

АНОТАЦІЯ

Хухрянський О.М. **Гідродинамічні та тепломасообмінні характеристики модульних комбінованих тарілчасто-насадкових контактних секцій.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. – Сумський державний університет, Суми, 2021

Дисертаційна робота присвячена дослідженню тепломасообмінного обладнання для сорбційних процесів при безпосередньому контакті газу і рідини з використанням комбінованих блокових тарілчасто-насадочних апаратах, а також більш глибокому опису цього процесу, що є актуальним завданням хімічної технології. Продуктивність колон, секціонованих тарілками провального типу, легко збільшити, застосувавши тарілки з великим вільним перетином. Однак, такі тарілки мають невелику ефективність тому, що вони працюють при великих величинах бризкоунесення. Однією з сучасних тенденцій є суміщення та комбінування в одному апараті тарілчастих та насадкових контактних пристроїв.

Було запропоновано в сепараційний простір між провальними тарілками помістити спеціальні сепаратори для зменшення шкідливого впливу бризкоунесення на ефективність провальних тарілок. Такі сепаратори працюють у якості стабілізаторів пінного шару при роботі апарату у розвиненому барботажному режимі, а також самі є додатковою зоною контакту фаз. Тому перспективним напрямком є впровадження суміщених та комбінованих в одному апараті тарілчастих та насадкових контактних пристроїв. Розроблена конструкція дозволяє забезпечити інтенсифікацію процесів тепло- і масообміну за рахунок розривів плівки рідини, та підвищує локальні коефіцієнти масовіддачі, в результаті використання кінцевих ефектів барботажу для яких характерне постійне оновлення границі розділу взаємодіючих фаз.

За рахунок цього можна підвищити ефективність та інтенсивність

процесів розділення, уникнути бризковіднесення рідини у вже діючих колонних тепломасообмінних апаратах.

В апаратах із комбінованими контактними секціями більш високі значення коефіцієнтів масопередачі отримуються при менших питомих енерговитратах, що визначає їх високу енергоефективність. У той же час масообмінні процеси на комбінованих тарілчасто-насадкових секціях в активних гідродинамічних режимах вивчені недостатньо.

При виконанні дисертаційної роботи використовували фізичні та фізико-хімічні методи аналізу. Фізичний експеримент було проведено шляхом експериментальних випробувань гідродинамічних та масообмінних характеристик на лабораторній моделі комбінованого тепломасообмінного апарату. Під час експериментальних досліджень використовували методи візуального спостереження поведінки двофазної системи всередині контактного елемента, визначали гідродинамічні характеристики методами інструментальних вимірювань та залучали методи фізико-хімічного аналізу для якісного і кількісного складу сумішей. Графічна інтерпретація та статистична обробка результатів досліджень проводилася із застосуванням методів математичної статистики з використанням прикладних комп'ютерних програм.

У дисертації наведені розроблені моделі взаємодії потоків у комбінованих блочних тарілчасто-насадкових пристроях, що дозволяють визначити гідродинамічні показники та характеристики процесу.

Запропоновано механізм формування фазових потоків у блочному контактному елементі; було виявлено існування кількох зон газорідинної системи. Під час фізичних моделювань були визначені гідродинамічні характеристики та граничні режими роботи контактних секцій.

Робочими середовищами в гідродинамічних експериментах виступали повітря та вода. Випробування проводилися для декількох модифікацій комбінованих контактних блоків, які відрізнялися один від одного наявністю одного або двох стабілізаторів, встановлених на відстані від провальної

тарілки, а також із відстанню між стабілізаторами.

При застосуванні стабілізатора була отримана більш однорідна газорідинна високо структурована та турбулізована система. За допомогою розробленої конструкції стабілізаторів вдалося досягти направлення газових та рідинних потоків і рівномірно розподіляти по всій площі перетину апарату взаємодіючі фази, нівелювати байпасування та зменшити розгойдування газорідинного шару, збільшити висоту піни, зменшити зону бризків та їх кількість, а в результаті збільшити поверхню масообміну. При встановленні двох стабілізаторів спостерігалось значне зменшення зони бризків, оскільки наявність стабілізатору за рахунок його конструкції та вхідних ефектів, які проявляються на кінці кожної ламелі, розподіляє вловлені бризки по всій геометричній поверхні, тим самим створює додаткову поверхню масообміну. Другий стабілізатор виконує роль бризковловлювача.

Отримані залежності висоти пінного шару, гідродинамічного опору контактної ступені для визначення основних робочих параметрів даної конструкції колонного апарату з комбінованими контактними елементами. Встановлено, що дірчасті тарілки провального типу середнього вільного перетину працюють більш стійко, ніж тарілки провального типу із меншим вільним перетином.

Обґрунтовані конструктивні признаки стабілізаторів пінного шару, необхідні для досягнення високого ступеня розділення. Встановлена висота розташування стабілізатора над полотном тарілки у діапазоні 100-120 мм. Показано, що при застосуванні стабілізаторів пінного шару газовміст на контактній ступені скорочується, що призводить до більш стабільної та рівномірної роботи апарату.

В роботі представлено механізм бризковіднесення в комбінованому контактному елементі та приведені емпіричні залежності для визначення величини бризковіднесення. Наведені рівняння для розрахунку нижньої та верхньої межі роботи комбінованого контактного елемента.

Запропоновано модель масопереносу при абсорбції двоокису вуглецю.

Вона дозволяє, задавши концентрацією двоокису вуглецю в рідині в верхньому і нижньому перетині контактної пристрою, визначити необхідну висоту контактної блоку.

Показано, що в комбінованих тарілчасто-насадкових секціях, які працюють у стабільному пінному режимі, протікає інтенсивне перемішування фаз, що призводить до зростання величини поверхні контакту і швидкості її оновлення, а також стримується у певному діапазоні (до 0,7) величина газовмісту.

На підставі фізичного моделювання було визначено залежності для розрахунку ефективності роботи комбінованих тарілчасто-насадкових секцій від режимних та конструктивних параметрів, які адекватно описують процеси, що спостерігались при експериментальних дослідженнях, та показують достатньо високу кореляцію із експериментальними даними в межах від 5 до 20%.

Запропоновано вдосконалений комбінованими тарілчасто-насадковими контактними секціями апарат для промивання газу колон I та II у виробництві кальцинованої соди, а також використання досліджених конструкцій у скруберах для уловлювання пилу або органічних речовин.

В промислових умовах при модернізації діючих технологічних ліній виробництва кальцинованої соди при використанні результатів дисертаційної роботи запропонована система очистки технологічних газів забезпечить ступінь очищення від 96,4 – 99,0 %, а показники процесу сепарації будуть відповідати вимогам, які необхідні для надійного функціонування технологічних ліній.

На основі виконаних в роботі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено науково обґрунтовані практичні рекомендації до проектування та інженерних методик для розрахунку колонних апаратів із використанням блочних тарілчасто-насадкових контактних елементів на основі комбінованого принципу з метою підвищення ефективності процесів сепарації та зниження гідравлічного опору, з визначенням раціональних

конструктивних параметрів елементів сепараційних систем. Результати роботи та експериментальних досліджень, що представлені у вигляді графічних залежностей, рівнянь та алгоритму розрахунку колонних апаратів впроваджені при виконанні господарчих договорів, науково-дослідних робіт та у навчальному процесі, що підтверджується відповідними актами.

Розроблено та захищено патентами України на корисну модель конструкцію стабілізатору пінного шару, пристрою для розділення двокомпонентних емульсій, пінного апарату, комбінованого тепломасообмінного апарату і підігрівача-деемульсатора типу «Heater-Treater», використання яких у активному гідродинамічному режимі сприяє підвищенню ефективності масопередачі при порівняно незначному збільшенні гідравлічного опору. Розроблені конструкції можуть використовуватися для поліпшення роботи діючих барботажних та сепараційних апаратів.

Ключові слова: процес очищення; гідродинаміка, масообмін; пінний апарат; пінний шар, дослідження процесів абсорбції та десорбції; стабілізація пінного шару; інтенсифікація, стабілізатор.

SUMMARY

Khukhrianskyi O.M. *Hydrodynamic and heat and mass transfer characteristics of modular combined disk-packed contact sections.* – Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

The dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy by specialty 161 – Chemical Technologies and Engineering. – Sumy State University, Sumy, 2021.

The dissertation work is devoted to the study of heat and mass transfer equipment for sorption processes in direct contact of gas and liquid using combined plate-packed bed block in column apparatuses, as well as a deeper description of this process, which is an actual task of chemical technology. The capacity of columns, sectioned by trays of the failure type, can be easily increased by using trays with a large free section. However, such trays have little efficiency because they operate at high splash removal. One of the modern tendencies is the combination and combination of trays and packed contact devices in one apparatus.

It was proposed to place special separators in the separation space between the hole plates to reduce the harmful effect of splashing on the efficiency of the hole plates. Such separators work as foam layer stabilizers when the device is operating in a developed bubbling mode, and they themselves are an additional phase contact zone, so the introduction of combined plate- packed bed contact devices in one column is a promising direction of scientific research. Therefore, a promising direction is the use of trays and packed contact devices combined in the column apparatus. The developed design makes it possible to intensify the processes of heat and mass transfer due to liquid film ruptures and increases the local coefficients of mass transfer, because of using the bubbling final effects, which are characterized by a constant renewal of multiphase interface. It is possible to increase the efficiency and intensity of separation processes, avoid liquid splashing in existing column heat and mass transfer devices.

In devices with combined contact sections, higher values of mass transfer

coefficients are obtained with lower specific energy consumption, which determines their high energy efficiency. At the same time, mass transfer processes in combined tray-packed sections in active hydrodynamic modes have not been sufficiently studied.

Physical and physicochemical methods of analysis were used for the dissertation work. The physical experiment was carried out by experimental tests of the hydrodynamic and mass transfer characteristics of a combined heat and mass transfer laboratory apparatus. In experimental studies, methods of visual observation of the two-phase system behavior inside a contact element were used, hydrodynamic characteristics were determined by methods of instrumental measurements, and methods of physicochemical analysis were used for the qualitative and quantitative composition of mixtures. Graphic interpretation and statistical processing of research results were carried out using the mathematical statistics methods using applied computer programs.

The dissertation presents the developed models of flow interaction in combined block plate-packed bed devices that allow us to determine the hydrodynamic parameters and characteristics of the process.

A mechanism for the formation of phase flows in a block contact element is proposed; the existence of several zones of the gas-liquid system is revealed. During physical simulations, the hydrodynamic characteristics and limit modes of operation of the contact sections were determined.

The air and water were used as working media in hydrodynamic experiments. The tests were carried out for several modifications of the combined contact blocks, differing from each other by the presence of one or two stabilizers installed at a distance from the tray, as well as with the distance between the stabilizers.

When using the stabilizer, a more homogeneous gas-liquid structured and turbulized system was obtained. With the help of the developed design of stabilizers, it was possible to achieve a uniform direction of gas and liquid over the entire cross-sectional area of the apparatus. It was also possible to level the bypass and reduce the swinging of the gas-liquid layer, increase the foam height, reduce

the area of splashes and their amount, because of which an increase in the mass transfer surface is achieved. When installing two stabilizers, a significant reduction in the splash zone was observed, since the presence of a stabilizer due to its design and input effects manifested at the end of each lamella distributes splashes over the entire geometric surface, thereby creating an additional mass transfer surface. In this case, the second stabilizer acts like a spray trap.

Dependences of the foam layer height and hydrodynamic resistance of the contact stage are obtained to determine the main operating parameters of the column device with combined contact elements under consideration. It is established that hole plates with a larger free cross-section work more stable than hole plates of with a smaller free cross-section.

The design characteristics of foam layer stabilizers necessary for achieving a high degree of separation are justified. The set height of the stabilizer above the plate is in the range of 100-120 mm. It is shown that when using foam layer stabilizers, the gas content in foam at the contact stage is reduced, which leads to more stable and uniform operation of the device.

In the dissertation work presented the mechanism of splash removal in a combined contact element and provides empirical dependences for determining the amount of splash. Equations for calculating the lower and upper limits of operation of a combined contact element are given. A model of mass transfer during the absorption of carbon dioxide is proposed. It allows, given the concentration of carbon dioxide in the liquid in the upper and lower sections of the contact device, to determine the required height of the contact block.

It is shown that intensive mixing of phases occurs in combined tray-packed sections operating in a stable foam mode, which leads to an increase in the size of the contact surface and the rate of its renewal, and restrains the gas content in a certain range (up to 0.7).

Based on physical modelling, the dependences for calculating the efficiency of the combined contact element on the mode and design parameters were determined, which adequately describe the processes observed in experimental

studies, and show a fairly high correlation with experimental data in the range of 5-20%,

An improved device for washing air filters and a gas washer of columns I and II in the production of soda ash, as well as the use of the studied structures in scrubbers for capturing dust or organic substances, are proposed with combined plate- packed bed contact sections.

In industrial conditions, when modernizing existing process lines for the production of soda ash, when using the results of the dissertation work, the proposed process gas purification system will provide a degree of purification from 96,4 – 99,0%, and the indicators of the separation process will meet the requirements that are necessary for the reliable operation of process lines.

Based on the theoretical and experimental studies performed in the work, scientifically based practical recommendations for the design and engineering methods for calculating column apparatuses using block plate- packed bed contact elements based on a combined principle are developed in order to increase the efficiency of separation processes and reduce hydraulic resistance, with the determination of rational design parameters of elements of separation systems. The results of the work are implemented in business contracts, research projects and in the educational process, which is confirmed by the relevant acts of application.

The design of a foam layer stabilizer, a device for separating two-component emulsions, a foam apparatus, a combined heat and mass transfer apparatus, and a heater-demulsifier of the "Heater-Treater" type has been developed and protected by Ukrainian patents for a useful model. The use of these structures in an active hydrodynamic regime contributes to an efficiency increase of mass transfer with a relatively insignificant increase in hydraulic resistance. The developed designs can be used to improve the operation of the existing separation and bubbling apparatus.

Keywords: purification process; hydrodynamics, mass transfer; foam apparatus; foam layer, study of absorption and desorption processes; foam layer stabilization; intensification, stabilizer.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Моїсєєв В.Ф., Манойло Є.В., Ляпощенко О.О., Хухрянський О.М., Пономарьова Н.Г. Структура пінного шару на протитечійних контактних елементах зі стабілізацією. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях.* 2018. №2 6 (1302). Т. 2. С. 83-92. DOI: 10.20998/2413-4295.2018.26.37.

Здобувач приймав участь у експериментальних дослідженнях, обробці результатів та формуванні висновків.

2. Liaposhchenko O., Moiseev V., Ochowiak M., Manoilo E., Khukhryansky O. Intensification of Foam Layered Apparatus by Foam Stabilization. *Journal of Engineering Sciences.* 2018. Vol. 5, Issue 2. P. F13-F18. DOI:10.21272/jes.2018.5(2).f3.

Здобувач провів літературний огляд за темою, поставив завдання дослідження та приймав участь у обробці та інтерпретації експериментальних даних.

3. Liaposhchenko O.O., Moiseev V.F., Marenok V.M., Khukhryansky O.M., Starynsky O.Ye., Kovtun V.V. Simulation of chemical and technological processes of a hydrocarbon preparation plant. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering.* — 2019. — Volume 6. — Issue 1. — P.7-13. DOI: 10.31471/2311-1399-2019-1(11)-7-13.

Здобувачем проведено моделювання процесів в тарілчастих і насадкових контактних секціях абсорбційного та ректифікаційного колонного обладнання.

4. Moiseev V., Liaposhchenko O., Trebuna P., Manoilo E, Khukhryansky O. Properties of heat and mass transfer processes in the tubular grids with the heat exchanger as a stabilizer. *Lecture Notes in Mechanical Engineering.* — Springer, 2020. — P. 795-804. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_79

(Scopus, Web of Science, закордонне фахове видання)

Здобувач проаналізував експериментальні данні та провів їх статистичну обробку, розрахував коефіцієнти емпіричних рівнянь.

5. Moiseev V., Liaposhchenko O., Manoilo E., Khukhryansky O. Demianenko M. Hydrodynamic Parameters of a Combined Contact Device. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. — Springer, 2021. — P. 257-267. DOI: 10.1007/978-3-030-77823-1_26.

(Scopus, закордонне фахове видання)

Здобувач приймав участь у розробці математичної моделі, алгоритмів розрахунку, які дозволяють оцінити гідродинамічні параметри комбінованого контактного елемента.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Liaposhchenko O., Pavlenko I., Ivanov V., Demianenko M., Starynskyi O., Kuric I., Khukhryansky O. Improvement of Parameters for the Multi-Functional Oil-Gas Separator of 'HEATER-TREATER' Type. *6th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2019*. Tokyo, Japan: Waseda University, IEEE, 2019. P. 66-71. DOI: [10.1109/IEA.2019.8715203](https://doi.org/10.1109/IEA.2019.8715203)

7. Moiseev V., Manoilo E., Hrubnic A., Liaposhchenko A., Khukhryansky O. Reducing of gas emissions from the production of calcinated soda ash. International joint forum LEA'2018 & YSTCMT'2018, November 22-24, 2018, Lviv, Ukraine. URL: <https://openreviewhub.org/lea-2018/paper/reducing-gas-emissions-production-calcinated-soda-ash>.

8. Ляпощенко О.О., Моїсєєв В.Ф., Манойло Є.В., Хухрянський О.М. Застосування блочно-комбінованих контактних елементів у колонних апаратах. *Освіта, наука та виробництво: розвиток та перспективи: матеріали IV Всеукраїнської науково-методичної конференції*, м. Шостка, 18 квітня 2019 р. / Шосткинський інститут СумДУ, Суми, 2019. С. 16.

9. Liaposhchenko O., Moiseev V., Manoilo E., Khukhryansky O. Foam layered apparatus with foam stabilization. *2nd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»*: Lviv, June 24–28th, 2019 / Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2019. P. 72-73. URL:

<https://openreviewhub.org/cte-2019/paper/foam-layered-apparatus-foam-stabilization>.

10. Ляпощенко О.О., Хухрянський О.М. Інтенсифікація та підвищення екологічної безпеки абсорбційних систем шляхом стабілізації пінного шару. *Освіта, наука та виробництво: розвиток та перспективи*: матеріали V Всеукраїнської науково-методичної конференції / м. Шостка, 23 квітня 2020 р. / Шосткинський інститут СумДУ, Суми, 2020. С. 10-11.

11. Liaposhchenko O.O. Khukhryansky O. Improvement and intensification of environmental safety of absorbing systems by stabilization of foam layer. *Екологічна безпека держави: тези доповідей XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів* / м. Київ, 23 квітня 2020 р. / Національний авіаційний університет, Київ: НАУ, 2020. С. 19-20.

12. Шах А.Д., Михайловський Я.Е., Старинський О.Є., Дем'яненко М.М., Хухрянський О.М., Ляпощенко О.О. Особливості розрахунку фазової рівноваги у парорідинних багатокомпонентних системах. *Сучасні технології у промисловому виробництві*: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – С. 269-270.

13. Liaposhchenko O.O., Khukhryansky O. Improvement of environmental safety of gas-liquid sorbing systems by stabilization of foam layer. *Екологічна безпека держави: тези доповідей XV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів* / м. Київ, 22 квітня 2021 р. / Національний авіаційний університет. Київ: НАУ, 2021. С. 21-22

14. Liaposhchenko O., Khukhryansky O. Gas-liquid layer height in a countercurrent combined contact device. *Освіта, наука та виробництво: розвиток та перспективи*: матеріали VI Всеукраїнської науково-методичної конференції / м. Шостка, 22 квітня 2021 р. / Шосткинський інститут СумДУ, Суми, 2021. С. 19-20.

15. Ляпощенко О.О., Моїсєєв В.Ф., Хухрянський О.М., Сейф Хуссейн. Моделювання процесів сепарації та тепломасообміну у дво- та трифазних

багатокомпонентних системах. *Сучасні технології у промисловому виробництві*: матеріали та програма VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції. – Суми: Сумський державний університет, 2021. – С.210.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

16. Стабілізатор пінного апарата: Пат. № 138876 U Україна, МПК (2020.01) B01D 47/00. № у 201905820; Заявлено 27.05.2019; Надрук. 10.12.2019, Бюл. № 23. 2019.

17. Пінний апарат: Пат. № 141351 U Україна, МПК (2020.01) B01D 47/04. — № у 201907739; Заявлено 09.07.19; Надрук. 10.04.2020, Бюл. № 7, 2020.

18. Комбінований тепломасообмінний апарат. Пат. № 141368 U Україна, МПК (2020.01) B01D47/04. — № у 201908389; Заявлено 16.07.19; Надрук. 10.04.2020, Бюл. № 7, 2020.

19. Пристрій для розділення двокомпонентних емульсій: Пат. №144878 U Україна, МПК (2020.01) B01D 17/02 (2006.01) B03C 5/00. — № у 202003764; Заявлено 22.06.2020; Надрук. 26.10.2020, Бюл. № 20, 2020.

20. Підігрівач-деемульсатор типу «Heater-Treater»: Пат. №147128 U Україна, МПК (2020.01) B01D 17/02 (2006/01) B01D 19/00. — № у 202006971; Заявлено 30.10.2020; Надрук. 15.04.2021, Бюл. № 15, 2021.