

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 66.021.3:66.069.833-023.8-026.29(048.83)

МКУЛЬОНОК І. О.^{*1,2}, ШВАЧКО Д. Г.¹

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

² Інститут газу Національної академії наук України

ТЕПЛОМАСООБМІННІ НАСАДКИ З ФОРМОЮ ТІЛ ОБЕРТАННЯ (Класифікація та огляд конструкцій)

Одними з найбільш простих та ефективних контактних елементів тепломасобмінних колон, які використовуються насамперед у хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій, мікробіологічній і теплоенергетичній галузях промисловості, є насадки з формою тіл обертання, одними з основних переваг яких є обумовлений їхньою обтічною формою низький гідравлічний опір, а також відсутність застійних зон у шарі насадки. До цих насадок насамперед належать контактні елементи у вигляді прямих кругових циліндра й конуса, кулі (сфери), тора, еліпсоїда обертання, однопорожнинного гіперболоїда, бочки, тіл оживальної та іншої обтічної форми. Завдяки своїй симетричній та обтічній формі насадки з формою тіл обертання, насамперед у вигляді кулі (сфери), широко використовуються як рухома насадка, в апаратах рухомого, зокрема псевдозрідженого, шару. Останнім часом замість більш простої за конструкцією, але одночасно більш матеріаломісткої суцільної насадці з великою масою й низькою питомою поверхнею, все частіше використовують більш легкі насадки у вигляді оболонок з елементами для збільшення питомої поверхні й турбулізації потоків оброблюваних фаз, зокрема у вигляді оболонок кістякової структури, які можна виготовляти 3D-друком з різноманітних конструкційних матеріалів.

Ключові слова: тепломасообмінні контактні пристрої, насадка, тіло обертання, класифікація, конструкція, патент, заявка на патент

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2026.365623

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 22 March 2026; Accepted 08 May 2026

Постановка проблеми

Одними з найбільш простих, ефективних і надійних контактних елементів тепломасобмінних колон, які використовуються передусім у хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій, мікробіологічній і теплоенергетичній галузях промисловості, є насадки, які представляють собою тверді тіла різноманітного типорозміру та призначені для заповнення ними контактної частини тепломасообмінного колонного апарата для забезпечення ефективної взаємодії в ньому оброблюваних текучих фаз [1–13].

При цьому одними з найбільш технологічних у виготовленні та зручних в експлуатації є насадки з формою тіл обертання, найбільш поширеними з яких є насадки у формі прямого кільцевого циліндра – кільця Рашига [14–19], а також сферичні насадки [19, 20].

Очевидними перевагами насадок з формою тіл обертання є високі технологічність та універсальність, обумовлений їхньою обтічною формою низький гідравлічний опір, а також відсутність застійних зон у нерухомому (фіксованому) шарі насадки. Саме ці їхні властивості й спонукають винахідників і дослідників розробляти та впроваджувати у виробництво нові конструкції насадок з формою тіл обертання.

Аналіз попередніх досліджень

Натепер ґрунтовно досліджено конструктивно-технологічне оформлення насадок такої форми як насадка у вигляді прямого кругового порожнистого циліндра (кільцева насадка – кільце Рашига та його розвиток) [14–18], насадка з формою поверхні другого порядку [19], насадка у формі стрічки Мебіуса [21], призматична насадка [22], а також волокнисті, дротяні і стрижневі насадки [23].

Серед насадок з формою другого порядку значну увагу приділено сферичній насадці [19, 20]. Досліджено особливості гідродинаміки, тепло- й масообміну у фіксованому шарі сферичної насадки як за умови її

неорієнтованого розташування («внавал») [24, 25], так і орієнтованого розташування: у коридорному [26–28] і шаховому [29, 30] порядку, а також у рухомому, у тому числі й псевдозрідженому, шарі [31, 32].

У той самий час питанню конструктивно-технологічного оформлення насадки з формою тіл обертання докладної уваги приділено не було (крім окремих моментів у деяких публікаціях [10]), хоча переваги цієї насадки, зокрема технологічність, універсальність і низький гідравлічний опір, є очевидними.

Останнім часом, насамперед завдяки інноваційним досягненням матеріалознавців [33, 34], тривимірного друку [35–40], а також широким можливостям комп'ютерного моделювання [41, 42] і штучного інтелекту [43, 44], дослідниками й винахідниками пропонується все більше різноманітних насадок для проведення тепломасообмінних процесів, у тому числі й насадок з формою тіл обертання, тому вільне орієнтування у найбільш перспективних їхніх конструкціях є актуальним завданням для фахівців хімічної інженерії та споріднених з нею галузей промисловості.

Метою статті є критичний аналіз конструкцій насадок тепломасообмінних колон з формою тіл обертання, які застосовуються насамперед у хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій, мікробіологічній і теплоенергетичній галузях промисловості.

Виклад основного матеріалу

Тіло обертання – це тривимірне геометричне тіло, утворене обертанням певної плоскої фігури навколо фіксованої прямої (осі обертання) [45].

Аналіз конструктивно-технологічного оформлення насадок тепломасообмінних колон з формою тіл обертання дає змогу запропонувати їхню класифікацію, наведену на рис. 1.

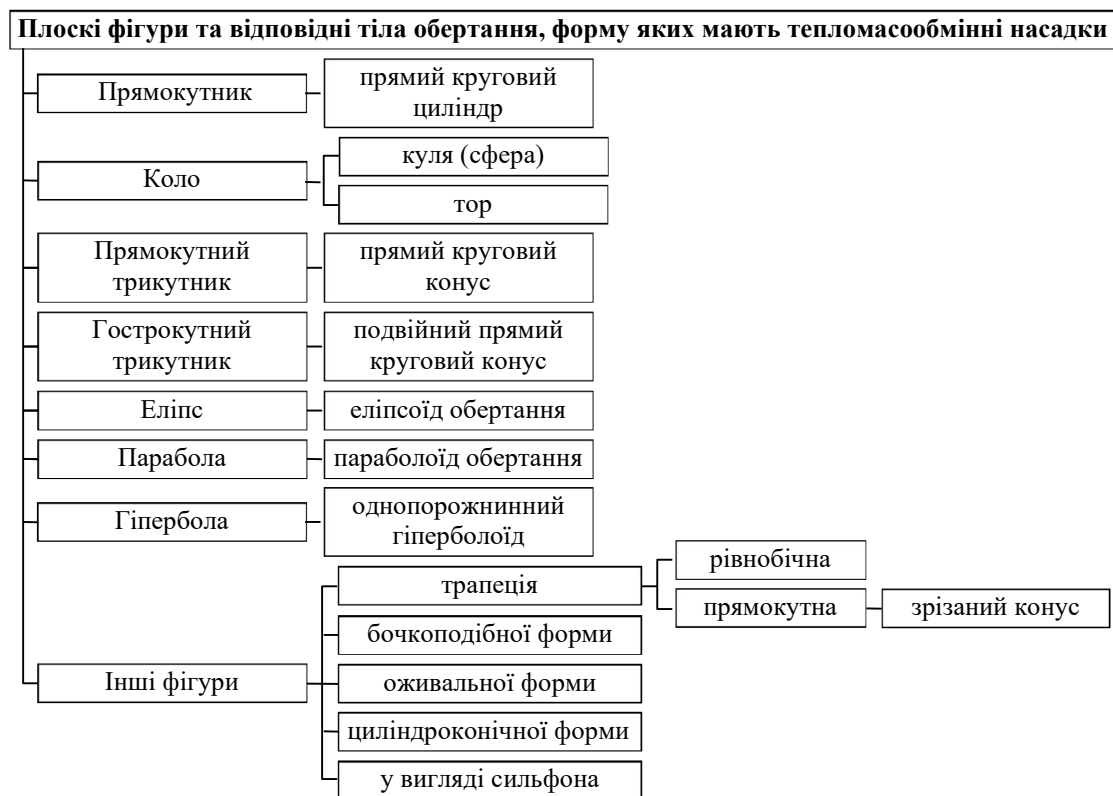


Рис. 1 – Класифікація тепломасообмінних насадок з формою тіл обертання

Одними з найбільш поширених насадок з формою тіл обертання є *насадки у вигляді прямого кругового циліндра*, найбільш відомою з яких є кільце Рашига – металевий або керамічний прямий круговий кільцевий циліндр, висота якого дорівнює його зовнішньому діаметру [14–18] (рис. 2).

На початку промислового застосування Кільця Рашига в контактній частині тепломасообмінної колони розміщували неорієнтовано («внавал»). Проте в цьому разі шар насадки мав високий гідравлічний опір, тому згодом кільця Рашига почали розміщувати орієнтовано, утворюючи так звану регулярну (структуровану) насадку, розташовуючи кільця зазвичай у вертикальному положенні шарами: перший шар на підтримувальну решітку, а кожний наступний – на попередній шар, причому для утворення східчастих, а не трубчастих каналів, шари зазвичай зміщували один відносно одного на половину діаметра насадки [18].



Рис. 2 – Насадка у вигляді прямого кругового циліндра – керамічні кільця Рашига [46]

У подальшому замість щільного розташування сусідніх кілець (у межах певного шару регулярної насадки) було запропоновано низку способів їх розташування з певним проміжком одне відносно одного. Це сприяє вирівнюванню режимів потоків фаз всередині та ззовні кілець, а отже підвищує ефективність проходження процесу тепломасообміну [18].

Разом з короткими циліндричними насадками у вигляді оболонки з суцільною стінкою (кільце Рашига, кільце Лессінга) або декількома наскрізними вікнами (наприклад, кільце Палля [16]) розроблено довгі циліндричні насадки для орієнтованого розташування паралельно одна одній у контактній частині градирень (пат. № RU76110U1, RU110176U1), у тому числі з сітчастою стінкою (пат. № RU2304750C1, RU2317502C1, RU2318171C1, RU2335724C1, RU2335725C1, RU2414662C2, RU2445567C2).

Запропоновано циліндричну насадку, утворену скрученим по довжині спіральним стрижнем з поперечним перерізом у вигляді восьмикутної зірки (пат. № CN1250686A, CN2416957Y; рис. 3).

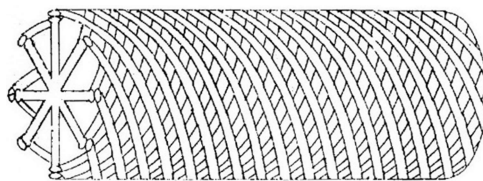


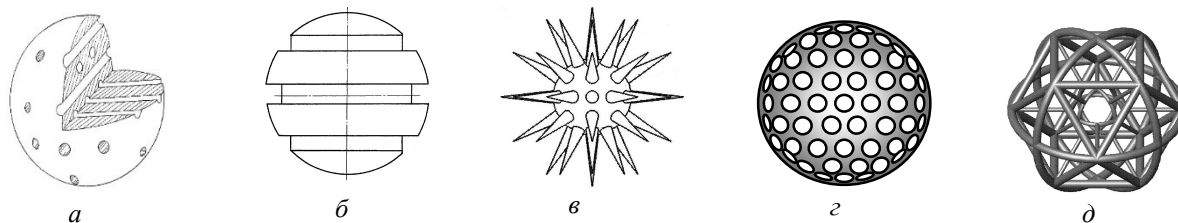
Рис. 3 – Циліндрична насадка з гвинтовою зовнішньою поверхнею (пат. № CN1250686A, CN2416957Y)

Також запропоновано складовий елемент орієнтованої (блочної) насадки у вигляді перфорованої півтруби (пат. № UA50963U).

Більш докладно насадки у вигляді прямого кругового циліндра, які зазвичай називають кільцевими насадками, розглянуто в працях [10, 17, 18].

Другим з найбільш простих типів насадок з формою тіл обертання є *насадки у вигляді кулі (сфери)* [24].

Такі насадки виготовляють у вигляді суцільних куль – гладких (рис. 4, а) та з різноманітними западинами, пазами (рис. 4, б), виступами (рис. 4, в), глухими й наскрізними отворами, сферичних оболонок з гладкою, ребристою й перфорованою поверхнею (рис. 4, г), а також оболонок кістякової структури (рис. 4, д).



а – а. с. № SU572284A1; *б* – а. с. № SU892185A1; *в* – пат. № CN114288980A;
г – пат. № UA71359U; *д* – пат. № CN120437939A

Рис. 4 – Насадка у вигляді кулі (сфери)

Насадка у вигляді перфорованої сфери з двома протилежно розташованими западинами, радіус кожної яких відповідає радіусу самої сфери в недеформованому стані (а. с. № SU1064962A1; рис. 5). Недолік цієї насадки – можливість розташування опуклої частини певного елемента насадки в западині сусіднього елемента й щільного прилягання зазначених елементів на великій площі, яка випадає із сумарної площі шару насадки та призводить до зменшення поверхні контакту оброблюваних фаз.

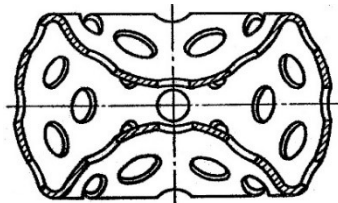


Рис. 5 – Насадка у вигляді перфорованої сфери з двома протилежно розташованими западинами (а. с. № SU1064962A1)

Насадка у вигляді перфорованої півсфери характеризується високим вільним об'ємом, а також технологічністю виготовлення (пат. № CN207839009U; рис. 6). Недолік насадки – у разі безладного розташування насадок у контактній частині апарата можливе розташування сусідніх насадок одна в одній (як у попередній конструкції), що істотно знижує питому поверхню шару насадки.

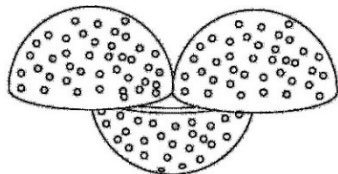


Рис. 6 – Насадка у вигляді перфорованої півсфери (пат. № CN207839009U)

Насадка у вигляді кулі з двома діаметрально видаленими сегментами, а також численними меридіональними виступами на її поверхні й наскрізними каналами в її тілі (пат. № CN209348652U). Недолік насадки, як і більшості насадок у вигляді куль, – значні матеріалоемність і маса.

Запропоновано й інші конструкції сферичних насадок (пат. № CN108745266A, CN120247261A, CN209348651U, CN211837934U, CN215996689U, CN216063297U, CN223221522U, CN223221522U, UA152700U), у тому числі й регульованої маси (пат. № CN119175067A, UA132063U). При цьому в разі застосування орієнтованої (регулярної) сферичної насадки запропоновано різноманітні способи їх укладання в контактній частині тепломасообмінного апарата, у тому числі й із застосуванням елементів для дистанційного розташування сусідніх куль між собою (пат. № EP1364703A1, KR20010042113A, заявка № WO99/48604A1).

Завдяки своїй симетричній формі насадки у вигляді кулі (сфери) застосовують не лише в складі нерухомого, а й рухомого шару, зокрема для формування псевдозрідженого шару (пат. № US3122594A, US3350075A, JPS60212206A, а. с. № SU1369776A1). Наприклад, розроблено рухому насадку у вигляді кулі, розміщеної на вертикальному стрижні з можливістю переміщення вздовж нього (пат. № UA56771U).

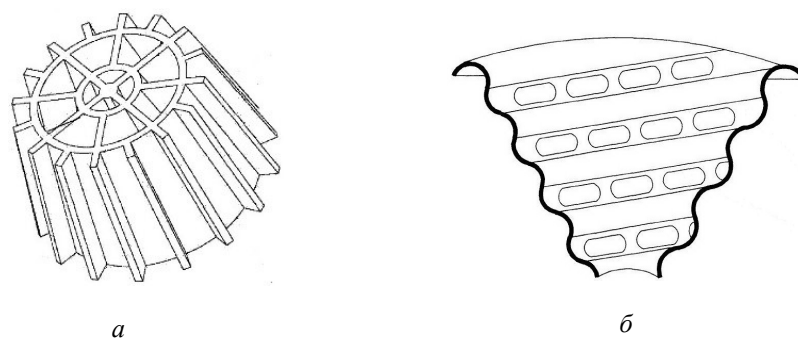
До насадок з формою тіл обертання також належать насадки з поверхнею 2-го порядку, як мають центр симетрії, а саме конус, еліпсоїд обертання та однопорожнинний гіперболоїд [10, 19].

Розроблено насадку у вигляді конічної оболонки з відкритими основами та внутрішніми й зовнішніми поздовжніми ребрами (пат. № ES1109280U, заявка № EP2119499A1; рис. 7, а), а також насадку у вигляді конічної оболонки зі спіральними перфорованими гофрами (пат. № CN1843613A, CN2899929Y; рис. 7, б).

Насадка у вигляді перфорованої конічної оболонки із закріпленою в її порожнині аналогічною конічною оболонкою меншого розміру (а. с. № SU1567262A1). Насадка призначена для формування псевдозрідженого шару.

Насадка у вигляді зрізаного конуса з відігнутими на його поверхні численними пелюстками (а. с. № SU743685A1).

Рухома насадку у вигляді подвійного зрізаного конуса, розміщеного на вертикальному стрижні з можливістю переміщення вздовж нього (пат. № UA790U; рис. 8).



a – пат. № ES1109280U, заявка № EP2119499A1; *б* – пат. № CN1843613A, CN2899929Y

Рис. 7 – Насадки у вигляді зрізаного конуса

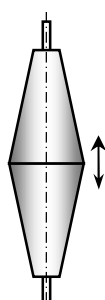
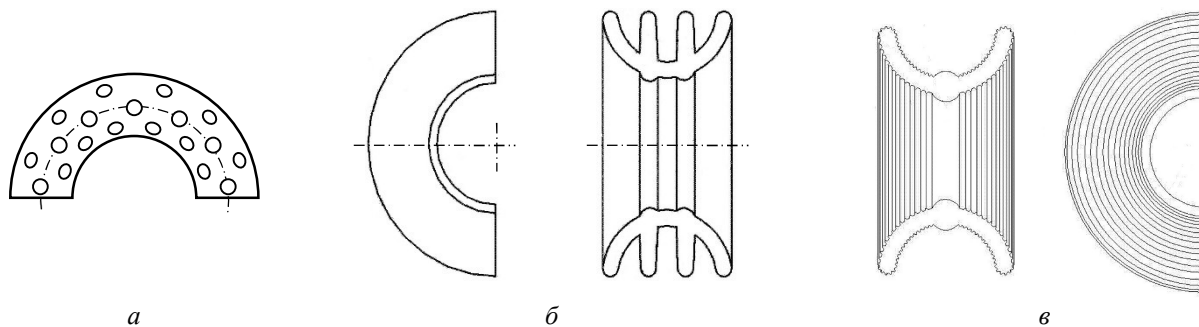


Рис. 8 – Рухома насадка у вигляді подвійного зрізаного конуса (пат. № UA790U)

Розроблено багато конструкцій насадок у формі *тора*, а також його секторів та інших частин. Зокрема запропоновано насадку у вигляді перфорованої оболонки з формою сектора тора з відкритими торцями (пат. № UA2555U; рис. 9, *a*), а також у вигляді оболонки з формою сектора внутрішньої половини тора з кільцевими зовнішніми й внутрішніми ребрами (пат. № CN210303689U, CN103877924A, CN203862250U; рис. 9, *б*).



a – пат. № UA2555U; *б* – пат. № CN210303689U; *в* – пат. № CN103877924A, CN203862250U

Рис. 9 – Насадки у вигляді частини тора

Також розроблено насадку у вигляді оболонки з формою сектора внутрішньої половини тора (так звана «сідлова» насадка) з поздовжніми внутрішніми й поперечними зовнішніми виступами (пат. № UA4980U). Інша сідлова насадка виконана у вигляді сегмента внутрішньої частини тора, при цьому зазначений сегмент виконано несиметричним відносно діаметральної площини тора (пат. № UA122691U).

Неорієнтовані насадки у формі *еліпсоїда обертання* з діаметральним і гвинтовими пазами на його поверхні (пат. № CN205182741U), а також з поздовжніми паралельними наскрізними отворами й зовнішніми пазами (пат. № GB255770A; рис. 10).

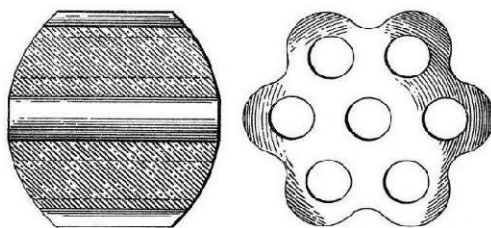


Рис. 10 – Насадка у вигляді еліпсоїда обертання (пат. № GB255770A)

Запропоновано насадки у формі *однопорожнинного гіперboloїда* (пат. № UA2396U), у тому числі із зубчастими основами та перфорованою стінкою (пат. № CN208554215U), а також у вигляді оболонки кістякової структури, основи якої сформовано кільцями, з'єднаними між собою прямолінійними стрижнями, рівномірно розташованими в коловому напрямку та нахиленими до поздовжньої осі насадки в протилежних напрямках (заявка України № u202600427; рис. 11).

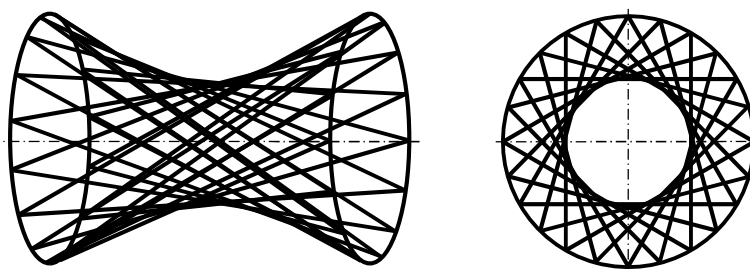


**Рис. 11 – Насадка у вигляді однопорожнинного гіперboloїда кістякової структури
(заявка України № u202600427)**

Насадки у формі *однопорожнинного гіперboloїда* також запропоновано в пат. № CH554527A, CN208554215U, CN212142635U, UA2396U, UA6504U, а. с. № SU1625518A1.

Насадка у вигляді *однопорожнинного гіперboloїда* з циліндричними кінцевими ділянками характеризується підвищеною міцністю найбільш вразливих її частин – основ (а. с. № SU1375302A1; рис. 12). Перевага насадки – висока технологічність, адже її можна виготовляти з циліндричної заготовки обтисканням в штампі її центральної частини з одночасним пробиванням наскрізних отворів для перерозподілу потоків оброблюваних фаз між порожниною насадки та зовнішнім простором і навпаки, а отже й інтенсифікації процесу тепломасообміну в контактній частині колони.

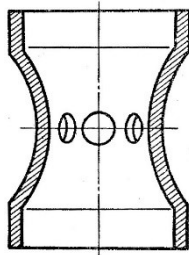


**Рис. 12 – Насадка у вигляді однопорожнинного гіперboloїда з циліндричними кінцевими ділянками
(а. с. № SU1375302A1)**

Насадка циліндроконічної форми виконана у вигляді увігнутої оболонки із взаємно оберненими один до одного меншими основами однаковими зрізаними конусами, з'єднаними між собою круговим кільцевим циліндром (пат. № UA2396U; рис. 13).

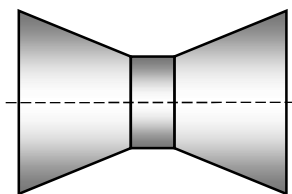


Рис. 13 – Насадка циліндроконічної форми (пат. № UA2396U)

Насадка у вигляді оболонки з формою *бочки* й розміщеним у її порожнині поперечною віссю із змонтованою на ній вільно обертовою гвинтовою (пропелерною) мішалкою (пат. № RU135532U1; рис. 14).

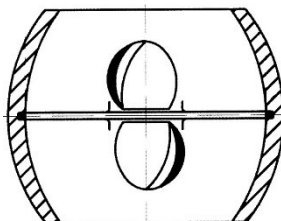


Рис. 14 – Насадка бочкоподібної форми з гвинтовою мішалкою (пат. № RU135532U1)

Елемент у формі тіла обертання з головною *оживальною* частиною або головною частиною у вигляді *параболоїда обертання*, а також кільцевим тороподібним стовщенням її основі та основою у вигляді *гіперболоїда обертання* (заявка № GB2551272A; рис. 15). У процесі роботи зазначена форма елемента під час псевдозрідження насадки забезпечує його стабільне положення у просторі.

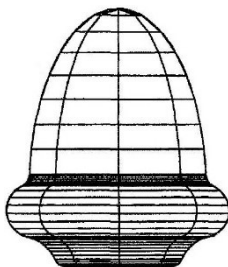


Рис. 15 – Елемент рухомої насадки з головною частиною *оживальної* форми або головною частиною у вигляді *параболоїда обертання* (заявка № GB2551272A)

Насадка у формі оболонки обертання, що складається з кінцевих циліндричних ділянок та проміжної ділянки у вигляді *однопорожнинного гіперболоїда*, при цьому поверхня оболонки виконана з численними прорізами для проходу оброблюваних фаз (пат. № CN212092304U; рис. 16).

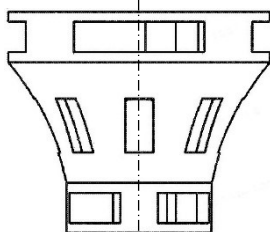


Рис. 16 – Насадка у формі оболонки обертання (пат. № CN212092304U)

Насадка у формі тіла обертання обтічної форми з головною частиною у вигляді сегмента кулі, середньою частиною у вигляді зрізаного конуса та тильною стороною у вигляді півкулі (пат. № DE2200349A1; рис. 17).

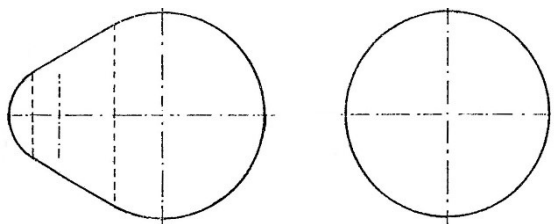


Рис. 17 – Насадка у формі тіла обертання обтічної форми (пат. № DE2200349A1)

Насадка у формі прямого кругового циліндра з півсферичною вершиною та основою у вигляді кульового сегмента (а. с. № SU1526786A1; рис. 18). Форма цієї насадки нагадує форму пістолетної кулі.



Рис. 18 – Насадка у формі тіла обертання обтічної форми (а. с. № SU1526786A1)

Насадка складної аеродинамічної форми, що складається зі зрізаних конусів, двох частин у формі однопорожнинного гіперboloїда, а також кругового диска (заявка № US2025/269349A1; рис. 19). Сукупність змонтованих у певному порядку насадок утворює канал, в якому можуть реалізуватися різноманітні режими течії оброблюваних фаз, у тому числі й режим кавітації.

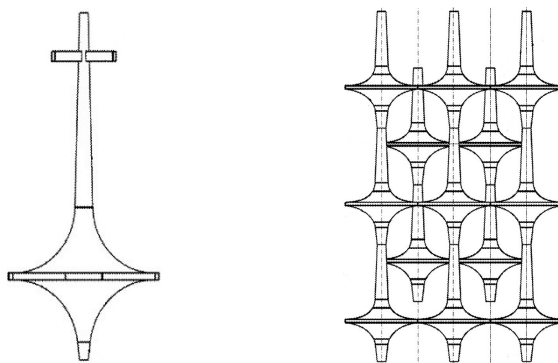


Рис. 19 – Насадка у формі тіла обертання складної аеродинамічної форми та спосіб конструктивного оформлення контактної частини тепломасообмінного апарата (заявка № US2025/269349A1)

Розроблено кульоподібну насадку у вигляді пакета дисків різного діаметра, стягнутих між собою на поздовжньому стрижні (пат. № CN215877964U; рис. 20). Недолік конструкції – низький коефіцієнт уніфікації через значну кількість дисків різного діаметра.

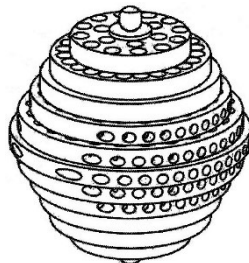


Рис. 20 – Кульоподібна насадка у вигляді пакета дисків різного діаметра (пат. № CN215877964U)

Насадка у формі сильфона, тобто оболонки з кільцевими гофрами (а. с. № SU1212524A1; рис. 21).

Недолік конструкції – утворення застійних зон всередині гофрів за умови горизонтального розташування насадки або в положенні, близькому до горизонтального.

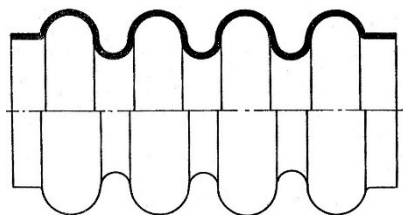
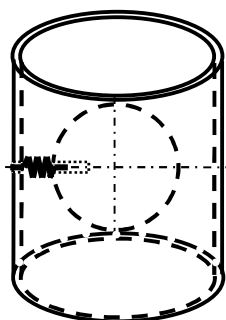
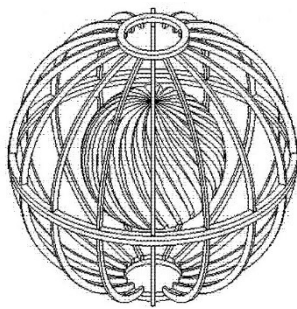


Рис. 21 – Насадка у формі силфона (а. с. № SU1212524A1)

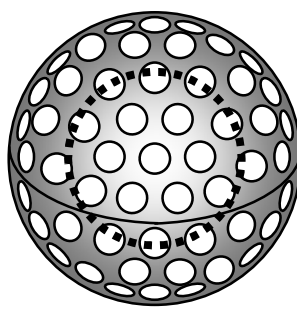
Також розроблено комбіновані насадки, до складу яких входять декілька тіл з формою тіл обертання, наприклад, циліндричну насадку з розміщеною в її порожнині аналогічною, але меншою, рухомою циліндричною оболонкою (пат. № RU189422U1, RU196444U1, RU200775U1, RU200776U1, RU200834U1, RU201933U1, RU201974U1, RU202051U1, а. с. № SU1400649A1) або кулькою (пат. № UA101453U; рис. 22, а), а також насадки у вигляді перфорованої сфери з однією (пат. № CN105107453A, CN204699716U, CN215611617U, UA134266U, UA158214U; рис. 22, б, в) або декількома (пат. № UA132063U; рис. 22, г) кульками або сферами в її порожнині.



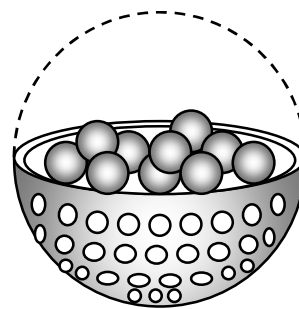
а



б



в



г

а – пат. № UA101453U; б – пат. № CN105107453A, CN204699716U;
в – пат. № UA158214U; г – пат. № UA132063U

Рис. 22 – Комбіновані насадки з декількома елементами з формою тіл обертання

Також розроблено іншу комбіновану насадку, яка містить зовнішню перфоровану сферичну оболонку з видаленим сегментом і розташованою в її порожнині підпружиненою кулькою з наскрізними каналами, яка може коливатися під дією потоків оброблюваних фаз, що інтенсифікує проходження тепломасообмінного процесу (пат. № CN212120019U; рис. 23).

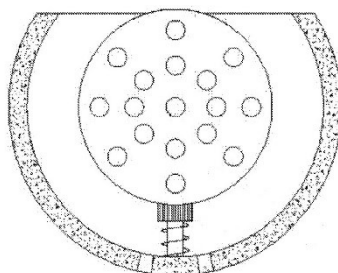


Рис. 23 – Комбінована насадка з двома сферичними елементами (пат. № CN212120019U)

Комбінована насадка типу «матрьошка», кожний з елементів якої складається з двох конусів кістякової структури зі спільною основою, але різної висоти (пат. № CN108435123A, CN208642682U; рис. 24).

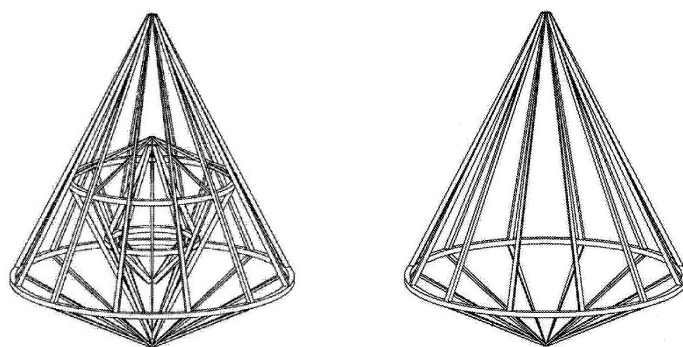


**Рис. 24 – Комбінована насадка типу «матрьошка» та її зовнішній елемент
(пат. № CN108435123A, CN208642682U)**

Незважаючи на велику різноманітність насадок з формою тіл обертання, їхні конструкції насамперед завдяки математичному моделюванню та прогресивним технологіям виготовлення, зокрема 3D-друку, постійно вдосконалюються. Зазначені насадки виготовляють насамперед з кераміки, металів та їхніх сплавів, а також полімерів і композиційних матеріалів з їх застосуванням. При цьому серед металевих насадок, використовуваних у хімічній і харчовій галузях промисловості, найбільш поширені насадки з корозійностійких сталей аустенітного класу, насамперед сталі 12X18H10T [47, 48].

Висновки

Аналіз конструктивно-технологічного оформлення насадок тепломасообмінного обладнання, які мають форму тіл обертання, дає змогу стверджувати, що зазначені насадки можуть успішно конкурувати з іншими типами контактних пристроїв для проведення процесів тепломасообміну.

Насадки з формою тіл обертання зокрема виготовляють у вигляді прямих кругових циліндра й конуса, кулі або сфери, тора, еліпсоїда обертання, параболоїда обертання однопорожнинного гіперболоїда, бочки, а також тіл оживальної форми та їхніх комбінацій. Завдяки симетричній та обтічній формі ці насадки використовуються не лише у складі фіксованого (нерухомого) шару контактних елементів, а й у складі рухомого шару, насамперед в апаратах псевдозрідженого шару. Новими тенденціями в конструктивному оформленні насадок з формою тіл обертання є все більше застосування замість суцільної насадки з гладкою поверхнею насадок у вигляді оболонок з елементами для збільшення питомої поверхні й турбулізації потоків оброблюваних фаз, зокрема у вигляді оболонок кістякової структури, які можна ефективно виготовляти за допомогою 3D-друку.

Перспективи подальших досліджень

Надалі передбачено проаналізувати стан питання й напрямки вдосконалення конструктивно-технологічного оформлення насадкових і тарілчастих контактних елементів тепломасообмінних колон.

Фінансування

Матеріали, що публікуються, підготовлені в рамках поточної наукової діяльності без залучення додаткового чи спеціального фінансування.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Доступність даних

Дані, що підтверджують результати цього дослідження, можуть бути надані автором для листування за обґрунтованим запитом.

Використання засобів генеративного штучного інтелекту

Засоби генеративного штучного інтелекту під час підготовки рукопису не використовувались.

Список використаної літератури

1. Kister HZ. Distillation Design. New York: McGraw-Hill, Inc., 1992.
<https://aussiedistiller.com.au/books2/Distillation%20Design.pdf>
2. Schultes M. Raschig Super-Ring: A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages. *Chemical*

- Engineering Research and Design*. 2003;81(A):48–57. DOI: <https://doi.org/10.1205/026387603321158186>
3. Vragov AP. Mass transfer processes and equipment of chemical and gas-oil processing industries [Masooobminni protsesy ta obladnannia khimichnykh i gazonaftopererobnykh vorobnystv]. Sumy: *Universytetska knyga*, 2007. (In Ukrainian)
 4. Schultes M. Dedicated to Dr. Ralf Goedecke on the occasion of his 70th birthday. *Chemie Ingenieur Technik*. 2014;86(5):1–9. <https://doi.org/10.1002/cite.201300166>
 5. Distillation: Equipment and Processes / A Görak, Ž Olujić (eds.). London: *Elsevier Inc.*, 2014. https://www.academia.edu/33304932/Distillation_Equipment_and_Processes
 6. Mikulionok IO. Mechanical, Hydromechanical, and Mass-Exchange Processes and Equipment in Chemical Engineering [Mekhanichni, hidromekhanichni i masooobminni protsesy ta obladnannia khimichnoi tekhnologii]. Kyiv: *NTUU "KPI"*, 2014. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169> (In Ukrainian)
 7. Perry's Chemical Engineers' Handbook / DW Green, MZ Southard (eds.). 9th ed. Columbus, Ohio: *McGraw-Hill Education*, 2019. https://www.academia.edu/117788051/Perrys_Chemical_Engineers_Handbook
 8. Malezhyk IF, Zavialov VL, Shevchenko OYu, Myronchuk VG, Pushanko MM, Zmievskiy YuG *et al.* Food production processes and equipment [Protsessy i aparaty kharchovykh vyrobnystv]. Kyiv: *NUKht*, 2021. (In Ukrainian)
 9. Schultes M, Summers DR. 100 Years of Distillation with Trays and Packings and Beyond // The 12th international conference Distillation & Absorption 2022. *Toulouse (France)*, 18–21 September 2022. <https://stofftrenntechnik.raschig.de/wp-content/uploads/sites/6/Schultes-M.-Summers-D.-100-Years-of-Distillation-with-Trays-and-Packings-and-Beyond-1.pdf>
 10. Mikulionok IO. Contact and auxiliary devices of heat and mass exchange columns [Kontaktni ta dopomizhni prystroi teplomasooobminnykh kolon]. Kyiv: *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*, 2022. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50142> (In Ukrainian)
 11. Tovazhnianskiy LL, Gotlinska AP, Leshchenko VO, Nechyporenko IO, Chernyshov IS. Chemical technology processes and apparatuses [Protsessy ta aparaty khimichnoi tekhnologii]. Kharkiv: *NTU "KhPI"*, 2024. <https://web.kpi.kharkov.ua/itpal/nmkd-obovyazkovi/> (In Ukrainian)
 12. Andreiev IA. Column apparatuses [Kolonnii aparaty]. Kyiv: *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*, 2025. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/72186> (In Ukrainian)
 13. Mikulionok IO. Mass transfer processes and equipment for the production of polymer and building materials and products [Masooobminni protsesy ta obladnannia vyrobnystva polimernykh i budivelnykh materialiv i vyrobiv]. Kyiv: *Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute*, 2025. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/77339> (In Ukrainian)
 14. Dr. F. Raschig; LUDWIGSHAFFEN a. Rh. *Zylindrische Füllkörper aus Metallblech für Absorptions- und Reaktionstürme*. DE Patent 286122C; 1914 Feb 06.
 15. Friedrich Raschig. *Improvement in or relating to Filling Materials for Reaction or Absorption-towers*. GB Patent 191406288A; 1914 Jul 30.
 16. Raschig ring. https://en.wikipedia.org/wiki/Raschig_ring (Accessed March 13, 2026)
 17. Mikulionok IO. Ring packing contact elements of mass transfer devices (review of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018;54(1–2):125–129. <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0450-y>
 18. Mikulionok IO, Lukiniuk MV. Location of oriented ring packing elements in column heat and mass exchange apparatus (Review) [Rozmishchennia oriietovanoi kiltsevoi nasadky v kolonnykh teplomasooobminnykh aparatakh (Ogliad)]. *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Series "Chemical engineering, ecology and resource saving"*. 2025;(1):26–36. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2025.325834> (In Ukrainian)
 19. Mikulionok IO. 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;57(11–12):976–981. <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01034-y>
 20. Mikulionok IO, Ivanenko OI. Spherical heat and mass exchange column packing (Classification and Design Survey) [Sferychni nasadky teplomasooobminnykh kolon (Klasyfikatsiia ta ogliad kondtriksii)]. *Visnyk Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*. 2025;(4):23–42. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2025.348810> (In Ukrainian)
 21. Mikulionok IO, Lukiniuk MV. Applications of the Möbius strip (Review) [Prykladne zastosuvannia strichky Mebiusa (Ogliad)]. *Visnyk Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*. 2025;(2):32–52. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2025.333973> (In Ukrainian)
 22. Mikulionok IO, Ivanenko OI. Prismatic heat and mass exchange column packing (Classification and Design

- Survey) [Pryzmatychni nasadky teplomasoobminnykh kolon (Klasyfikatsiia ta oghiad kondriktysii)]. *Visnyk Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*. 2025;(3):22–40. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2025.340372> (In Ukrainian)
23. Mikulionok IO. Heat and mass exchange columns fiber, wire and rod packing (Classification and review of structures) [Volochnysti, drotiani i stryzhnevi nasadky teplomasoobminnykh kolon (Klasyfikatsiia ta oghiad konstruktysii)]. *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universytetu. Serii: Mashinobuduvannia i mashynoznavstvo*. 2025;(1):82–96. <https://doi.org/10.31474/2308-51312-2025-1-17-82-96> (In Ukrainian)
24. von Seckendorff J, Hinrichsen O. Review on the Structure of Random Packed-Beds. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2021;99(S3);S703–S733. <https://doi.org/10.1002/cjce.23959>
25. Augier F., Idoux F, Delenne JY. Numerical simulations of transfer and transport properties inside packed beds of spherical particles. *Chemical Engineering Science*. 2010;65(3):1055–1064. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.059>
26. Acetis JD, Thodos G. Mass and Heat Transfer in Flow of Gases Through Spherical Packings. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1960;52(12):1003–1006. <https://doi.org/10.1021/ie50612a026>
27. 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;1370v;93–104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2014.10.032>
28. Jaffray C, Siddiqui K, Straatman AG. An efficient method for modelling thermal energy storage in packed beds of spherically encapsulated phase change material. *Journal of Energy Storage*. 2024 ;81:110462. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110462>
29. Nijemeisland M, Dixon AG. CFD Study of Fluid Flow and Wall Heat Transfer in a Fixed Bed of Spheres. *AIChE Journal*. 2004;50(5):906–921. <https://doi.org/10.1002/aic.10089>
30. 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;65(2);726–738. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.09.026>
31. Zeng G, Hou S, Guo Q, Cai Y, Xu M. Advances in Solid Particle Thermal Energy Storage: A Comprehensive Review. *Sustainability*. 2025;17(16):7244. <https://doi.org/10.3390/su17167244>
32. Guo X, Wang C, Li X, Liu G. A dynamic restitution coefficient model incorporating friction, impact velocity, and temperature effects: Validation in a bubbling fluidized bed. *Powder Technology*. 2026;469(1):121722. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2025.121722>
33. Chung DDL. Composite Materials: Science and Applications. London: Springer Verlag London Limited, 2010. https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications
34. Mikulionok IO. Polymer processing technology [Tekhnologiia pereroblennia polimeriv]. 5th ed. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/74268> (In Ukrainian)
35. Ramya A, Vanapalli SI. 3D Printing Technologies in Various Applications. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* 2016;7(3):396–409. https://iaeme.com/Home/article_id/IJMET_07_03_036
36. Shahrubudin N, Lee TC, Ramlan R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*. 2019;35:1286–1296. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>
37. Flagiello D, Tammaro D, Erto A, Maffettone PL, Lancia A, Di Natale F. Foamed structured packing for mass-transfer equipment produced by an innovative 3D printing technology. *Chemical Engineering Science*. 2022;260:117853. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.117853>
38. Ellebracht NC, Roy P, Moore T, Gongora AE, Oyarzun DI, Stolaroff JK *et al*. 3D printed triply periodic minimal surfaces as advanced structured packings for solvent-based CO₂ capture. *Energy & Environmental Science*. 2023;16:1752. <https://doi.org/10.1039/d2ee03658d>
39. Gao Y, Lalevée J, Simon-Masseron A. An Overview on 3D Printing of Structured Porous Materials and Their Applications. *Advanced Materials Technologies*. 2023 ;8:2300377. <https://doi.org/10.1002/admt.202300377>
40. Liu Q, Yan L, Bhatelia T, Pareek V, Sun B. Experimental investigation of mass transfer performance of a 3D printed novel structured packing – SpiroPak. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2025;208:110132. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.110132>
41. Baehr HD, Stephan K. Heat and Mass Transfer. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. <https://himatek.kim.ulm.ac.id/id/wp-content/uploads/2021/06/Baehr-H.D.-Stephan-K-Heat-and-Mass-Transfer-2nd-Edition.pdf>
42. Constales D, Yablonsky GS, D’hooge DR, Thybaut JW, Marin GB. Advanced Data Analysis & Modelling in

- Chemical Engineering. Amsterdam: Elsevier B.V., 2017. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-08276-5>
43. Dargham JA, Mounq EG, Chin RKY, Mamat M, Wong TH. Artificial Intelligence (AI) and the Future of Mankind. In: HT Yew, M Mamat, JA Dargham, C Seng Kheau, EG Mounq. (eds.) Internet of Things and Artificial Intelligence for Smart Environments. Singapore: Springer, 2024:67–82. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1432-2_5
44. Ertel W. Introduction to Artificial Intelligence. 3rd ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2024. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-43102-0>
45. Solid of revolution. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_of_revolution (Accessed March 13, 2026)
46. AS ENERGI. Ceramic Raschig Rings. URL: <https://asenergi.com/en/products/ceramic-raschig-rings.html> (Accessed March 13, 2026)
47. Andreiev IA, Zubrii OG, Mikulionok IO. Zastosuvannia materialiv u khimichnomu mashinobuduvanni. Stali i chavuny [Application of materials in chemical engineering. Steels and cast irons]. Kyiv: IZMN, 1999. (In Ukrainian)
48. Dobronogov VG, Mikulionok IO. Application of corrosion-resistant and heat-resistant steels and alloys in chemical engineering [Zastusuvannia koroziiostiikykh, zharostiikykh, zharomirznykh stalei i splaviv u khimichnomu mashino- ta aparatobuduvanni]. Kyiv: NTUU "KPI"; 2011. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37716> (In Ukrainian).
-

Ihor Mikulionok, Denys Shvachko

HEAT AND MASS EXCHANGE PACKING WITH THE FORM OF SOLID OF REVOLUTION (Classification and Design Survey)

The subject of the study is the design of packing with the form of solid of revolution for heat and mass exchange columns.

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

One of the simplest and most effective contact elements of heat and mass exchange columns, which are used primarily in the chemical, petrochemical, oil refining, food, microbiological and thermal power industries, are packing with the shape of bodies of revolution, one of the main advantages of which is the low hydraulic resistance due to their streamlined shape, as well as the absence of stagnant zones in the packing layer. These packing primarily include contact elements in the form of straight circular cylinders and cones, balls (spheres), toruses, ellipsoids of revolution, single-cavity hyperboloids, barrels, bodies of ogival shape (ogive), as well as bodies of other streamlined shapes. Due to their symmetrical and streamlined shape, packing with the shape of bodies of revolution, primarily in the form of balls (spheres), are widely used as a moving packing in fluidized bed devices. Recently, instead of a simpler in design, but at the same time more material-intensive solid packing with a large mass and low specific surface area, lighter packing in the form of shells with elements to increase the specific surface area and turbulize the flows of the processed phases, in particular in the form of shells with a skeletal structure, which can be manufactured by 3D printing from various structural materials, are increasingly being used.

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, rotating body, classification, design, patent, patent application