\text{ц}}, \quad (10)$$

де $v_{\text{рм}}, v_{\text{л}}, v_{\text{ц}}, v_{\text{н}}, v_{x1}, v_{x2}$ – об'ємна витрата відповідно: реакційної маси, луку, потоку рециркуляції, готового продукту, охолоджуючої води в реактор, охолоджуючої води в теплообмінник, м³/с;

$\rho_{\text{рм}}, \rho_{\text{л}}, \rho_{\text{ц}}, \rho_{\text{н}}, \rho_{x1}, \rho_{x2}$ – молярна щільність відповідно: реакційній масі, луку, потоку рециркуляції, готового продукту, охолодженої води, кмоль/м³;

$C_{\text{ррм}}, C_{\text{рл}}, C_{\text{рц}}, C_{\text{рн}}, C_{\text{рх1}}, C_{\text{рх2}}$ – питома молярна теплоємність відповідно: реакційній масі, луку, потоку рециркуляції, готового продукту, охолодженої води, Дж/(кмоль·К);

$T_{\text{рм}}, T_{\text{л}}, T_{\text{ц}}, T_{\text{н}}, T_{x1}, T_{x1}', T_{x2}, T_{x2}'$ – температура відповідно: реакційної маси, луку, потоку рециркуляції на вході в теплообмінник, потоку циркуляції на виході з теплообмінника, температура готового продукту, температура охолоджуючої води на вході в реактор і на виході з реактора, температура охолоджуючої води на вході в теплообмінник і на виході із теплообмінника, К.

Рівняння 5 і 10 утворюють математичну модель процесу нейтралізації продуктів сульфатування при нестационарних умовах функціонування.

В стаціонарних умовах функціонування математична модель має вид

$$V_{\text{рм}} \cdot \rho_{\text{рм}} + V_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{ц}} - V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{н}} + \sum V \cdot f_{v,y} = 0 \quad (11)$$

$$V_{\text{рм}} \cdot \rho_{\text{рм}} \cdot C_{\text{ррм}} \cdot T_{\text{рм}} + V_{\text{л}} \cdot \rho_{\text{л}} \cdot C_{\text{рл}} \cdot T_{\text{л}} + V_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{ц}} \cdot C_{\text{рц}} \cdot T_{\text{ц}} - V_{\text{н}} \cdot \rho_{\text{н}} \cdot C_{\text{рн}} \cdot T_{\text{н}} - V_{\text{ц}} \cdot \rho_{\text{ц}} \cdot C_{\text{рц}} \cdot T_{\text{ц}} + V_{\text{рм}} \cdot \rho_{\text{рм}} \cdot q - K_1 \cdot F_1 \cdot \Delta T_{x1} - K_2 \cdot F_2 \cdot \Delta T_{x2} = 0 \quad (12)$$

Висновки. Знайдено оптимальні технологічні параметри процесу нейтралізації продуктів сульфатування у лабораторних умовах. Для переходу до промислового реактора-нейтралізатора розроблена математична модель, що дає можливість методом математичного моделювання скорегувати технологічні параметри для проведення даного процесу у промислових умовах.

Список літератури

1. Абрамсон А.А., Зайченко Л.П., Файнгольд С.И. Поверхностно-активные вещества: синтез, анализ, свойства, применение. Ленинград: Химия, 1988. 200 с.
2. Ланге К.Р. Поверхностно-активные вещества. Москва: Химия, 2004. 252 с.
3. Швердяев О.Н., Белов П.С., Шкитов А.М. Основы технологии поверхностно-активных веществ и синтетических моющих средств. Москва: МГОУ, 2001. 201 с.
4. Leng Douglas E. Mixing reactor scaling. Chem. Eng. Prog. 1991, vol. 87, no. 6. pp. 23–31.
5. Тябин Н.В., Голованчиков А.Б. Оценка масштабного эффекта при математическом моделировании структуры потока в аппаратах с мешалкой. Известия Вузов: Химия и химическая технология. 1981. Т. 24, вып. 31. С. 361 – 365.
6. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Часть 1. Москва: Химия, 1995. 425 с.
7. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. В двух книгах. Книга 1 / ред. В.Г. Айнштейн. Санкт-Петербург: Издательство «Лань», 2019. 916 с.
8. Николаев П.В., Козлов Н.А., Петрова С.Н. Основы химии и технологии производства синтетических моющих средств. Иваново: ИГХТУ, 2007. 116 с.
9. Игнатович Э. Химическая техника. Процессы и аппараты. Часть 2. Москва: Техносфера, 2007. 286 с.
10. Дзевочко О.М., Подустов М.О. Дослідження процесу сульфатування органічних речовин газоподібним триоксидом сірки // Інтегровані технології та енергозбереження. 2018. № 2. С. 50 – 56.
11. Голованчиков А.Б., Тябин Н.В. Математические модели аппаратов при перемешивании // Теоретические основы химической технологии. 1983. Т. 17, № 4. С. 502 – 509.
12. Царева З.М., Товажнянский Л.Л., Орлова Е.И. Основы теории химических реакторов. Компьютерный курс. Москва: Высшая школа, 1997. 624 с.
2. Lange K.R. Poverhnostno-aktivnyie veschestva [Surfactants]. Moskva, Himiya Publ., 2004. 252 p.
3. Sheverdyayev O.N., Belov P.S., Shkitov A.M. Osnovy tehnologii poverhnostno-aktivnyih veschestv i sinteticheskikh moyuschih sredstv [Fundamentals of surfactants and synthetic detergents technology]. Moscow MGOU Publ., 2001. 201 s.
4. Leng Douglas E. Mixing reactor scaling. Chem. Eng. Prog. 1991, vol. 87, no. 6. pp. 23–31.
5. Tyabin N.V., Golovanchikov A.B. Otsenka masshtabnogo effekta pri matematicheskom modelirovanii struktury potoka v apparatah s meshalkoy [Estimation of the scale effect in the mathematical modeling of the flow structure in the apparatus with a mixer]. Izvestiya Vuzov: Himiya i himicheskaya tehnologiya. 1981, vol. 24, no. 31, pp. 361–365.
6. Dytnerskiy Yu.I. Protsessy i apparaty himicheskoy tehnologii. Chast 1 [Processes and devices of chemical technology. Part 1]. Moskva, Himiya Publ., 1995. 425 p.
7. Protsessy i apparaty himicheskoy tehnologii. Obschiy kurs. V dvuh knigah. Kniga 1 [Processes and devices of chemical technology. General course. In two books. Book 1]. Sankt-Piterburg, «Lan» Publ., 2019. 916 p.
8. Nikolaev P.V., Kozlov N.A., Petrova S.N. Osnovy himii i tehnologii proizvodstva sinteticheskikh moyuschih sredstv [Fundamentals of chemistry and production technology of synthetic detergents]. Ivanovo, IGHTU Publ., 2007. 116 p.
9. Ignatovich E. Himicheskaya tehnika. Protsessy i apparaty. Chast 2 [Chemical technology. Processes and devices. Part 2.]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2007. 286 p.
10. Dzevochko O.M., Podustov M.O. Doslidzhennia protsesu sulfatuvannia orhanichnykh rehovyn hazopodibnym tryoksydom sirky [Investigation of sulfation process of organic substances with gaseous sulfur trioxide]. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. 2018, no 2, pp. 50–56.
11. Golovanchikov A.B., Tyabin N.V. Matematicheskie modeli apparatov pri peremeshivanii [Mathematical models of devices with mixing]. Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii. 1983. vol. 17, no. 4, pp. 502–509.
12. Tsareva Z.M., Tovazhnyanskiy L.L., Orlova E.I. Osnovy teorii himicheskikh reaktorov. Kompyuterniy kurs [Fundamentals of the theory of chemical reactors. Computer course]. Moskva, Vysshaya shkola Publ., 1997. 624 p.

References (transliterated)

Надійшла (received) 09.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дзевочко Олександр Михайлович (Дзевочко Александр Михайлович, Dzevochko Oleksandr Mykhailovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу; м.Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1297-1045>; e-mail: sashadzevochko@ukr.net

Подустов Михайло Олексійович (Подустов Михаил Алексеевич, Podustov Mykhaylo Oleksiiovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу; м.Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2119-1961>; e-mail: podustov@kpi.kharkov.ua

Лисаченко Ігор Григорович (Лысаченко Игорь Григорьевич, Lysachenko Ihor Hryhorovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу; м.Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3723-8587>; e-mail: ihor.gr.lis@gmail.com

Дзевочко Альона Ігорівна (Дзевочко Алёна Игоревна, Dzevochko Alona Ihorivna) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри автоматизації технологічних систем та екологічного моніторингу; м.Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5988-5577>; e-mail: adzevochko@ukr.net

Ворожбіян Роман Михайлович (Ворожбян Роман Михайлович, Vorozhbiyan Roman) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри автоматизації технологічних систем та комп'ютерного моніторингу; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6517-7446>; e-mail: vorozhbiyan.r@gmail.com