

УДК 66.069.833:[66.048.3+66.071.2+66.061.35](048.83)

## КОНСТРУКЦІЇ КІЛЬЦЕВИХ НАСАДОК МАСООБМІНИХ АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ І СПОРІДНЕНИХ ВИРОБНИЦТВ

Мікульонок І.О., д.т.н.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тел. (044) 204-84-30

**Анотація** – розроблено класифікацію кільцевих насадок масообмінних апаратів харчових і споріднених виробництв. Розглянуто приклади конструктивного оформлення вітчизняних і закордонних неупорядкованих і впорядкованих кільцевих насадок, а також проаналізовано їхні переваги й недоліки.

**Ключові слова** – масообмінний апарат, кільцева насадка, класифікація, конструкція.

*Постановка проблеми.* Насадкові апарати є одними з найбільш розповсюджених видів масообмінного обладнання харчових, хімічних, нафтохімічних, нафтопереробних і деяких інших виробництв. На відміну від тарілчастих і плівкових масообмінних апаратів конструкція насадкових апаратів не передбачає наявності пристроїв для розподілу оброблюваних фаз по кожному окремому контактному елементу. Крім того, насадкові контактні елементи зазвичай достатньо дешеві, а також прості у виготовленні та експлуатації [1–6].

*Аналіз останніх досліджень.* Одними з найбільш простих, але достатньо ефективних контактних елементів насадкових масообмінних апаратів є кільцеві насадки й, насамперед, запропоновані понад сторіччя тому німецьким хіміком-технологом Фрідріхом Августом Рашигом (також іменованим Фрицем Рашигом) (Friedrich August Raschig (Fritz Raschig); 1863–1928) металеві або керамічні кільцеві контактні елементи, названі на його честь «кільцями Рашига» (Raschig rings) і призначені для заповнення ними колонних апаратів з метою фракційної дистиляції органічних речовин у масообмінних колонах.

*Формулювання основних цілей.* Традиційні кільця Рашига представляють собою прямий коловий кільцевий циліндр, зовнішній діаметр якого дорівнює його висоті (тобто із круглими основами, перпендикулярними його поздовжній осі; рис. 1).

Згодом цю насадку було дещо вдосконалено. Так з'явилися

рифлені кільця, кільця з поздовжніми перегородками й кільця Палля, які були трохи складніші за кільця Рашига, але за однакових габаритів відрізнялися від них більшою питомою поверхнею й більш розвиненою гідродинамікою оброблюваних фаз.

*Основна частина.* Кільця Рашига, як і сідла Берля, належать до першого покоління насадок, активне використання яких тривало з 1895 по 1950 р. Для другого покоління насадок (кінець 1950-х – початок 1970-х р.р.) характерне використання кілець Палля й сідел Інталокс, для третього (кінець 1970-х – 1990-і р.р.) – кілець СМР, Nutter і ІМТР. До четвертого ж покоління насадок, що почалося з 1990-х рр., належать суперкільця Рашига (Raschig super-rings) [7]. Однак «кільця» останніх двох поколінь насадки в буквальному значенні цього слова не є кільцями, оскільки представляють собою насадки, виготовлені штампуванням з переважно прямокутної металевої або полімерної (пластмасової) заготовки із численними надрізнаними й вигнутими фрагментами. Тому надалі розглядатимемо лише дійсно кільцеві насадки, основу яких становить замкнена оболонка із двома відкритими основами (за винятком оболонок-багатогранників із плоскими або майже плоскими гранями, наприклад, згідно з міжнародними заявками № WO2005/021152A1, WO03/074168A1, пат. України № 1321 U, 1675 U, 1724 U, 2229 U, 3069 U, 12700 U, Росії № 2456070 С2).



Рис. 1. Керамічні кільця Рашига.

Незважаючи на широке поширення зазначених типів кільцевих насадок, розробниками нової техніки й технології пропонуються все нові конструкції кільцевих насадок з різноманітних матеріалів [5]. Аналіз наявних конструкцій дав змогу здійснити класифікацію кільцевих насадок за такими основними групами показників:

- способом укладання у контактній частині апарата;
- еквівалентним діаметром;
- матеріалом;
- зовнішньою формою;
- конструкцією;

- ступенем суцільності оболонки;
- ступенем рухомості конструктивних компонентів насадки один відносно одного;
- можливістю регулювання питомої поверхні;
- можливістю регулювання насипної щільності;
- реалізованою гідродинамікою оброблюваних фаз;
- можливістю підтримки заданої температури.

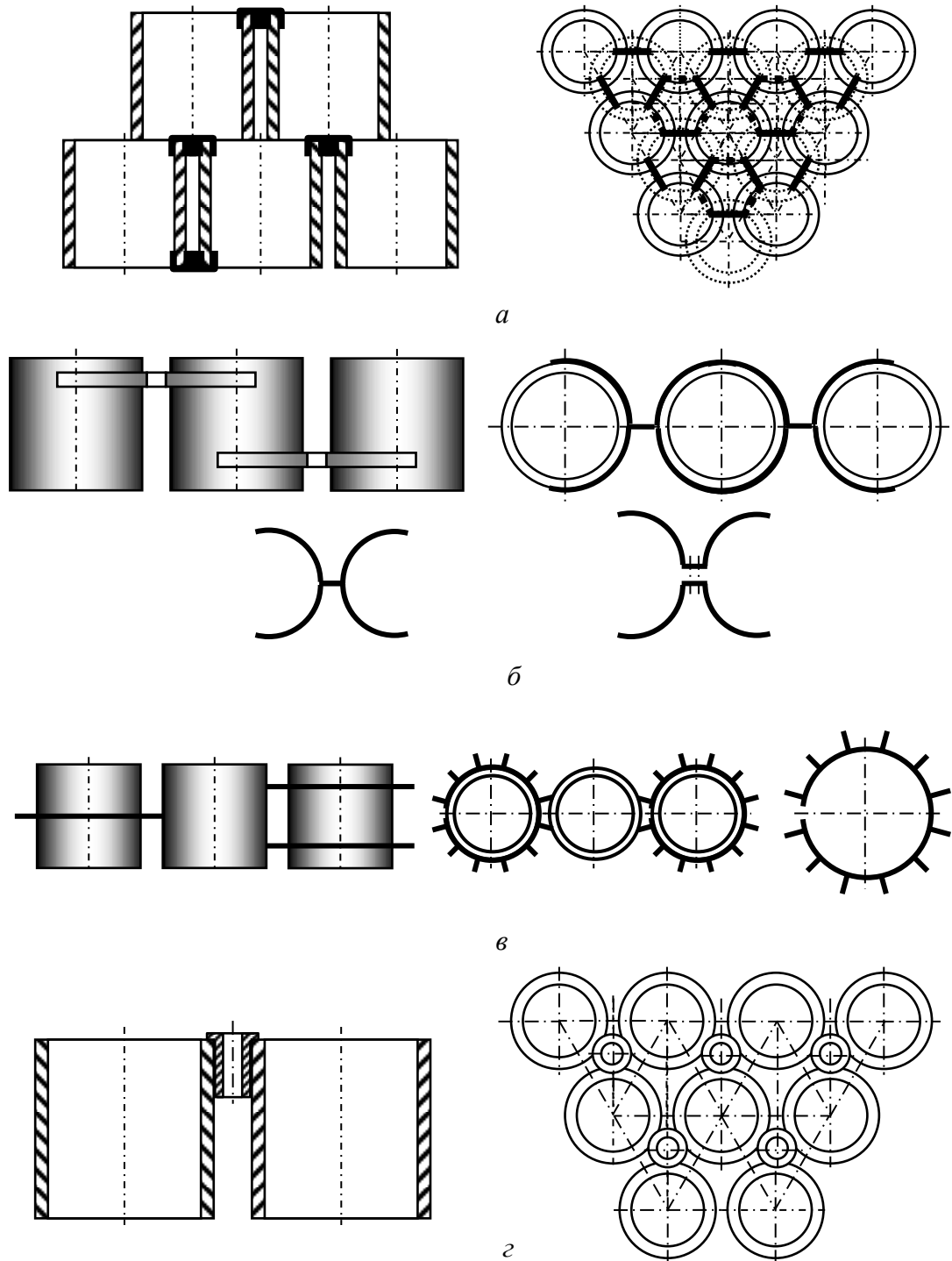
*За способом укладання в апараті* розрізняють невпорядковану (нерегулярну) і впорядковану (регулярну) насадку. Невпорядковане завантаження використовують для насадок довільного розміру, а впорядковану – найчастіше для великих і середніх елементів насадки (еквівалентний діаметр не менше 50 мм). Переваги регулярної насадки – менший гідравлічний опір і великі швидкості легкої фази, а основні недоліки – відносна складність операцій завантаження й вивантаження (особливо для великогабаритних апаратів) і нерівномірність потоків фаз по поперечному перерізу контактної частини (аж до байпасування фаз поблизу стінок корпусу внаслідок зниженого гідравлічного опору [3, 6]).

Традиційні кільця Рашига (залежно від розміру) і більшість інших кільцевих насадок у багатьох випадках можна використовувати як невпорядковану, так і впорядковану насадку. У той же час розроблено конструкції кільцевих насадок, призначені лише як впорядкована насадка (пат. України № 6504 U, 36110 U). При цьому запропоновано насадку з проточкою й розточкою з протилежних торців елемента для можливості з'єднання по довжині декількох елементів і в такий спосіб зміни довжини складеного насадкового елемента (пат. України № 106349 U).

Для забезпечення певної відстані між сусідніми в межах кожного шару елементами впорядкованої насадки запропоновано спеціальний пристрій у вигляді m-подібної скоби (пат. України № 75745 U). Розроблені й інші аналогічні конструкції (пат. України № 107206 U, 107208 U, 107209 U (рис. 2)). Із цією самою метою на одному з торців оболонки елемента виконують виступи й западини, що чергуються між собою та забезпечують фіксацію елемента насадки відносно зміщених елементів сусідніх шарів насадки (пат. України № 42586 U).

*За еквівалентним діаметром* елементи насадок поділяють на великі (еквівалентний діаметр не менше 100 мм), середні (від 50 до 100 мм) і малі (менше 50 мм). Зі зменшенням розміру збільшується питома поверхня насадки, але одночасно зменшується вільний об'єм, а, отже, й зростає гідравлічний опір. Тому малу насадку часто використовують для проведення масообмінних процесів за підвищеного тиску, коли втрата напору в апараті незначна порівняно з

робочим тиском.



*a* – пат. України № 75745 U; *б* – пат. України № 107206 U; *в* – пат. України № 107208 U; *г* – пат. України № 107209 U.

Рис. 2. Пристрої для забезпечення потрібної відстані між сусідніми в межах кожного шару елементами впорядкованої кільцевої насадки.

Під час вибору розміру насадки для забезпечення ефективної й рівномірної гідродинаміки фаз у шарі насадки необхідно

дотримуватися виконання співвідношення еквівалентних діаметрів апарата й елементів насадки, яке має бути не менше десяти [6].

*За матеріалом* кільцеві насадки розділяють на виготовлені з кераміки, порцеляни, напівпорцеляни, скла, вуглецю, керметів (кераміко-металевих матеріалів), металів та їхніх сплавів, полімерів, а також пластмас та інших композиційних матеріалів [5].

Так, разом з традиційними керамічними й металевими насадками в останні роки набувають поширення полімерна й пластмасова насадка, що вирізняється високими експлуатаційними властивостями й виготовляється переважно з поліолефінів (у тому числі поліпропілену, наповненого скловолокном), фторполімерів, поліефірсульфону й поліфеніленсульфіду [8]. Завдяки високим технологічним властивостям полімерних матеріалів з них можна виготовляти насадки найрізноманітнішої форми, наприклад, литтям під тиском або екструзією.

Також запропоновано вуглецеву кільцеву насадку із зовнішнім діаметром від 13 до 76 мм, що вирізняється високою міцністю, тепловою й хімічною стійкістю, великим терміном служби, а також низькою насипною густиною (від 333 до 602 кг/м<sup>3</sup>) і коефіцієнтом теплового розширення [9].

Матеріал, з якого виготовлено насадку, може бути суцільним і пористим. В останньому випадку збільшується його питома поверхня й змочуваність, однак зростає схильність до забруднення.

Також розроблено насадки, повністю або частково виготовлені з декількох матеріалів – однакової або різної природи. При цьому вони можуть бути виконані у вигляді складальних одиниць або у вигляді окремої деталі з покриттям з іншого матеріалу, наприклад, з вуглецевої сталі з антикорозійним покриттям.

*За формою елемента* розрізняють найпоширеніші насадки у вигляді прямого кругового циліндра (наприклад, кільця Рашига й Палля), напівкосоного й косоного кругового циліндра (з однією або обома основами, виконаними під гострим кутом до поздовжньої осі елемента), прямого еліптичного циліндра (у тому числі й скрученого по довжині – пат. України № 1738 U), однополого гіперболоїда (пат. України № 2396 U), а також у вигляді оболонки складної форми (пат. РФ № 107963 U1, України № 2449 U, 83712 U).

*За конструкцією* елементи насадки можуть представляти собою як окремі деталі, так і складальні одиниці, що складаються з декількох рухомих або нерухомих одна відносно одної деталей. Виконання елементів з декількох деталей зазвичай спрямовано на збільшення питомої поверхні насадки й зміну гідродинаміки оброблюваних фаз (пат. РФ № 2465039 C1, 2517747 C1, 2524971 C1, України № 97216 U, 97518 U, 99625 U, 99875 U, 105171 U).

*За ступенем суцільності оболонки* насадки можна поділити на такі, що мають суцільну оболонку (наприклад, кільця Рашига), а також оболонку з наскрізними каналами для проходу оброблюваних фаз (наприклад, кільця Палля). Зазначені наскрізні канали можуть бути утворені або видаленням фрагментів оболонки, або її надрізанням і відгинанням надрізаних елементів у вигляді пелюсток або смужок.

До першого типу можна віднести насадки згідно з пат. РФ № 107963 U1, 148733 U1, 160198 U1, 2370311 C1, України № 1738 U, 2396 U, 2449 U, 3940 U, 70776 A, 83712 U, 90390 U, 99625 U, 105171 U, 105236 U, 105266 U, 105267 U, Китаю № 105163844A, Тайваню № 231973B, 280805B, європейської заявки № 0579234A1, а до другого – пат. РФ № 42767 U1, 45650 U1, 50869 U1, 2290992 C1, Китаю № 202962480U, 203525723U, 204865856U.

У більшості випадків додаткові поверхні або турбулізуювальні елементи виконують з боку внутрішньої поверхні оболонки. У той же час запропоновано й конструкції з поздовжніми прямолінійними або гвинтовими зовнішніми ребрами, пазами й рифлями різних форм і розмірів, які в разі регулярної насадки також дистанціонують елементи між собою, забезпечуючи подібні режими руху фаз як усередині, так і зовні елементів (наприклад, пат. Іспанії № 1109280, України № 40347 A, РФ № 148733 U1, 160198 U1). Однак наявність рифлів нерідко не стільки збільшує питому поверхню та інтенсифікує перемішування оброблюваних фаз, скільки приводить до ускладнення конструкції насадки й збільшення її гідравлічного опору (пат. України № 72542 U), а також утворення застійних зон за умови певної орієнтації насадки в просторі (пат. РФ № 2370311 C1).

Елементи насадки з вікнами на бічній поверхні можна поділити на елементи з незмінною геометрією вікон і на елементи з регульованою геометрією вікон. До останніх належить конструкція за пат. України № 107957 U, усередині оболонки якої розміщено зігнуту в кільце пружну стрічку із прорізними в ній і відігнутими всередину пелюстками. При цьому поворотом стрічки відносно оболонки елемента можна змінювати прохідний переріз вікон у його стінці.

*За ступенем рухомості конструктивних компонентів* насадки один відносно одного розрізняють насадку з нерухомими (пат. України № 3940 U) і рухомими компонентами (а. с. СРСР № 1678437, 1703171, пат. України № 6504 U, 110926 U (рис. 3)). При цьому рухомі компоненти сприяють додатковому диспергуванню й перемішуванню фаз, а також ефективному обробленню забруднених середовищ.

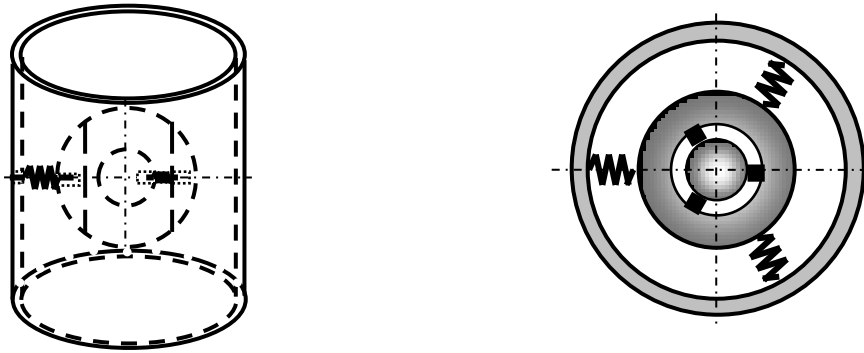


Рис. 3. Елемент насадки за пат. України № 110926 U.

За можливістю регулювання питомої поверхні розрізняють насадку з незмінною й регульованою питомою поверхнею. До останньої можна віднести насадку згідно з пат. України № 97233 U, робота якої заснована на використанні в її конструкції деталей з феромагнітного матеріалу з певною точкою Кюрі, при досягненні якої поверхня насадки стрибкоподібно збільшується (рис. 4).

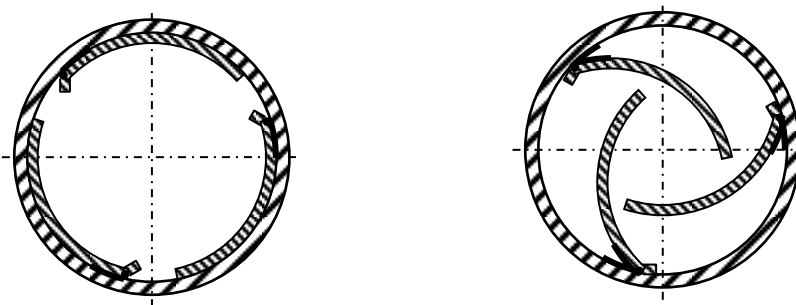


Рис. 4. Елемент насадки за пат. України № 97233 U.

За можливістю регулювання насипної густини розрізняють насадку з незмінною й регульованою насипною густиною. Так, до насадки з регульованою насипною густиною належить насадка у вигляді прямої циліндричної оболонки з основами, закритими знімними кришками (пат. України № 105266 U). Заповнюючи закриту кришками оболонку певним об'ємом сипучого матеріалу або рідини, можна в широких межах змінювати масу елемента та в такий спосіб – насипну густину насадки в цілому.

При цьому залежно від співвідношення густин матеріалу насадки й оброблюваних фаз, зокрема важкої фази, може змінюватися характер поведінки насадки в контактній частині масообмінного апарата. Якщо густина матеріалу насадки менша за густину важкої фази, то елементи насадки за умови їхнього вільного розміщення в контактній частині апарата під час його роботи починають рухатися, що сприяє ефективному перемішуванню фаз [5].

За реалізованою гідродинамікою фаз розрізняють насадки з

плівковим та плівково-барботажем режимами. До елементів першого типу можна віднести більшість кільцевих насадок, а до другого – насадки, у яких реалізується механізм масопередачі, характерний як для традиційних насадок, так і для тарілчастих колон.

Наприклад, згідно з пат. України № 105236 U у прямій циліндричній оболонці поперек її поздовжньої осі встановлено перфоровану перегородку, при цьому цю насадку використовують як упорядковану. Згідно ж з пат. України № 105267 U щонайменше одну основу прямої циліндричної оболонки закрито знімною кришкою із зануреним углиб оболонки перфорованим дном. В обох випадках на перфорованих елементах насадок (поперечній перегородці та одній або двох кришках) реалізується барботажем режим взаємодії оброблюваних фаз. Так, на рис. 4 наведено конструкцію елемента, що поєднує переваги як традиційної насадки, так і тарілки масообмінного апарата (пат. України № 110925 U (рис. 5)).

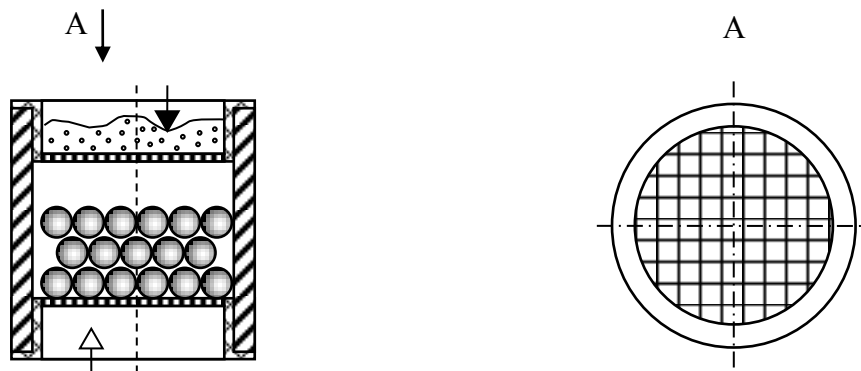


Рис. 5. Елемент насадки за пат. України № 110925 U.

За можливістю підтримки заданої температури розрізняють традиційні елементи насадки без термостабілізації, а також елементи з термостабілізацією, що забезпечують майже постійну температуру, що відповідає температурі проведення масообмінного процесу.

Так, при розміщенні насадки з феромагнітного матеріалу (або з кермету, до складу якого входить металевий феромагнетик) із точкою Кюрі, яка відповідає температурі проведення масообмінного процесу, в електромагнітному полі феромагнетик внаслідок індукції розігрівається. При досягненні насадкою температури, яка відповідає точці Кюрі, феромагнетик втрачає магнітні властивості й перестає нагріватися. За подальшого охолодження він знову набуває магнітних властивостей і знову починає нагріватися. У такий спосіб підтримується майже постійна температура насадки та оброблюваних в апараті фаз (пат. України № 52742).

Також розроблені конструкції достатньо технологічних і надійних в експлуатації насадок, що виготовляються штампуванням з



тонкостінних листових заготовок (пат. Китаю № 203525723U, Тайваню № 288992B), при цьому нерідко навіть без утворення відходів (пат. України № 28581 U, 97216 U, 97518 U, 105168 U).

*Висновки.* Як бачимо, незважаючи на більш ніж столітній вік кільцевих насадок, їхні конструкції продовжують удосконалюватися. При цьому розробниками пропонуються насадки різних типорозмірів, виготовлені з найрізноманітніших матеріалів.

У цій статті запропоновано класифікацію й виконано аналіз конструктивного оформлення кільцевих насадок масообмінних апаратів. Досягнення в області матеріалознавства й технології дає змогу кільцевим насадкам і сьогодні успішно конкурувати з іншими типами контактних пристроїв масообмінного обладнання, призначеного для розділення різноманітних рідких однорідних сумішей.

#### Література:

1. Рамм, В.М. Абсорбция газов. Москва: Химия, 1976. 655 с.
2. Мишин, В.П., Кацашвили, В.Г. Зарубежные насадочные устройства массообменной аппаратуры: обзор. информ. Москва: ЦИНТИ Химнефтемаш, 1982. 20 с. (Серия ХМ-1 «Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение»).
3. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / под ред. В.Г. Айнштейна. Ч.1. Москва: Логос, Высш. шк., 2002. 912 с.
4. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов / А.М. Каган, А.Г. Лаптев, А.С. Пушнов, М.И. Фарахов; под ред. А.Г. Лаптева. Москва: Отечество, 2013. 454 с.
5. Mikulionok, I.O. Classification of Nozzles of Mass Transfer Apparatuses // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 83, N 9. P. 1631–1637. DOI: 10.1134/S107042721109031X.
6. Мікульонок, І.О. Механічні, гідромеханічні й масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 340 с.
7. Schultes, M. Raschig Super-Ring: A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages // Chemical Engineering Research and Design. 2003. Vol. 81, Part A. P. 48–57.
8. Plastic Packings Process Data: Raschig GmbH. URL: <http://s341789233.online.de/editor/assets/RASCHIG%20Plastic%20Packings-701.pdf> (дата звернення 01.04.2017).
9. Carbon Raschig Rings: Pyrotek Inc., USA. URL: [https://pyrotek-inc.com/documents/datasheets/808\\_-\\_Carbon\\_Raschig\\_Rings\\_-\\_E4.pdf](https://pyrotek-inc.com/documents/datasheets/808_-_Carbon_Raschig_Rings_-_E4.pdf) (дата звернення 01.04.2017).

## **КОНСТРУКЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ НАСАДОК МАССООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПИЩЕВЫХ И РОДСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

Микулёнок И.О.

*Аннотация* – разработана классификация кольцевых насадок массообменных аппаратов пищевых и родственных производств. Рассмотрены примеры конструктивного оформления отечественных и зарубежных неупорядоченных и упорядоченных кольцевых насадок, а также выполнен анализ их преимуществ и недостатков.

## **DESIGNS OF RING PACKING CONTACT ELEMENTS OF MASS-TRANSFER APPARATUSES OF FOOD AND RELATED PRODUCTIONS**

I. Mikulionok

### *Summary*

Classification of ring packing contact elements of mass-transfer apparatuses of food and related productions is developed. Examples of a design of domestic and foreign disorder and ordered ring packing contact elements are reviewed, and also the analysis of their advantages and imperfections is made.