

УДК 66.021.3:66.069.833-023.822(048.83)

МКУЛЬОНОК І. О.*^{1,2}, ІВАНЕНКО О. І.¹

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

² Інститут газу Національної академії наук України

СФЕРИЧНІ НАСАДКИ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ КОЛОН (Класифікація та огляд конструкцій)

Одними з найбільш поширених контактних елементів колонних тепломасобмінних апаратів, які використовуються в хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій, мікробіологічній, теплоенергетичній галузях промисловості, а також системах очищення рідких і газових промислових потоків є насадки, чи не найбільш простими серед яких є сферичні насадки – виготовлені зазвичай з фарфору, скла, кераміки, металу або полімерного матеріалу кулі чи сферичні оболонки. Як і більш поширена кільцева циліндрична сферична насадка характеризується високою технологічністю та універсальністю, проте одночасно вона має такі недоліки як низькі питому поверхню й вільний об'єм, а також високу матеріалоемність. Завдяки своїй симетричній та обтічній формі сферична насадка в цілому або сферичні компоненти насадки широко використовуються як рухлива насадка, зокрема в тепломасобмінних апаратах псевдозрідженого шару. Останнім часом на заміну більш простій сферичній насадці у вигляді суцільних куль, які вирізняються високою матеріалоемністю, приходять більш легкі насадки у вигляді сферичних оболонок з різноманітними елементами для турбулізації та збільшення питомої поверхні.

Ключові слова: тепломасообмінна колона, насадка, сфера, класифікація, конструкція, патент, заявка на патент

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2025.348810

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 05 August 2025; Accepted 04 September 2025

Постановка проблеми.

Одними з найбільш поширених контактних елементів колонних тепломасобмінних апаратів, які використовуються в хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій, мікробіологічній, теплоенергетичній галузях промисловості, а також системах очищення рідких і газових промислових потоків є насадки, виконані у вигляді твердих тіл різноманітної форми й розмірів і призначені для заповнення ними контактної частини тепломасообмінного апарата з метою підвищення ефективності взаємодії в ньому оброблюваних текучих фаз [1–10].

При цьому чи не найбільш простими насадками є сферичні насадки – виготовлені зазвичай з фарфору, скла, кераміки або полімерного матеріалу суцільні кулі [2, 4].

Перевагами сферичних насадок у вигляді суцільних куль є високі технологічність та універсальність, а також відсутність застійних зон у шарі насадки, а недоліками – низькі питома поверхня й вільний об'єм, висока матеріалоемність, а також у деяких випадках значна маса (залежно від діаметра насадки та густини її матеріалу). Проте саме технологічність та універсальність спонукають дослідників та винахідників пропонувати нові й нові конструкції сферичних насадок.

Аналіз попередніх досліджень.

Натепер достатньо ґрунтовно досліджено конструктивно-технологічне оформлення такої насадки як насадка у вигляді прямого кругового порожнистого циліндра (кільцева насадка) [11, 12], насадка з формою поверхні другого порядку [13], насадка у формі стрічки Мебіуса [14], призматична насадка [15], а також штампована насадка різноманітної форми [16].

Також достатньо докладно досліджене питання гідродинаміки, тепло- й масообміну в шарі насадки у вигляді суцільних куль з гладкою поверхнею як з безладно (хаотично) розташованою в контактній частині тепломасообмінного апарата [17, 18], так і впорядковано розташованою – у коридорному [19–21] або шаховому [22, 23] порядку.

Питанню ж аналізу конструктивно-технологічного оформлення сферичної насадки іншого виконання крім як у вигляді суцільної гладкої кулі уваги приділено майже не було (крім окремих моментів у деяких публікаціях [2, 4]), хоча такі переваги сферичної насадки як її високі технологічність та універсальність є очевидними й беззаперечними, адже її може бути легко отримано такими методами як штампування [24, 25] або 3D-друк [26–30].

Останнім часом, насамперед у патентних документах, розробниками інноваційних техніки й технології все частіше пропонуються різноманітні високотехнологічні сферичні насадки, насамперед з підвищеними питомою поверхнею й вільним об'ємом, який для щільного шару кулястої насадки становить всього приблизно 40 % [3], тому розроблення їхніх ефективних конструкцій стає актуальним завданням науковців, конструкторів і винахідників.

Метою статті є критичний аналіз конструкцій насадок тепломасообмінних колон у формі сфери, які застосовуються в хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій, мікробіологічній, теплоенергетичній, системах очищення текучих промислових викидів та інших галузях промисловості.

Виклад основного матеріалу.

Аналіз конструктивно-технологічного оформлення сферичних насадок тепломасообмінних колон дає змогу запропонувати їхню класифікацію, наведену на рис. 1.

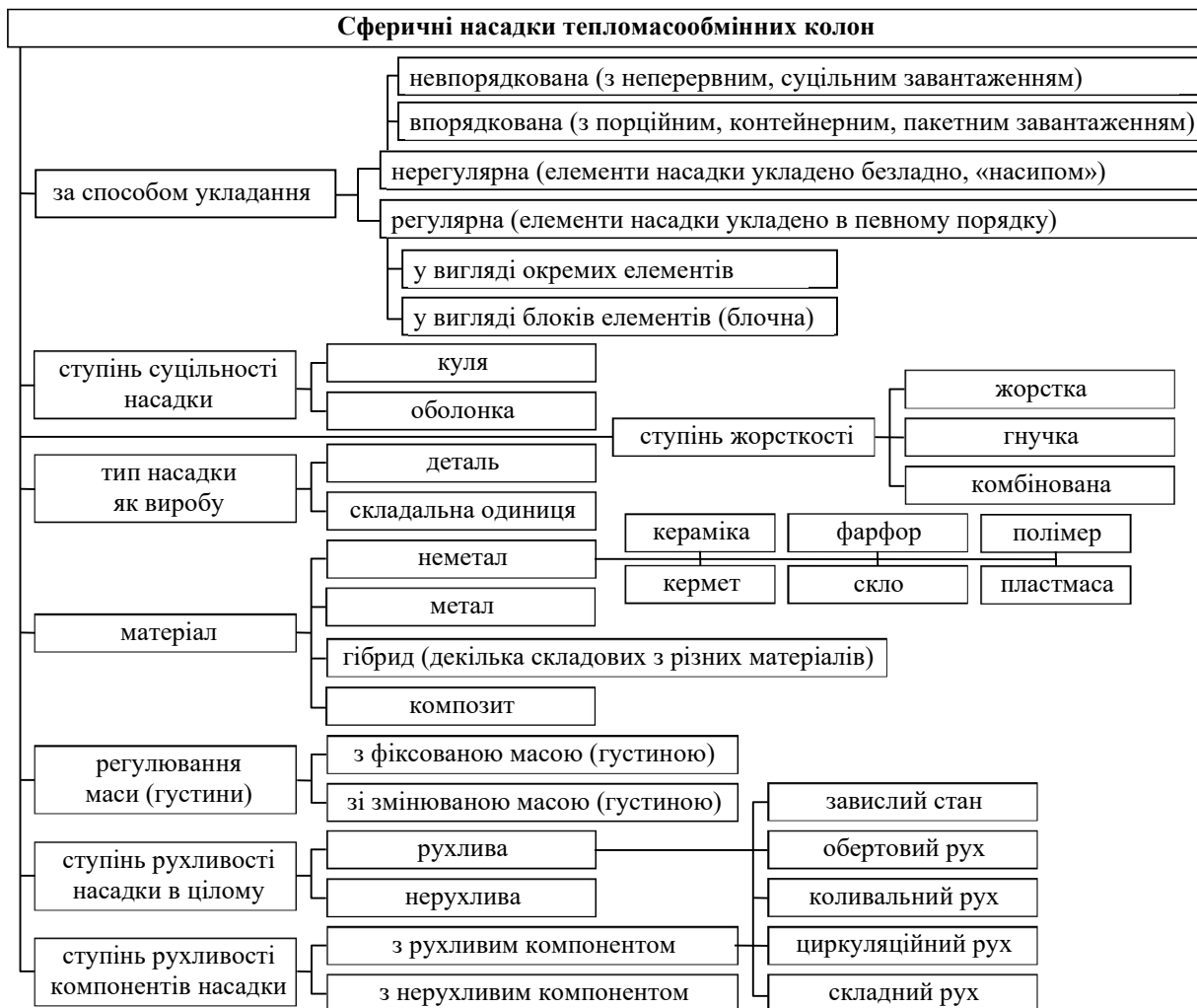
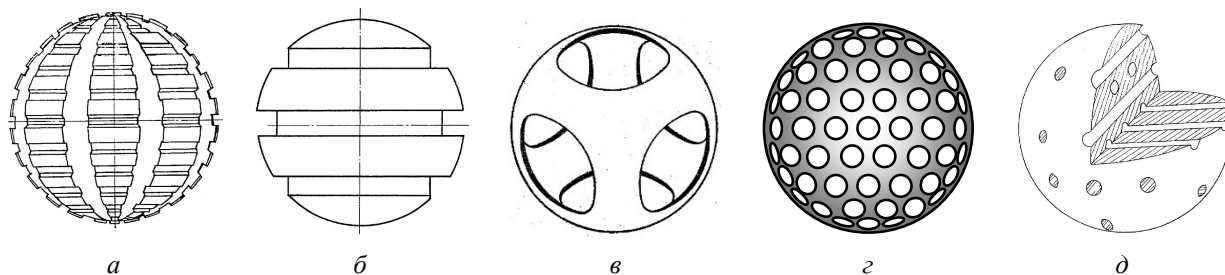


Рис. 1 – Класифікація сферичних насадок тепломасообмінних колон

За способом укладання розрізняють регулярну й нерегулярну насадки. У свою чергу регулярна насадка (елементи насадки укладено в певному порядку) може бути у вигляді окремих елементів, а також у вигляді блоків елементів (блочна насадка), а нерегулярна – невпорядкована (з неперервним, суцільним завантаженням), а також впорядкована (з порційним, контейнерним, пакетним завантаженням) [4].

За ступенем суцільності розрізняють насадки у вигляді куль та оболонок.

Розроблено насадки у формі кулі (пат. № JPS60212206A), а також сферичних оболонок з гладкою (пат. № US3122594A, US3350075A), ребристою (а. с. № SU793634A1; рис. 2,а, SU892185A1; рис. 2,б) та перфорованою поверхнею (а. с. № SU1212523A1; рис. 2,в, пат. № UA71359U; рис. 2,г). Також для підвищення диспергувальних властивостей насадок у вигляді куль у них виконують наскрізні діаметральні канали (а. с. № SU880455A2), наскрізні канали, що не перетинаються між собою (а. с. № SU572284A1; рис. 2,д), а також кільцеві виступи на їхній поверхні, розташовані поза діаметральними площинами (а. с. № SU1586774A1).



а – а. с. № SU793634A1; б – а. с. № SU892185A1; в – а. с. № SU1212523A1;
г – пат. № UA71359U; д – пат. № SU572284A1

Рис. 2 – Приклади сферичних насадок

Насадка у вигляді кулі з глухими отворами, зміщеними відносно осей симетрії кулі (а. с. № SU915918A1; рис. 3). Під впливом легкої фази елемент не лише хаотично рухається в псевдозрідженому шарі, а й відносно свого центру мас. Однак глухі отвори схильні до забруднення, що непередбачувано змінює масу елемента та характер його руху.

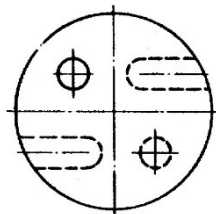


Рис. 3 – Насадка у формі кулі з глухими отворами (а. с. № SU915918A1)

У кулястій насадці наскрізні криволінійні або східчасті канали, що не перетинаються, забезпечують інтенсивне обертання елемента (а. с. № SU1095971A1; рис. 4). Недоліки елемента – складність виконання каналів. Наявні на поверхні насадки радіальні фігурні виступи також виключають «злипання» елементів насадки між собою та сприяють самоочищенню насадки від відкладень різної природи (аналогічні рішення запропоновано в пат. US2198861A та а. с. № SU614806A1). Недоліки насадки – складність виготовлення, а також інтенсивне зношування виступів у результаті зіткнень елементів між собою, а також колоною.

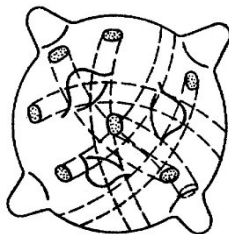


Рис. 4 – Кульова насадка з наскрізними криволінійними каналами (а. с. SU1095971A1)

Насадка у вигляді кулі з рівномірно розташованими на її поверхні радіальними конічними шипами (пат. № CN114288980A; рис. 5). Зазначається, що така біонічна насадка інтенсифікує процесі абсорбції. Насадки аналогічної форми, але іншої будови також запропоновано в пат. № CN217473546U, US2198861A.

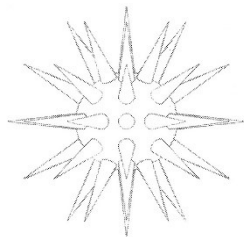


Рис. 5 – Насадка у вигляді кулі з радіальними конічними шипами (пат. № CN114288980A)

Насадка у вигляді кулі з надзвичайно розвиненою поверхнею виготовляється методом 3D-друку (пат. CN120247261A; рис. 6). Зазначена конструкція не лише збільшує поверхню контакту фаз, а й краще утримує фази на поверхні насадки, збільшуючи час їх взаємодії. Недолік насадки – схильність до забруднення. Аналогічну заявку запропоновано в пат. GB2601741A.

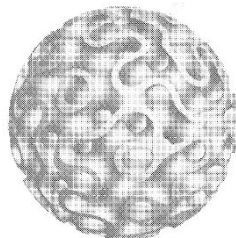


Рис. 6 – Кульова насадка з розвиненою поверхнею (пат. № CN120247261A)

Виготовлена з порцеляни насадка у формі кулі діаметром 15–18 мм з сімома поздовжніми наскрізними паралельними отворами: центральним більшого діаметра й шістьма меншого діаметра, розташованими навколо центрального рівномірно по колу (пат. № CN203018094U). Канали збільшують питому поверхню й вільний об'єм насадки.

Насадка у вигляді порцелянової кулі з кільцевими виступами й східчастими канавками, а також наскрізними каналами має поверхню на 30 % більшу, ніж кульці з гладкою поверхнею та наскрізними отворами (пат. CN203764268U; рис. 7).

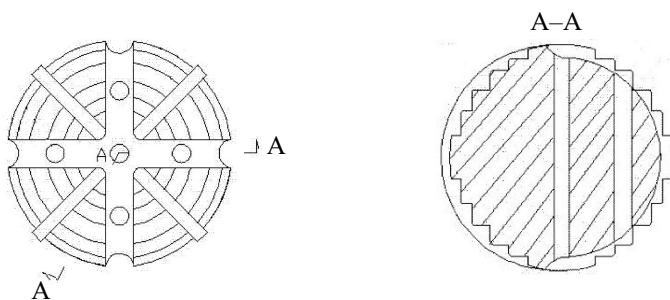


Рис. 7 – Кульова насадка з кільцевими виступами й східчастими канавками (пат. № CN203764268U)

Керамічна насадка у вигляді суцільної кулі або сферичної оболонки з декількома паралельними наскрізними каналами та пазами може бути виготовлена методами 3D-друку й використана також як носій каталізатора (пат. GB2577054A, заявки № WO2020/053563A1, US2021/339229A1, US2024/335821A1; рис. 8). Аналогічне технічне рішення запропоноване також у пат. № JP2023551975A та заявках № WO2022/118032A1, US2024/017238A1, а в заявці № WO2013/014456A1 наведено насадку у вигляді кулі з декількома паралельними наскрізними каналами та рівномірно розташованими в діаметральній площині скругленими виступами на її поверхні.

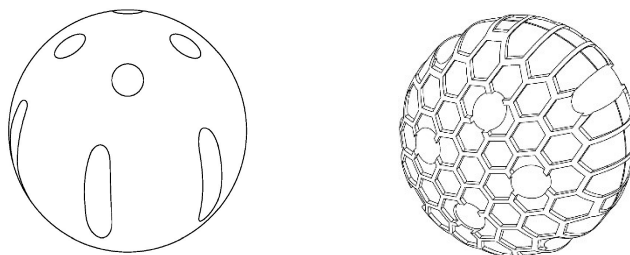


Рис. 8 – Сферичні насадки з кільцевими виступами й східчастими канавками (пат. № GB2577054A, заявки № WO2020/053563A1, US2021/339229A1, US2024/335821A1)

Сферична «розкладавана» насадка може бути виготовлена з полімерного матеріалу литтям під тиском у вигляді однієї деталі (заявки № US2005/098908A1, US2006/202364A1; рис. 9). Перевага конструкції – висока технологічність і легкість очищення від забруднень.

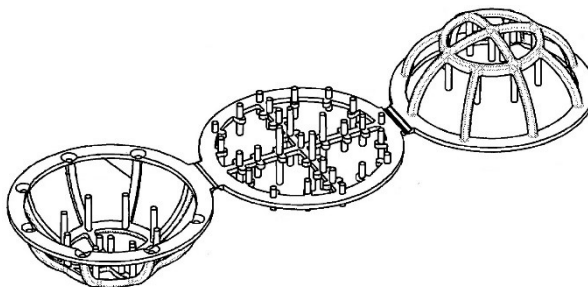


Рис. 9 – Сферична насадка у розкладеному вигляді (заявки № US2005/098908A1, US2006/202364A1)

Полімерна насадка у вигляді сферичної оболонки, що складається з двох півсфер, основу однієї з яких виконано зубчастою (а. с. № SU915917A1; рис. 10). Густина матеріалу однієї з півсфер більша за густину матеріалу другої півсфери, внаслідок чого насадка під час псевдозрідження шару насадки розташовується зубцями вгору, що підвищує стабільність гідродинаміки фаз та їх гомогенізацію.

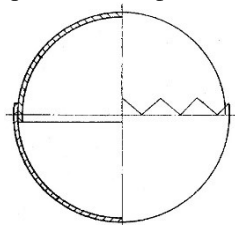


Рис. 10 – Сферична насадка зі зміщеним центром мас (а. с. № SU915917A1)

Елемент з високою питомою поверхнею виконано у вигляді сфери, складеної з двох перфорованих півсфер, з розміщеною в ній нерухливою кулею, при цьому кожна з півсфер з боку її внутрішньої поверхні оснащено тримачами у вигляді стрижнів для фіксації кулі, а на основах півсфер виконані виступи для утворення з'єднання типу «твіст-офф» (пат. № UA134266U; рис. 11).

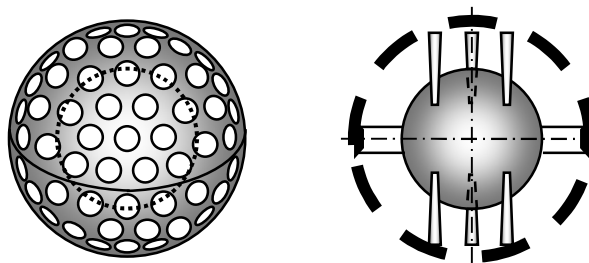


Рис. 11 – Нерегулярна сферична насадка з нерухомою кулею всередині (пат. № UA134266U)

В удосконаленій насадці кожний з тримачів кулі виконано у вигляді розташованої вздовж радіуса сфери пружини стиснення (пат. UA158214U; рис. 12). Під час руху оброблюваних фаз крізь перфорацію сфери кулька безладно коливається, що інтенсифікує процес тепломасообміну.

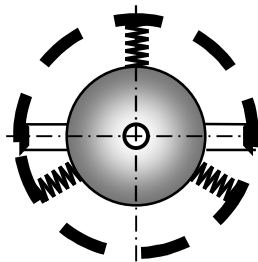


Рис. 12 – Нерегулярна сферична насадка з рухливою кулею всередині (пат. UA158214U)

Насадка у вигляді сферичної оболонки з видаленим сегментом заввишки чверть діаметра оболонки й розташованій у ній перфорованій сферичній оболонці меншого діаметра, всередині якої розміщено підпружинену кульку, яка під час руху оброблюваних фаз кулька безладно коливається, що інтенсифікує процес тепломасообміну (пат. CN212120019U; рис. 13). Недолік цієї насадки – значна кількість деталей і надзвичайна складність виготовлення.

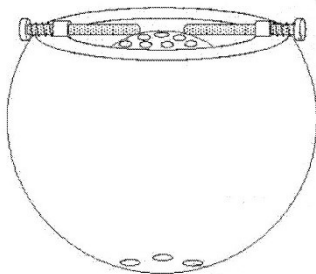


Рис. 13 – Насадка у вигляді двох вкладених одна в одну сферичних оболонок з рухливою кулькою всередині меншої оболонки (пат. CN212120019U)

Керамічна насадка у вигляді двох розташованих з проміжком одна в одній і жорстко з'єднаних між собою перфорованих рознімних сферичних оболонок (пат. № CN215611617U). Технічне рішення підвищує питому поверхню насадки та її міцність, проте одночасно й складність її виготовлення.

Насадка у формі сферичної або замкнутої півсферичної оболонки різного виконання: перфорованої, суцільної з наповнювачем тощо (пат. № GB1204781A). Аналогічну насадку з рознімною сферичною оболонкою з численними прорізами й розташованим у ній волокнистим наповнювачем запропоновано в пат. № US6631890B1 (рис. 14).



Рис. 14 – Насадка у вигляді сферичної оболонки з прорізами й розташованим у ній волокнистим наповнювачем (пат. US6631890B1)

В частині отворів перфорованої сферичної оболонки своїми основами закріплено конуси, спрямовані вершинами до центра оболонки, що збільшує поверхню контакту фаз (а. с. № SU1261695A1).

Насадки у вигляді сферичної оболонки з різними технічними рішеннями стосовно підвищення питомої поверхні та/або вільного об'єму також розглянуто в пат. US6811147B2, CN105126732A, CN203816638U, CN209348652U, CN210752705U, CN210752706U, CN215026026U, CN216063297U, CN216727286U,

CN222816849U, CN222829662U, RU199476U1, заявці № DE112009004246T5, а суцільних куль – у пат. EP1364703A, KR20010042113A, JP2018061955A, JPS60212206A, US3122594A, US3350075A, CN204973927U, CN205146236U, CN205182742U, CN208554216U, CN209348651U, CN209772132U, CN211837934U, а. с. № SU1053861A1, а також заявках № WO99/48604A1, US2019/358620A1.

За типом насадки як виробу розрізняють насадки у деталей і складальних одиниць.

Насадки у вигляді деталей зазвичай мають простішу форму, хоча сучасні методи перероблення матеріалів (наприклад, 3D-друк) дають змогу виготовляти вироби майже довільної форми [29, 30].

Виготовлений за допомогою 3D-друку елемент у вигляді кулі з радіальними круглими каналами та численними надрізами можна використовувати як носій для каталізатора (заявка № DE102020112372A1; рис. 15). Недолік елемента – схильність до забруднення.



Рис. 15 – Насадка у вигляді деталі (заявка № DE102020112372A1)

Всередині рознімної сферичної оболонки вільно розміщено кулю з рівномірно виконаними на її поверхні радіальними виступами (пат. № CN118079850A; рис. 16). Перевага насадки – ефективне самоочищення внутрішньої поверхні сферичної оболонки від відкладень.



Рис. 16 – Внутрішній рухливий елемент сферичної насадки (пат. № CN118079850A)

Насадки у вигляді складальних одиниць виконано у вигляді сферичної (а. с. № SU725688A1) або сфероїдної (а. с. № SU1225608A1) сітки з рухливою кулею всередині. У колоні, заповненій аналогічною насадкою, у сітчастих сферах сусідніх шарів рухливі кулі мають різну масу (а. с. № SU1782642A1).

Елемент у вигляді кулі з радіальними каналами, а також ежектором і стабілізатором положення, які інтенсифікують циркуляцію й диспергування фаз під час проходження ними елемента (а. с. № SU1031483A1; рис. 17). Цей елемент не тільки нетехнологічний і складний в експлуатації, але й дуже чутливий до забруднення.

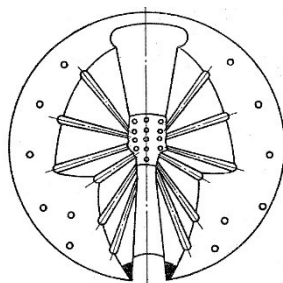


Рис. 17 – Сферична насадка з ежектором і стабілізатором положення (а. с. № SU1031483A1)

Виконана у вигляді складальної одиниці насадка має форму кулі, розділеної на дві половини суцільною круглою перегородкою з овальним прохідним отвором, розташованим у центрі перегородки, при цьому на подовжній осі прохідного отвору перпендикулярно перегородці закріплено перемичку, що розділяє прохідний отвір по його подовжній осі навпіл, на перемичці на однаковій відстані один від одного закріплено конусоподібні штирі, до яких прикріплено тонкі пластини, виконані хвилеподібної форми, а прикріплення стінок до штирів виконане в місці утворення центрального гребеня (пат. UA66475U, BY7800U; рис. 18,а). Істотний недолік цієї насадки – її низька технологічність і надзвичайна складність. Також розроблено насадку аналогічної будови, але з використанням плоских пластин, що спрощує її виготовлення (пат. CN218854310U; рис. 18,б).

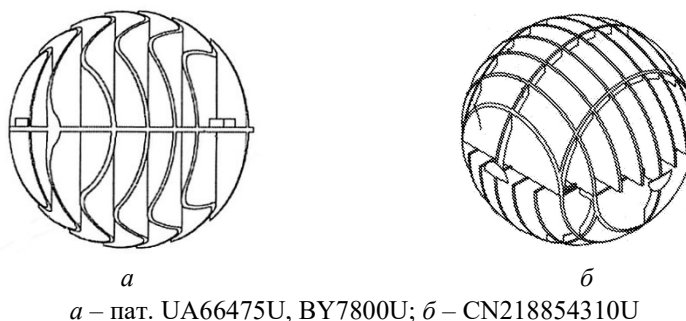


Рис. 18 – Сферичні насадки у вигляді складальної одиниці

Насадка у вигляді сферичної оболонки, частково заповненої сплавом вісмуту, олова, свинцю й кадмію, зокрема сплавом Вуда або Розе з температурою плавлення 68,5 °C і 94 °C [31, 32], відповідно (заявка № WO2008/140435A1). Зазначену насадку використовують у реакторах псевдозрідженого шару, призначених для термохімічної деструкції різноманітної органічної сировини [33].

За матеріалом розрізняють насадки з металевою, неметалевою, композиційною та гібридною насадкою. При цьому металеву насадку з огляду на велику густину металу зазвичай виготовляють у вигляді сферичної оболонки, а не суцільної кулі (пат. № CN108745266A, CN114210297A, CN207839009U, UA132063U, UA132799U, UA134266U, UA152700U, UA158214U). Зокрема в пат. UA132799U запропоновано насадку, яка складається з двох з'єднаних між собою своїми вершинами півсфер (рис. 19,а).

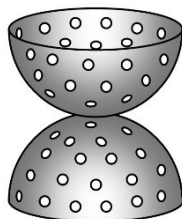


Рис. 19 – Насадка у вигляді двох з'єднаних між собою своїми вершинами півсфер (пат. UA132799U)

Металеві насадки зазвичай використовують у вигляді тонкостінних оболонок, що спричинено насамперед значною густиною металів і сплавів. При цьому найбільш поширеними в хімічній і харчовій промисловості є насадки з корозійностійких сталей аустенітного класу, насамперед сталей 08X18H10, 12X18H10T та ін. [34, 35].

Великі можливості для виготовлення елементів рухливої насадки з точки зору забезпечення потрібних експлуатаційних властивостей надають композиційні матеріали й насамперед з використанням полімерів, у тому числі спінених, які дають змогу регулювати густину матеріалу насадки в широких межах (пат № FR2112104A7; [36]).

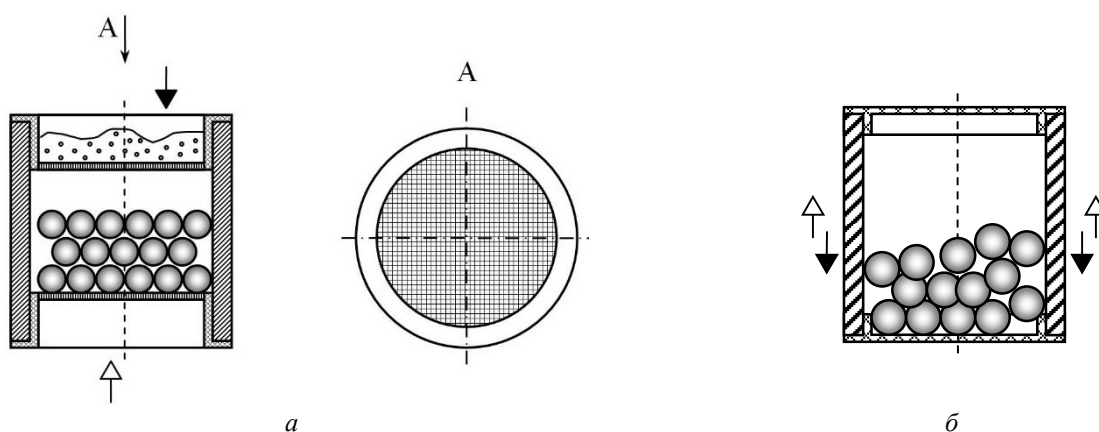
Контактну частину колони сформовано горизонтально розташованими опорно-розподільчальною й обмежувальними решітками, між якими нерухомо розташовані сферичні сітки, всередині кожної з яких розміщено виготовлену з політетрафторетилену кулясту насадку з діаметром меншим за внутрішній діаметр сферичної сітки. При цьому густина матеріалу кулястих насадок між сусідніми шарами різниться, що сприяє інтенсифікації перемішування оброблюваних фаз у колоні (а. с. № SU1782642A1).

Насадку зі спіненого оксиду алюмінію виконано у вигляді кулі діаметром 10–30 мм з численними наскрізними отворами (пат. CN211770966U). Недолік конструкції – схильність до забруднення.

До гібридних належать насадки, декілька складових яких виконано з різних матеріалів. До таких насадок можна віднести уже згадану сферичну оболонку відповідно до а. с. № SU967532A1, виготовлену з еластичного матеріалу (гума, спінений поліпропілен тощо) і частково заповнену рідиною.

За регулюванням маси (густини) розрізняють насадки з постійною (фіксованою) та регульованою масою (густиною).

Елементи регулярної насадки регульованої маси виконано у вигляді циліндричної оболонки з двома торцевими кришками (пат. № UA105266U; рис. 20,а). Наявність всередині елемента додаткового вантажу у вигляді кулястих частинок дає змогу змінювати масу елемента, а отже і його плавучість в об'ємі важкої фази. В аналогічній насадці верхня кришка виконує роль контактної масообмінної тарілки [4, 37–40] (пат. № UA110925U; рис. 20,б).



а – пат. № UA105266U; б – пат. № UA110925U

Рис. 20 – Насадки зі змінюваною масою

Виконану з еластичного матеріалу сферичну оболонку частково заповнено рідиною (а. с. № SU967532A1). Заповнення та спорожнення елемента здійснюють за допомогою шприца, при цьому отвір, що утворюється в стінці елемента після вилучення голки, самостійно затягується. Під час руху фаз крізь контактну частину тепломасообмінної колонії шар насадки псевдозріджується. Рідина, що перебуває всередині кожного елемента насадки, в процесі псевдозрідження насадки рухається, неперервно змінюючи положення центра мас відповідного елемента. Це сприяє додатковій турбулізації й перемішуванню оброблюваних фаз, а отже інтенсифікує процес тепломасообміну в колонії. Насадка характеризується широкими технологічними можливостями й низьким рівнем шуму під час роботи.

Елемент насадки у вигляді сферичної оболонки з місцевою перфорованою ділянкою (а. с. № SU728892A1; рис. 21). Під час псевдозрідження крізь перфорацію всередину елемента потрапляє певний об'єм рідини, що змінює масу елемента. У результаті елемент набуває нерівномірного, пульсуючого характеру руху. Проте наявність в елементі неконтрольованого об'єму рідини не забезпечує стабільності гідродинаміки процесу псевдозрідження.

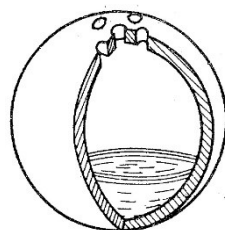


Рис. 21 – Насадка зі змінюваною масою рідини у сферичній оболонці (а. с. № SU728892A1)

Насадка у вигляді решітчастої сферичної оболонки зі знімною кришкою, виконаною у вигляді сегмента сфери, та вільно розміщеними всередині твердими тілами різноманітної форми (пат. CN119175067A). Залежно від ступеня заповнення порожнини оболонки твердими тілами регулюється маса насадки, а також амплітуда коливань твердих тіл під впливом оброблюваних фаз.

Насадка у вигляді перфорованої сферичної оболонки, що складається зі з'єднаних між собою двох півсферичних півоболонки, кожен з яких оснащено знімною кришкою, виконаною у вигляді сегмента сфери (пат. № CN223221522U; рис. 22). Недолік конструкції – численні з'єднання між собою елементів насадки, а також наявність фіксаторів з'єднання півоболонки, які виступають за межі оболонки і, потрапивши в отвори перфорації сусідніх елементів насадки, можуть спричинити пошкодження елементів насадки.

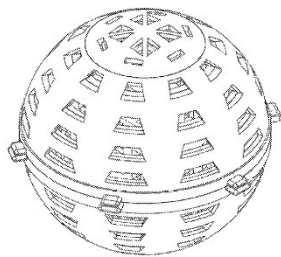


Рис. 22 – Насадка у вигляді розрізної сферичної оболонки зі знімними кришками (а. с. № SU728892A1)

Завдяки своїй симетричній та обтічній формі сферична насадка в цілому або сферичні компоненти насадки широко використовуються як рухлива насадка [4, 41].

Отже, за ступенем рухливості насадки в цілому або компонентів насадки розрізняють нерухливу й рухливу насадки.

У більшості колон з рухливою насадкою рухливою є насадка в цілому, проте розроблено нерухливі насадки з одним або декількома рухливими елементами. При цьому нерухливі насадки з рухливими елементами можуть формувати регулярну й нерегулярну структури.

Насадка у вигляді сферичної оболонки з розміщеною в її порожнині пружною кулькою, що спричинює різкі зміни напрямку руху елемента під час руху насадки (а. с. № SU553994A1). Це сприяє додатковій турбулізації й перемішуванню оброблюваних фаз, а отже інтенсифікує процес тепломасообміну. Аналогічне технічне рішення, але з вільною кулькою у сферичній сітчастій оболонці наведено в пат. CN119926346A, а в багатогранній кістяковій структурі – в а. с. № SU1576191A2 і пат. № RU2124941C1.

Сферичний елемент нерегулярної насадки з додатковим вантажем усередині складається з двох перфорованих півсфер, сполучених за допомогою з'єднання типу «твіст-офф» (пат. № UA132063U; рис. 23). За низьких швидкостей фаз елементи насадки нерухомі, а коливається лише додатковий вантаж. Зі збільшенням швидкостей фаз настає режим псевдозрідження елементів.

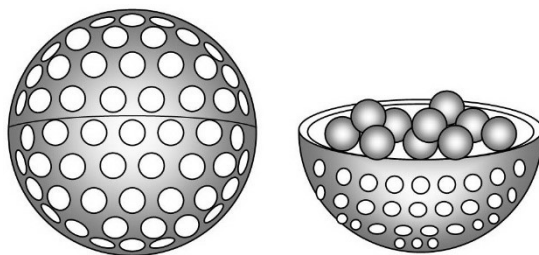


Рис. 23 – Сферична насадка з кулястим наповнювачем (пат. № UA132063U)

Під час роботи тепломасообмінної колони елементи насадки та/або їхні компоненти можуть перебувати і завислого стані (ідеальний псевдозріджений шар) або здійснювати обертний, коливальний, циркуляційний чи складний (комбінований) рух. При цьому зазначений рух реалізується потоками фаз у контактній частині колони та/або зовнішніми джерелами енергії, наприклад, генераторами електромагнітних хвиль, ультразвукових хвиль тощо.

Корпус колони виконано у вигляді зрізаного конуса з більшою основою вгорі, горизонтальними розподільними тарілками, а також розміщеними на кожній тарілці рухливими елементами насадки, густина матеріалу яких знижується від нижньої тарілки до верхньої (а. с. № SU1247068A1). Колона характеризується високою ефективністю в широкому діапазоні навантажень по легкій фазі.

У контактній частині колони із завислою насадкою розміщено вертикальні стрижні або струни з вільно розташованими на них сферичними елементами насадки (а. с. № SU682255A1). В аналогічному технічному рішенні елементи насадки в нижній частині мають радіальні циліндричні голки, які турбулізують потоки фаз і збільшують її питому поверхню (а. с. № SU1287927A1).

В удосконаленій колоні густина встановлених на кожному стрижні елементів знижується знизу-вгору (а. с. № SU793620A2). Під дією висхідного потоку легкої фази елементи «розтягуються» по висоті контактної частини, знижуючи гідравлічний опір колони.

Елементи насадки нерухливо встановлені на еластичних струнах, закріплених у розподільних решітках, при цьому одна з решіток може змінювати своє положення по висоті колони (пат. № UA56771U; рис. 24). Регулюванням відстані між решітками досягають потрібної амплітуди коливань елементів насадки.

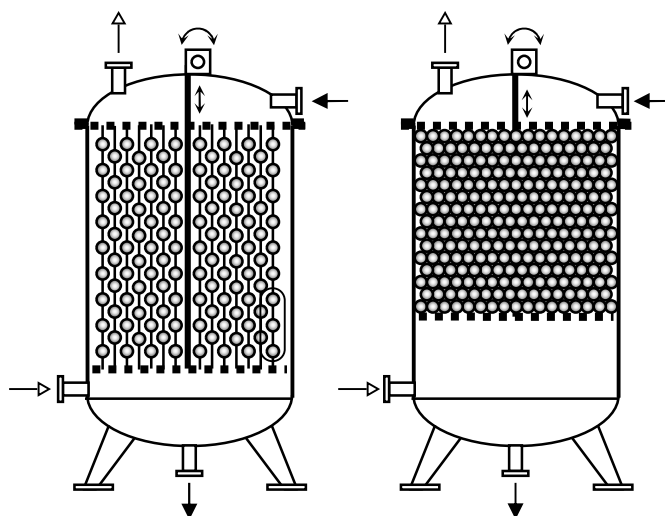


Рис. 24 – Тепломасообмінний апарат з кулястою насадкою на вертикальних еластичних струнах (пат. № UA56771U)

Колона зі встановленими на вертикальних стрижнях кулями з похилими виступами, западинами або наскрізними каналами (пат. № UA790U). Під час проходження легкої фази крізь наскрізні канали чи западини або її руху біля виступів кулі обертаються навколо стрижнів, турбулізуючи потоки фаз.

Елементи встановлено на гнучких струнах, консольно закріплених у перфорованій опорній решітці (а. с. № SU850183A1) або внутрішній поверхні корпуса (а. с. № SU791401A1). Недолік – струни можуть переплутатися, що знижує надійність роботи колони.

Аналогічне рішення, в якому замість струн використовують вертикальні ланцюги, з'єднані між собою горизонтальним ланцюгом для унеможливлення взаємного переплетення ланцюгів під час роботи (а. с. № SU1152630A1).

Насадка у вигляді сферичної перфорованої оболонки з розташованою в ній кулькою з феромагнітного матеріалу, що вібує під впливом електромагнітного поля (пат. № CN108144419A).

Елемент виконано у вигляді двох розміщених одна в одній сферичних перфорованих оболонок, зафіксованих між собою сформованими на внутрішній оболонці дистанційними виступами (пат. № CN206613502U). Також розроблено аналогічну насадку, але на зовнішній поверхні зовнішньої оболонки рівномірно виконано циліндрично-сферичні виступи (пат. № CN220310454U).

Елементи у вигляді кульок закріплено над горизонтальною розподільною решіткою за допомогою коротких пружних струн, що забезпечують взаємне віддалення сусідніх кульок лише на невелику відстань (а. с. № SU1142131A1; рис. 25). Кульки, що коливаються під дією висхідного потоку легкої фази, не тільки збільшують поверхню контакту оброблюваних фаз, але й підвищують рівномірність розподілу легкої фази на виході з розподільної решітки.

Насадка у вигляді перфорованої сфери з крильчаткою (пат. № CN207970865U) і вільно встановленим на осі обертовим порожнистим однополим гіперболоїдом (пат. № CN207970866U; рис. 26,а). Недолік зазначених елементів – складність виготовлення та очищення від забруднень і відкладень.

Регулярна насадка у вигляді сферичної оболонки з двома діаметрально видаленими сегментами, а також розміщеною в ній на поперечній осі вільнообертовою крильчаткою (пат. № RU135532U1; рис. 26,б).

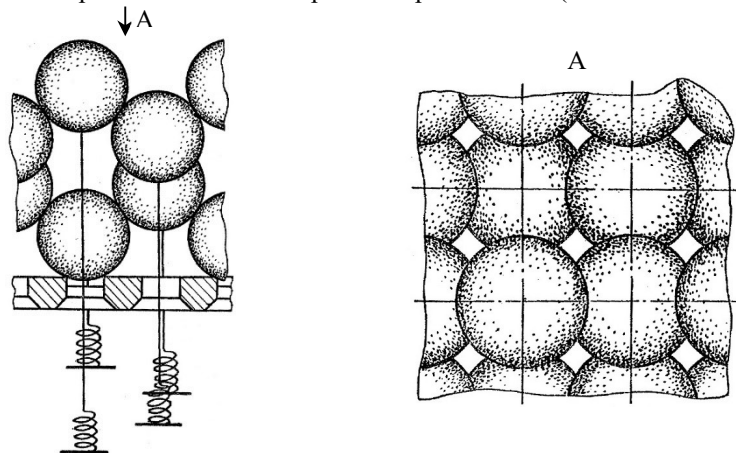
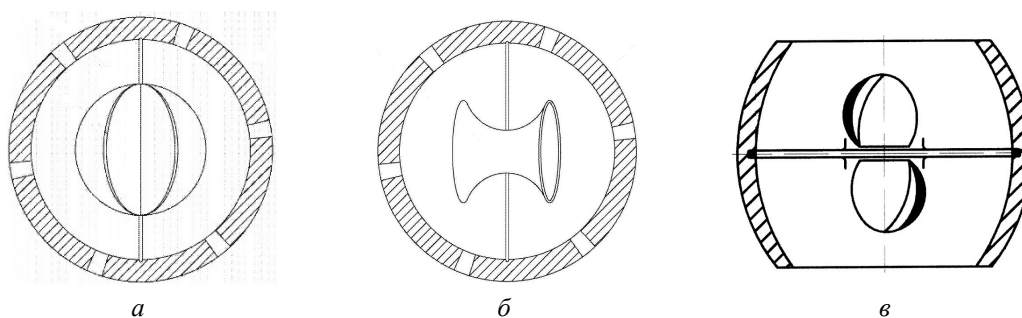


Рис. 25 – Тепломасообмінний апарат з кулястою насадкою над газр(паро)розподільною решіткою (пат. № UA56771U)



a – пат. № CN207970865U; *б* – пат. № CN207970866U; *в* – пат. № RU135532U1

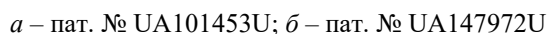
Рис. 26 – Сферичні насадки з обертовими елементами (пат. № CN207970865U, CN207970866U)

Взагалі конструкції газорозподільних пристроїв тепломасообмінних колон, а також апаратів псевдозрідженого шару, які можуть бути використані в тепломасообмінних колонах, докладно розглянуто в працях [42–44].

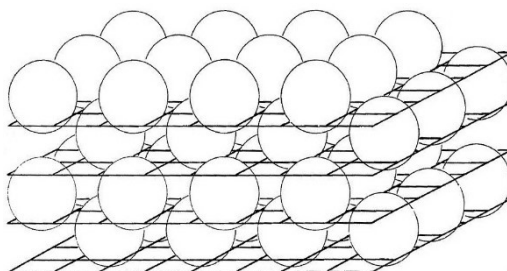
Контактну зону колони за допомогою сіткового каркаса поділено на окремі секції, у кожній з яких встановлено кульку (пат. № CN207628427U). Фази інтенсивно перемішуються й диспергуються не тільки проходячи крізь комірки сітки, але й обтікаючи кульки, що хаотично рухаються в секціях.

Насадка у вигляді циліндричної оболонки із закріпленою в її порожнині на пружних елементах кулькою, що коливається під дією оброблюваних фаз (пат. № UA101453U; рис. 27,а). В удосконаленій насадці всередині осового вертикального каналу кульки на пружинах встановлено додаткову кульку, яка також незалежно від більшої кульки коливається під дією оброблюваних фаз (пат. UA 110926U).

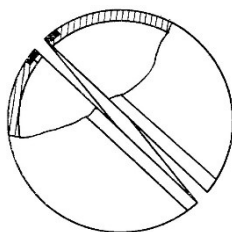
Насадка містить оболонку у вигляді порожнистого кільцевого циліндра з двома відкритими основами, всередині якої з проміжком відносно неї розташовано кульку, зафіксовану між розпірними пружинами, при цьому на внутрішній поверхні стінки оболонки поблизу її основ виконано кільцеві або спіральні пази, розпірні пружини виконано конічними, а більший виток кожної розпірної пружини розміщено у відповідному кільцевому або спіральному пазу оболонки (пат. № UA147972U; рис. 27,б). Технічне рішення спрощує складання й розбирання елемента, збільшує питому поверхню елемента, а також забезпечує рухливість вставки в усіх напрямках, що інтенсифікує процес тепломасообміну.



Положення елементів сферичної насадки визначається розмірами комірок горизонтальних сіток, а також відстанню між ними (пат. № СН506446А; рис. 28). Варіюванням зазначених параметрів, а також густиною матеріалу насадки досягають бажану рухливість цих елементів.



До апаратів зі складним (комбінованим) рухом насадки можна віднести колону з рухливою насадкою. кожен елемент якої виконано у вигляді сфери, що складається з двох півсфер, з'єднаних між собою пружним елементом (а. с. № SU430872A1; рис. 29). Під впливом потоків фаз насадка перебуває у режимі псевдозрідження, а її півсфери коливаються. Недолік насадки – можливість утворення застійних зон в западині нижньої півсфери за умови розташування пружного елемента в площині, близькій до горизонтальної.

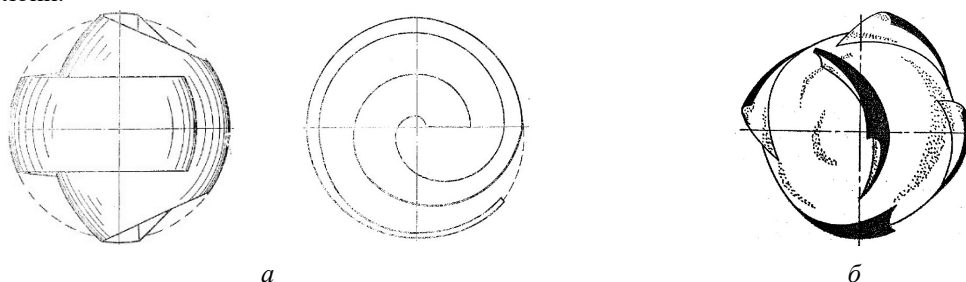


35

Елемент насадки у вигляді сферичної оболонки з місцевим стовщенням з боку внутрішньої поверхні (а. с. № SU698639A1). У висхідному потоці зріджувального агента елемент розташовується стовщенням вниз, що підвищує стійкість його положення та знижує гідравлічний опір шару насадки.

Сферичну насадку виконано у вигляді згорнутої в спіраль стрічки змінної ширини (а. с. № SU570387A1; рис. 30,а).

Куляста насадка має криволінійні лопаті, які збільшують її поверхню та спричиняють інтенсивне обертання під дією оброблюваних фаз (а. с. № SU1095971A1; рис. 30,б). Недоліки насадки – складність виконання лопатей, а також можливість їх пошкодження в разі ударів елементів насадок між собою та зі стінками колони.



а – нерегулярна (а. с. № SU570387A1); б – куляова з криволінійними лопатями (а. с. SU1095971A1)

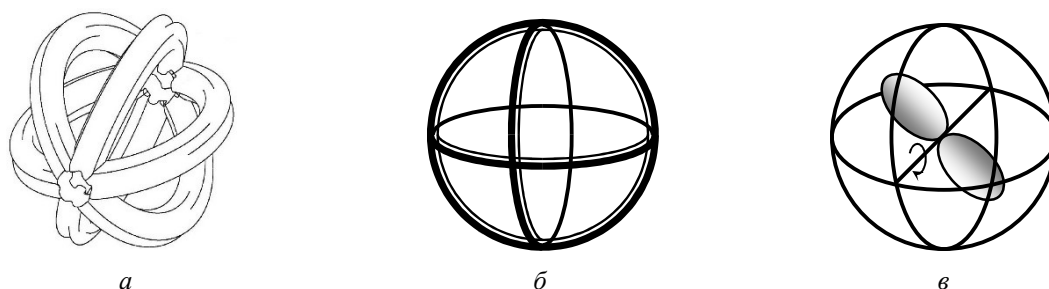
Рис. 30 – Сферичні насадки (а. с. SU1095971A1)

Рухлива насадка у вигляді сфери з розташованою в її центрі кулею, густина матеріалу якої вища за густину матеріалу сфери, при цьому простір між сферою й кулею заповнено пористим матеріалом (а. с. № SU1271549A1). Залежно від співвідношення розмірів і густин матеріалів частин елемента насадки забезпечується його ефективне обертання в процесі роботи.

Виконана у вигляді деталі умовно сферична насадка, яку одержують одночасною екструзією декількох полімерних стренг, має форму сфери або еліпсоїда (заявка № US2017/190075A1; рис. 31,а). Зазначений елемент характеризується високою технологічністю та безвідхідністю під час виготовлення [29, 30].

Також розроблено умовно сферичні насадки, що містять три кільцеві елементи, розташовані в трьох взаємноперпендикулярних площинах і безпосередньо з'єднані між собою (пат. UA42587U, UA133098U, UA158209U; рис. 31,б).

В аналогічні насадці на поперечній осі всередині кілець встановлено обертовий елемент (пат. № UA131563U; рис. 31,в). У разі встановлення на поперечній осі додаткових обертових елементів сусідні обертові елементи встановлено з можливістю обертання в протилежних напрямках, що підвищує турбулізацію оброблюваних фаз.



а – заявка № US2017/190075A1; б – пат. UA133098U; в – пат. № UA131563U

Рис. 31 – Умовно сферичні насадки

Наведену на рис. 31,в насадку було удосконалено: поперечну вісь вільно обертового елемента встановлено всередині трьох кілець-рамок, зовнішню з яких закріплено з можливістю обертання всередині сітчастої сфери, середню – з можливістю обертання всередині зовнішньої рамки, а внутрішню – з можливістю обертання всередині середньої рамки, при цьому осі обертання сусідніх рамок розташовано у взаємно

перпендикулярних площинах (пат. № UA157216U). Зазначене технічне рішення утворює всередині сітчастої сфери триступеневий гіростабілізатор, який забезпечує автоматичне встановлення обертового елемента відносно руху потоків оброблюваних фаз та його надійне обертання, що підвищує надійність роботи елемента насадки та стабільність процесу взаємодії фаз в тепломасообмінному апараті.

Умовно сферичну насадку виконано у вигляді вписаних у сферу трьох круглих дисків, розташованих у взаємно перпендикулярних площинах (а. с. № SU237100A1). Елемент не виключає утворення застійних зон у місці перетину дисків.

Зазначеного недоліку позбавлено умовно куляста насадка у вигляді горизонтального круглого диска з центральним отвором і скріплених з ним трьох круглих вертикальних кілець, розташованих під кутом 120° між собою (а. с. № SU990278A1; рис. 32). Проте цей елемент досить складний у виготовленні.

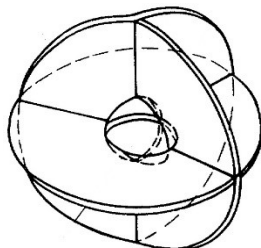
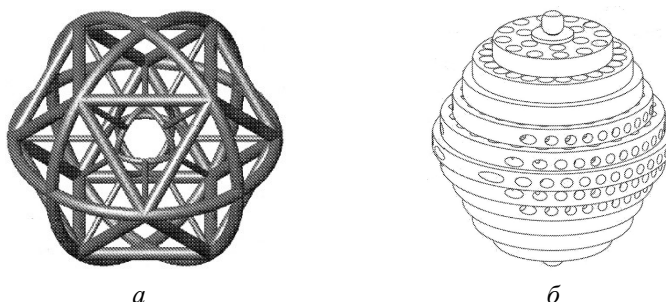


Рис. 32 – Умовно сферична насадка (а. с. № SU990278A1)

Умовно сферична насадка містять три кільцеві елементи, розташовані в трьох взаємноперпендикулярних площинах і безпосередньо з'єднані між собою, а також прямолінійними стрижнями з утворенням розвиненої кістякової структури (пат. CN120437939A; рис. 33,а).

Ще одну умовно сферичну насадку складено у вигляді пакета дисків різного діаметра з осьовими й радіальними отворами (пат. CN215877964U; рис. 33,б). Недоліки конструкції – значна матеріалоемність і схильність отворів до забруднення.



а – кістякової структури (пат. № CN120437939A); *б* – пакетної структури (пат. № CN215877964U)

Рис. 33 – Умовно сферичні насадки

Різнорамні конструкції умовно сферичних і півсферичних насадок також розглянуто в пат. EP3254753A1, GB2609754A, FR2112104A7, US5217616A, US5690819A, CN204865854U, CN205146237U, CN205146239U, CN209138648U, CN209222146U, CN209501693U, CN211099078U, CN215783405U, CN218901879U, CN221619462U, CN222152056U, RU2656483C1, SU679113A3, а. с. № SU1703171A1, а також у заявці № WO2017/211622A1.

Висновки. Незважаючи на велику різнорамність типів насадок як контактних елементів тепломасообмінних колон, науковці, інженери та винахідники продовжують удосконалювати їхні конструкції, а також способи їх розміщення в контактній частині колонних апаратів. Крім найбільш поширених циліндричних насадок це стосується й таких простих у конструктивному виконанні насадок як сферичних, виконуваних зазвичай у вигляді куль і сферичних оболонок. При цьому увага приділяється не лише сферичним насадкам безпосередньо, а й способам і засобам для їх укладання в контактній частині тепломасообмінних колон для забезпечення потрібного гідродинамічного режиму оброблюваних фаз, що підвищує інтенсивність та ефективність масообмінного процесу.

Проведений аналіз дає можливість упевнено стверджувати, що сферичні насадки можуть успішно конкурувати з іншими типами контактних пристроїв тепломасообмінних колон, насамперед у колонах з рухливою насадкою.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати стан питання й напрямки вдосконалення насадок іншої форми, а також тарілчастих контактних елементів тепломасообмінних колон.

Список використаної літератури

1. Врагов А. П. Масообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв. Суми : Університетська книга, 2007. 284 с.
2. Mikulionok I. O. Classification of Nozzles of Mass Transfer Apparatuses // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 83, № 9. P. 1631–1637. DOI: 10.1134/S107042721109031X
3. Мікульонюк І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 340 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>
4. Мікульонюк І. О. Контактні та допоміжні пристрої тепломасообмінних колон. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 194 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50142>
5. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л., ГОТЛІНСЬКА А. П., ЛЕЩЕНКО В. О., НЕЧИПОРЕНКО І. О., ЧЕРНИШОВ І. С. Процеси та апарати хімічної технології. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. 1016 с. URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/itpa1/nmkd-obovuyazkovi/>
6. Андреев І. А. Колонні апарати. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 74 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/72186>
7. Малежик І. Ф., Зав'ялов В. Л., Шевченко О. Ю., Мирончук В. Г., Пушанко М. М., Змієвський Ю. Г., Мисюра Т. Г., Дубковецький І. В., Ткачук Н. А., Запорожець Ю. В., Зоткіна Л. В. Процеси і апарати харчових виробництв. Київ : НУХТ, 2021. 419 с.
8. Іваненко О. І., Носачова Ю. В. Техноекоекологія. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2017. 294 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Ivanenko_2017_294.pdf
9. Пляцук Л. Д., Васькін Р. А., Шаповров В. П., Мойсєєв В. Ф., Гурець Л. Л., Гринь Г. І., Манойло Є. В., Пітак І. В., Пономарьова Н. Г., Комариста Б. М. Процеси та апарати природоохоронних технологій : у 2 т. Суми : Сумський державний університет, 2017. Т. 2. 521 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/62729>
10. Мікульонюк І. О. Масообмінні процеси та обладнання виробництва полімерних і будівельних матеріалів і виробів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 198 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/77339>
11. Mikulionok I. O. Ring packing contact elements of mass transfer devices (review of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54, № 1–2. P. 125–129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0450-y>
12. Мікульонюк І. О., Лукінюк М. В. Розміщення орієнтованої кільцевої насадки в колонних тепломасообмінних апаратах (Огляд) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2025. № 1(24). С. 26–36. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2025.325834
13. Mikulionok I. O. Classification of the Packing Contact Elements of Mass-Exchange Towers with Second-Order form of the Surfaces (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 57, № 11–12. P. 976–981. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01034-y>
14. Мікульонюк І. О., Лукінюк М. В. Прикладне застосування стрічки Мебіуса (Огляд) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2025. № 2(25). С. 32–52. DOI: 10.20535/2617-9741.2.2025.333973
15. Мікульонюк І. О., Іваненко О. І. Призматичні насадки тепломасообмінних колон (Класифікація та огляд конструкцій) // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2025. № 3(24). С. 22–40. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2025.340372
16. Mikulionok I. O. Classification of stamped packing elements of mass-exchange apparatuses (survey of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 56, № 9–10. P. 861–869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00853-9>
17. von Seckendorff J., Hinrichsen O. Review on the Structure of Random Packed-Beds // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2021. Vol. 99, № S3. P. S703–S733. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.23959>
18. Augier F., Idoux F., Delenne J. Y. Numerical simulations of transfer and transport properties inside packed beds of spherical particles // Chemical Engineering Science. 2010. Vol. 65, № 3. P. 1055–1064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.059>
19. Acetis J. D., Thodos G. Mass and Heat Transfer in Flow of Gases Through Spherical Packings // Industrial &

- Engineering Chemistry. 1960. Vol. 52, № 12. P. 1003–1006. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50612a026>
20. Shams K., Fayazbakhsh A. Dynamics of reactive chromatographic columns of inertcore/hollow/film coated spherical packing: An analytical solution and applications // *Journal of Chromatography A*. 2014. Vol. 1370. P. 93–104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2014.10.032>
 21. Jaffray C., Siddiqui K., Straatman A. G. An efficient method for modelling thermal energy storage in packed beds of spherically encapsulated phase change material // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 81. Article 110462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110462>
 22. Nijemeisland M., Dixon A. G. CFD Study of Fluid Flow and Wall Heat Transfer in a Fixed Bed of Spheres // *AIChE Journal*. 2004. Vol. 50, № 5. P. 906–921. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10089>
 23. Yang J., Wang Q., Zeng M., Nakayama A. Computational study of forced convective heat transfer in structured packed beds with spherical or ellipsoidal particles // *Chemical Engineering Science*. 2010. Vol. 65, № 2. P. 726–738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.026>
 24. Мікульонюк І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 419 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061>
 25. Мікульонюк І. О. Виготовлення обладнання хімічних виробництв. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 236 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358>
 26. Chatre L., Socci J., Adams S. J., Denissenko P., Cherkasov N. Design of 3D-printed structures for improved mass transfer and pressure drop in packed-bed reactors // *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 420, Part 1. Article 129762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129762>
 27. Ramya A., Vanapalli S. I. 3D Printing Technologies in Various Applications // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2016. Vol. 7, N 3. P. 396–409. URL: https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_3/IJMET_07_03_036.pdf
 28. Shahrubudin N., Lee T. C., Ramlan R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 35. P. 1286–1296. DOI: [10.1016/j.promfg.2019.06.089](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089)
 29. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. 3-тє вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 296 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68766>
 30. Мікульонюк І. О. Технологія перероблення полімерів. 5-тє вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 314 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74268>
 31. Мікульонюк І. О. Інтелектуальна власність та патентознавство. 5-тє вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. 248 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68179>
 32. Мікульонюк І. О. Оформлення заявки на винахід і заявки на корисну модель. 4-тє вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського : Інститут газу НАНУ, 2025. 202 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/72376>
 33. Мікульонюк І. О. Печі та топки для спалювання твердих побутових відходів (Огляд конструкцій) // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. Т. 74, № 1. С. 59–80. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2023.06>
 34. Андреев І. А., Зубрій О. Г., Мікульонюк І. О. Застосування матеріалів у хімічному машинобудуванні. Сталі й чавуни. Київ : ІЗМН, 1999. 148 с.
 35. Доброногов В. Г., Мікульонюк І. О. Застосування корозійностійких, жаростійких, жароміцних сталей і сплавів у хімічному машино- та апаратобудуванні. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 264 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37716>
 36. Лукашова В. В., Мікульонюк І. О., Радченко Л. Б. Екструзія пінополімерів. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 176 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37522>
 37. Mikulenok I. O. Designs of bubble caps of the contact plates of mass-exchange columns (review of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, № 5–6. P. 410–417. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0495-y>
 38. Mikulionok I. O. Design of the valves of the contact plates of mass-transfer columns (survey of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 55, № 9–10. P. 762–771. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00881-5>
 39. Mikulionok I. O. Classification of the designs of the stamped contact plates of mass-exchange columns (survey of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 55, № 9–10. P. 847–855. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00703-0>
 40. Mikulyonok I. O. Combined contact devices for mass-exchange towers // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2012. Vol. 48, № 1–2. P. 71–76. DOI: [10.1007/s10556-012-9576-5](https://doi.org/10.1007/s10556-012-9576-5)
 41. Mikulionok I. O. Classification of the Structures of Volume-Exchange Towers with Loose Packing (Survey of Patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57, № 3–4. P. 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00941-w>

42. Mikulionok I. O. Plate-Type Gas Distribution Grids for Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57, № 1–2. P. 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00911-2>
 43. Mikulionok I. O. Classification of Gas-Distribution Grids of Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57, № 3–4. P. 346–353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00927-8>
 44. Mikulionok I. O. Classification of Devices for Introduction and Distribution of Light Phase in Mass-Exchange Columns (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, № 5–6. P. 427–432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01110-3>
-

Ihor Mikulionok, Olena Ivanenko

SPHERICAL HEAT AND MASS EXCHANGE COLUMN PACKING (Classification and Design Survey)

The subject of the study is the design of spherical packing of heat and mass exchange columns, as well as methods of their placement in the contact zone of the column.

The purpose of the article is a critical analysis of the designs of heat and mass exchange column packing in the shape of a sphere, which are used in chemical, petrochemical, oil refining, food, microbiological, thermal power, fluid industrial emissions treatment systems, and other industries.

One of the most common contact elements of column heat and mass exchangers used in the chemical, petrochemical, oil refining, food, microbiological, and heat and power industries, as well as in systems for cleaning liquid and gas industrial streams, there are packing, perhaps the simplest of which are spherical packing, namely balls or spherical shells usually made of porcelain, glass, ceramics, metal or polymer material. Like the more common annular cylindrical packing, the spherical packing is characterized by high manufacturability and versatility, but at the same time it has such disadvantages as low specific surface area and free volume, as well as high material consumption. Due to its symmetrical and streamlined shape, the spherical packing as a whole or the spherical components of the packing are widely used as a moving packing, particularly in fluidized bed heat and mass exchangers. Recently, simpler spherical packing in the form of solid balls, which are characterized by high material consumption, have been replaced by lighter packing in the form of spherical shells with various elements for turbulization and increasing the specific surface area. It can be confidently stated that spherical packing can successfully compete with other types of contact devices in heat and mass exchange columns.

The above design survey may be useful to designers and inventors in finding innovative technical solutions in the field of contact elements of heat and mass exchange columns.

Keywords: *heat and mass exchange columns, packing, sphere, classification, design, patent, patent application*

References

1. Vragov, A. P. (2007). Masoobminni protsesy ta obladnannia khimichnykh i gazonaftopererobnykh vorobnystv [Mass transfer processes and equipment of chemical and gas-oil processing industries]. Universytetska knyga, Sumy (Ukr.)
2. Mikulionok I. O. (2011). Classification of Nozzles of Mass Transfer Apparatuses. *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 83, no. 9, pp. 1631–1637. DOI: 10.1134/S107042721109031X
3. Mikulionok, I. O. (2014). Mekhanichni, hidromekhanichni i masoobminni protsessy ta obladnannia khimichnoi tekhnologii [Mechanical, Hydromechanical, and Mass-Exchange Processes and Equipment in Chemical Engineering]. Kyiv : NTUU "KPI". URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169> (Ukr.)
4. Mikulionok, I. O. (2022). Kontaktni ta dopomizhni prystroi teplomasoobminnykh kolon [Contact and auxiliary devices of heat and mass exchange columns]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50142> (Ukr.)
5. Tovazhnianskyi, L. L., Gotlinska, A. P., Leshchenko, V. O., Nechyporenko, I. O., Chernyshov, I. S. (2024). Protsessy ta aparaty khimichnoi tekhnologii [Chemical technology processes and apparatuses]. NTU "KhPI", Kharkiv. URL: <https://web.kpi.kharkov.ua/itpa1/nmkd-obovyazkovi/> (Ukr.)
6. Andreiev, I. A. (2025). Kolonni aparaty [Column apparatuses]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/72186> (Ukr.)
7. Malezhyk, I. F., Zavialov, V. L., Shevchenko, O. Yu., Myronchuk, V. G., Pushanko, M. M., Zmiievskyi, Yu. G., Mysiura, T. G., Dubkovetskyi, I. V., Tkachuk, N. A., Zaporozhets, Yu. V., Zotkina, L. V. (2021). Protsessy i

- aparaty kharchovykh vyrobnytstv [Food production processes and equipment]. NUKhT, Kyiv. (Ukr.)
8. Ivanenko, O. I., Nosachova, Yu. V. (2017). Tekhnoekologiya [Technoecology]. Vydavnychiy dim "Kondor", Kyiv. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Ivanenko_2017_294.pdf (Ukr.)
 9. Pliatsuk, L. D., Vaskin, R. A., Shaporev, V. P., Moisieiev, V. F., Gurets, L. L., Gryn, G. I., Manoilo, Ye. V., Pitak, I. V., Ponomarova, N. G., Komarysta, B. M. (2017). Protsessy ta aparaty pryrodookhoronnykh tekhnologii [Environmental protection technology processes and devices]. Sumy State University, Sumy. Vol. 2. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/62729> (Ukr.)
 10. Mikulionok, I. O. (2025). Masoobminni protsessy ta obladnannia vyrobnytstva polimernykh i budivelnnykh materialiv i vyrobiv [Mass transfer processes and equipment for the production of polymer and building materials and products]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/77339> (Ukr.)
 11. Mikulionok, I. O. (2018). Ring packing contact elements of mass transfer devices (review of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 54, no. 1–2, pp. 125–129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0450-y>
 12. Mikulionok, I. O., Lukiniuk, M. V. (2025). Rozmishchennia oriientovanoi kiltsevoi nasadky v kolonnykh teplomasoobminnykh aparatakh (Ogliad) [Location of oriented ring packing elements in column heat and mass exchange apparatus (Review)]. *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*, no. 1(24), pp. 26–36. DOI: 10.20535/2617-9741.1.2025.325834 (Ukr.)
 13. Mikulionok, I. O. (2022). Classification of the Packing Contact Elements of Mass-Exchange Towers with Second-Order form of the Surfaces (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no. 11–12, pp. 976–981. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01034-y>
 14. Mikulionok, I. O., Lukiniuk, M. V. (2025). Prykladne zastosuvannia strichky Mebiusa (Ogliad) [Applications of the Möbius strip (Review)]. *Visnyk Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*, no. 2(25), pp. 32–52. DOI: 10.20535/2617-9741.2.2025.333973 (Ukr.)
 15. Mikulionok, I. O., Ivanenko, O. I. (2025). Pryzmatychni nasadky teplomasoobminnykh kolon (Klasyfikatsiia ta ogliad kondtrihtsi) [Prismatic heat and mass exchange column packing (Classification and Design Survey)]. *Visnyk Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*, no. 3(24), pp. 22–40. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2025.340372
 16. Mikulionok, I. O. (2021). Classification of stamped packing elements of mass-exchange apparatuses (survey of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 56, no. 9–10, pp. 861–869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00853-9>
 17. von Seckendorff, J., Hinrichsen, O. (2021). Review on the Structure of Random Packed-Beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 99, no. S3, pp. S703–S733. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.23959>
 18. Augier, F., Idoux, F., Delenne, J. Y. (2010). Numerical simulations of transfer and transport properties inside packed beds of spherical particles. *Chemical Engineering Science*, vol. 65, no. 3, pp. 1055–1064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.059>
 19. Acetis, J. D., Thodos, G. (1960). Mass and Heat Transfer in Flow of Gases Through Spherical Packings. *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 52, no. 12, pp. 1003–1006. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie50612a026>
 20. Shams, K., Fayazbakhsh, A. (2014). Dynamics of reactive chromatographic columns of inertcore/hollow/film coated spherical packing: An analytical solution and applications. *Journal of Chromatography A*, vol. 1370v pp. 93–104. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2014.10.032>
 21. Jaffray, C., Siddiqui, K., Straatman, A. G. (2024). An efficient method for modelling thermal energy storage in packed beds of spherically encapsulated phase change material. *Journal of Energy Storage*, vol. 81, article 110462. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110462>
 22. Nijemeisland, M., Dixon, A. G. (2004). CFD Study of Fluid Flow and Wall Heat Transfer in a Fixed Bed of Spheres. *AIChE Journal*, vol. 50, no. 5, pp. 906–921. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.10089>
 23. Yang, J., Wang, Q., Zeng, M., Nakayama, A. (2010). Computational study of forced convective heat transfer in structured packed beds with spherical or ellipsoidal particles. *Chemical Engineering Science*, vol. 65, no. 2, pp. 726–738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.026>
 24. Mikulionok, I. O. (2012). Vygotovlennia, montazh ta ekspluatatsiia obladnannia khimichnykh vyrobnytstv [Manufacture, installation and operation of chemical equipment]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061> (Ukr.)
 25. Mikulionok, I. O. (2022). Vygotovlennia obladnannia khimichnykh vyrobnytstv [Manufacture of chemical equipment]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358> (Ukr.)
 26. Chatre, L., Socci, J., Adams, S. J., Denissenko, P., Cherkasov, N. (2021). Design of 3D-printed structures for

- improved mass transfer and pressure drop in packed-bed reactors. *Chemical Engineering Journal*, vol. 420, part 1, article 129762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129762>
27. Ramya, A., Vanapalli, S. I. (2016). 3D Printing Technologies in Various Applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 7, no. 3, pp. 396–409. URL: [Ahttps://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_3/IJMET_07_03_036.pdf](https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_3/IJMET_07_03_036.pdf)
28. Shahrubudin, N., Lee, T. C., Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 1286–1296. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
29. Mikulionok, I. O. (2024). Technologiczni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv [Technological bases of polymer materials processing]. 3rd ed. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68766> (Ukr.)
30. Mikulionok, I. O. (2025). Technologiia pereroblennia polimeriv [Polymer processing technology]. 5th ed. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74268> (Ukr.)
31. Mikulionok, I. O. (2024). Intelktualna vlasnist ta patentoznavstvo [Intellectual property and patent law]. 5th ed. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Publishing house "Politehnika", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/68179> (Ukr.)
32. Mikulionok, I. O. (2025). Oformlennia zaiavky na vynakhid i zaiavky na korysnu model [Filing an application for an invention and an application for a utility model]. 4th ed. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine., Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/72376> (Ukr.)
33. Mikulionok, I. O. (2023). Pechi ta topky dlia spaliuvannia tverdykh pobutovykh vidkhodiv (Ogliad konstrukttsii) [Municipal Solid Waste Incineration Furnaces (Review)]. *Energotekhologii ta resursozberezhennia*, vol. 74, no. 1, pp. 59–80. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.1.2023.06> (Ukr.)
34. Andreiev, I. A., Zubrii, O. G., Mikulionok, I. O. (1999). Zastosuvannia materialiv u khimichnomu mashinobuduvanni. Stali i chavuny [Application of materials in chemical engineering. Steels and cast irons]. IZMN, Kyiv. (Ukr.)
35. Dobronogov, V. G., Mikulionok, I. O. (2011). Zastusuvannia koroziinostiikykh, zharostiikykh, zharomirnykh staley i splaviv u khimichnomu mashino- ta aparatobuduvanni [Application of corrosion-resistant and heat-resistant steels and alloys in chemical engineering]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37716> (Ukr.)
36. Lukashova, V. V., Mikulionok, I. O., Radchenko, L. B. (2011). Ekstruziia pinopolimeriv [Extrusion of foam polymers]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37522> (Ukr.)
37. Mikulionok, I. O. (2018). Designs of bubble caps of the contact plates of mass-exchange columns (review of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 54, no. 5–6, pp. 410–417. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0495-y>
38. Mikulionok, I. O. (2020). Design of the valves of the contact plates of mass-transfer columns (survey of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 55, no. 9–10, pp. 762–771. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00881-5>
39. Mikulionok, I. O. (2020). Classification of the designs of the stamped contact plates of mass-exchange columns (survey of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 55, no. 9–10, pp. 847–855. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00703-0>
40. Mikulionok, I. O. (2012). Combined contact devices for mass-exchange towers. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no. 1–2, pp. 71–76. DOI: 10.1007/s10556-012-9576-5
41. Mikulionok, I. O. (2021). Classification of the Structures of Volume-Exchange Towers with Loose Packing (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no. 3–4, pp. 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00941-w>
42. Mikulionok, I. O. (2021). Plate-Type Gas Distribution Grids for Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no. 1–2, pp. 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00911-2>
43. Mikulionok, I. O. (2021). Classification of Gas-Distribution Grids of Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no. 3–4, pp. 346–353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00927-8>
44. Mikulionok, I. O. (2022). Classification of Devices for Introduction and Distribution of Light Phase in Mass-Exchange Columns (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 58, no. 5–6, pp. 427–432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01110-3>