

УДК 66.021.3:66.069.833-023.818(048.83)

МІКУЛЬОНОК 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

ПРИЗМАТИЧНІ НАСАДКИ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ КОЛОН (Класифікація та огляд конструкцій)

Разом з таким конструктивно простим та універсальним контактним елементом колонних тепломасобмінних апаратів як кільцева насадка у вигляді прямого кругового кільцевого циліндра широкого поширення набули насадки у формі призм – правильних і неправильних, напівправильних і зрізаних, прямих і похилих, зірчастих і тороїдальних, скручених, а також антипризм. На відміну від більш універсальної кільцевої циліндричної насадки призматична насадка переважно застосовується лише як регулярна насадка. При цьому основною перевагою призматичних насадок є висока технологічність, а недоліком – відносно низька питома поверхня в разі щільного прилягання плоских бічних граней сусідніх елементів насадки. Саме тому пропонуються різноманітні технічні рішення для їх дистанційного розташування – як завдяки різноманітним виступам на бічних гранях насадки, так і використанню спеціальних дистанційних пристроїв для відокремлення сусідніх елементів насадки. У разі завантаження призматичної насадки орієнтовано, а саме у вертикальному положенні з певним проміжком між сусідніми елементами не лише збільшується питома поверхня шару насадки, а й забезпечуються подібні гідродинамічні умови оброблюваних фаз усередині та ззовні елементів насадки. При цьому орієнтована (регулярна, структурована) насадка має менший гідравлічний опір і забезпечує більшу допустиму швидкість легкої фази. Незважаючи на значну кількість розроблених типорозмірів призматичних насадок удосконалення їхніх конструкцій та способів розміщення в тепломасобмінних апаратах тривають.

Ключові слова: тепломасобмінна колона, орієнтована насадка, елемент насадки, призма, класифікація, конструкція, патент, заявка на патент

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2025.340372

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 03 August 2025; Accepted 04 September 2025

Постановка проблеми

Одними з найбільш поширених контактних елементів колонних тепломасобмінних апаратів [1–6], які використовуються в хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій, мікробіологічній, теплоенергетичній, системах очищення текучих промислових потоків та інших галузях промисловості [7], є кільцеві (циліндричні) насадки, виконані у вигляді прямого кругового порожнистого циліндра (циліндричної оболонки) і насамперед такі кільцеві насадки як кільця Рашига [8–12].

Перевагами більшості кільцевих насадок є висока технологічність та універсальність, а недоліками – відносно низька питома поверхня та різні гідродинамічні умови оброблюваних фаз усередині окремої насадки та в просторі між насадками, що особливо стає помітним у разі розміщення кільцевих насадок у масообмінному апараті орієнтовано – у вертикальному положенні [13].

Окремим випадком циліндричних насадок є призматичні насадки, тобто насадки у формі призми (n -кутної) – багатогранника, дві розташовані в паралельних площинах грані якого (основи) є конгруентними багатокутниками (n -кутниками), а інші грані (бічні) – паралелограмами, які мають спільні сторони із зазначеними багатокутниками. При цьому багатокутник, що лежить в основі призми, визначає її назву: трикутник – трикутна призма, чотирикутник – чотирикутна, п'ятикутник – п'ятикутна й т.д. [14].

На відміну від насадки, виконаної у вигляді кругового порожнистого циліндра з відкритими основами, насадка у вигляді порожнистої призми з відкритими основами, більш технологічна та універсальна, адже дає змогу комбінувати розміщення сусідніх елементів насадки в контактній частині масообмінного апарата, активно впливаючи на гідродинаміку фаз насамперед у просторі між сусідніми елементами насадки. Проте

елементи призматичної насадки мають меншу міцність і жорсткість, але це здебільшого не має суттєвого значення, оскільки висота окремого ярусу (секції) контактної частини масообмінного апарата зазвичай обмежується чотирма-п'ятьма її діаметрами (але не більше 3–4 м) [3, 4].

Аналіз попередніх досліджень. Натеper достатньо ґрунтовно досліджено конструктивно-технологічне оформлення такої насадки як насадка у вигляді прямого кругового порожнистого циліндра (кільцева насадка) [9], насадка з формою поверхні другого порядку [15], а також штампована насадка різноманітної форми [16].

Питанню ж аналізу конструктивно-технологічного оформлення призматичних елементів насадки (крім окремих моментів у деяких публікаціях [2, 4]) уваги приділено майже не було, хоча така перевага призматичних елементів як їхня висока технологічність є очевидною й беззаперечною, адже їх може бути легко отримано з довгомірної трубчастої заготовки з наступним її розрізанням на мірні відрізки, у тому числі з їх подальшим обробленням. При цьому зазначену призматичну трубчасту заготовку можна одержувати з вихідної круглої трубчастої заготовки таким високоефективним методом як штампування [17, 18] або одержувати безпосередньо (у тому числі з інноваційних композиційних конструкційних матеріалів [19–23]) універсальним і високопродуктивним методом шнекового пресування (екструзії) [24–29].

Останнім часом, насамперед у патентних документах, розробниками інноваційних техніки й технології все частіше пропонуються різноманітні високотехнологічні призматичні елементи насадки, тому розроблення їхніх ефективних конструкцій стає актуальним завданням науковців, конструкторів і винахідників.

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

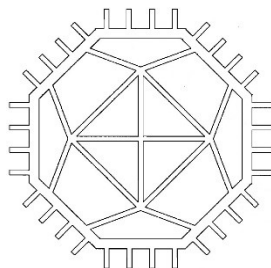
Виклад основного матеріалу. Аналіз конструктивно-технологічного оформлення призматичних насадок масообмінних колон дає змогу запропонувати їхню класифікацію, наведену на рис. 1.



Рис. 1 – Класифікація призматичних насадок масообмінних колон

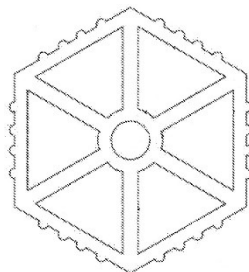
Як призматична насадка найбільшого поширення набули металеві й неметалеві елементи у вигляді деталей, що мають форму правильних прямих призм, зазвичай шестикутних.

Насадку у вигляді прямої правильної призми оснащено внутрішніми поздовжніми перегородками й зовнішніми ребрами (пат. RO132547A0; рис. 2).



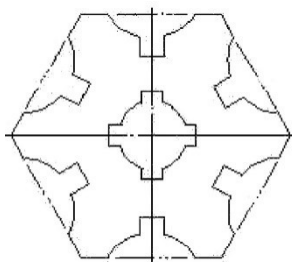
**Рис. 2 – Насадка у вигляді прямої правильної восьмикутної призми
(вигляд з боку однієї з основ; пат. № RO132547A0)**

Насадку у вигляді прямої правильної шестикутної призми зі співвісно розміщеною в ній циліндричною оболонкою, з'єднаною з бічними ребрами призми поздовжніми діагональними перегородками (пат. CN210675222U; рис. 3).



**Рис. 3 – Насадка у вигляді прямої правильної шестикутної призми
(вигляд з боку однієї з основ; пат. № CN210675222U)**

Насадка у вигляді прямої правильної шестикутної призми з поздовжніми фігурними пазами на гранях та осьовим фігурним отвором (пат. CN220405655U; рис. 4).



**Рис. 4 – Насадка у вигляді прямої правильної шестикутної призми з поздовжніми фігурними
пазами на гранях та осьовим фігурним отвором (вигляд з боку однієї з основ; пат. № CN220405655U)**

Розроблено рухому насадку у вигляді прямих правильних шести- й восьмикутних призм із зовнішніми ребрами різної форми (пат. PT3294432T; рис. 5).



**Рис. 5 – Насадка у вигляді правильних прямих призм із зовнішніми поздовжніми ребрами
(вигляд з боку однієї з основ; пат. № PT3294432T)**

Запропоновано насадку у вигляді правильної прямої шестикутної призми з поздовжніми перегородками, при цьому бічні грані призми й перегородки мають численні отвори для проходу оброблюваних фаз (пат. № CN112316884A, CN213943154U; рис. 6).

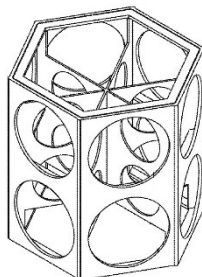


Рис. 6 – Насадка у вигляді правильної прямої шестикутної призми з поздовжніми перегородками (пат. № CN112316884A, CN213943154U)

Розроблено керамічну насадку у вигляді низької (відношення висоти до ширини менше одиниці) правильної прямої шестикутної призми з поздовжніми комірками у вигляді правильних трикутних призм або сукупності ромбічних і правильних трикутних призм (пат. № RU2288778C2, заявка № WO03/074168A1, WO2005/021152A1; рис. 7).

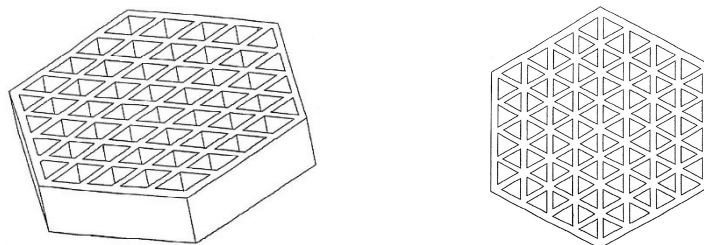


Рис. 7 – Керамічна насадка у вигляді низької правильної прямої шестикутної призми з поздовжніми призматичними комірками (загальний вигляд і вид з боку однієї з основ; пат. № RU2288778C2, заявки № WO03/074168A1, WO2005/021152A1)

Елементи регулярної насадки у вигляді прямої правильної трикутної піраміди фіксуються в дистанційних решітках з утворенням наскрізних каналів трикутного поперечного перерізу. А також вільного простору ззовні утворених каналів для проходу легкої фази (пат. UA60000C2). Недолік контактної частини такого масо обмінного апарата – можливість проскакування фаз без їхньої взаємодії між собою.

Запропоновано насадку у вигляді прямої правильної шестикутної призми з фігурним поздовжнім каналом різної форми, зокрема шестипроменевої зірчастої призми (пат. FR3021555A1).

Насадку виконано у вигляді обичайки – постійного магніту, що має форму прямої правильної шестикутної призми, з порожниною, заповненою скрученою сітковою стрічкою з немагнітного матеріалу (пат. RU8284U1). Зазначену насадку запропоновано використовувати для ректифікації систем з відносною леткістю компонентів більше одиниці, наприклад, систем «кисень-азот» або «кисень-аргон».

Для фіксації взаємного положення елементів у сусідніх шарах насадки на основах кожного елемента виконано по три виступи й западини (пат. UA101282C2; рис. 8).

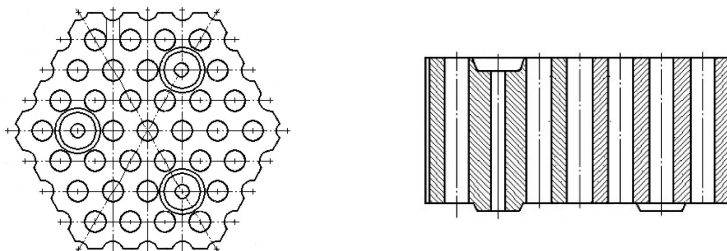
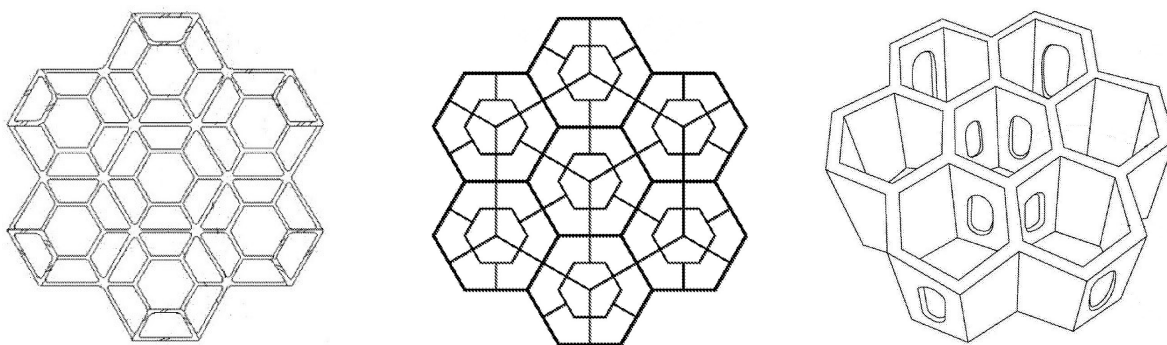


Рис. 8 – Насадка з виступами й западинами на її основах для запобігання взаємного зсуву сусідніх елементів (пат. № UA101282C2)

Засіб для фіксації сусідніх елементів насадки у вигляді прямої правильної шестикутної призматичної оболонки виконано у вигляді штирів, які фіксуються в поздовжніх каналах стінки кожного елемента (пат. CN216499397U). Зазначені штирі запобігають зміщенню елементів сусідніх шарів насадки, проте щільний контакт сусідніх елементів насадки в межах окремого шару істотно знижує питому поверхню контактної частини масообмінного апарата.

Технологічний у виготовленні елемент регулярної насадки у вигляді сімох правильних прямих шестикутних призм зі спільними бічними гранями та внутрішніми подовжніми перегородками, які утворюють поздовжні призматичні канали у вигляді центральної шестикутної призми та розташованих навколо неї шести правильних чотирикутних призм з рівнобічними трапецієподібними основами (пат. № CN210646430U; рис. 9,а). Аналогічні технічне рішення також запропоновано в пат. CN215028955U (рис. 9,б), а також CN108527614A, CN108527615A, CN108543513A, CN108582421A та CN108607497A (рис. 9,в).



а – пат. № CN210646430U; б – пат. № CN215028955U;
в – пат. № CN108527614A, CN108527615A, CN108543513A, CN108582421A, CN108607497A

Рис. 9 – Елементи регулярної насадки у вигляді сімох правильних прямих шестикутних призм зі спільними бічними гранями

Елемент регулярної насадки у вигляді шістьох неправильних прямих п'ятикутних призм в оточенні дванадцяти правильних прямих шестикутних призм меншої висоти характеризується високою технологічністю, адже може бути одержаний шнековим пресуванням (екструзією) як з металевих, так і неметалевих матеріалів (пат. CN209222144U; рис. 10).

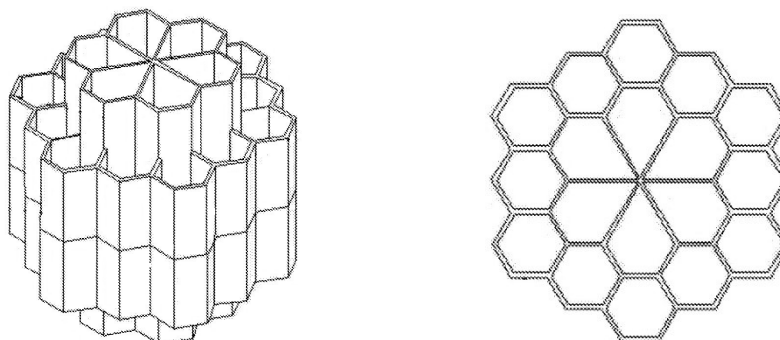


Рис. 10 – Елемент регулярної насадки у вигляді шістьох неправильних прямих п'ятикутних призм в оточенні дванадцяти правильних прямих шестикутних призм меншої висоти (пат. CN209222144U)

Елемент регулярної насадки у вигляді складальної одиниці містить каркас і знімні насадкові блоки у вигляді прямих правильних трикутних призм з поздовжніми циліндричними каналами (пат. CN217042615U; рис. 11). У складеному вигляді насадка має форму правильної прямої шестикутної призми з пластинчастими фіксаторами на гранях, які унеможливають зсув елементів насадки сусідніх шарів.

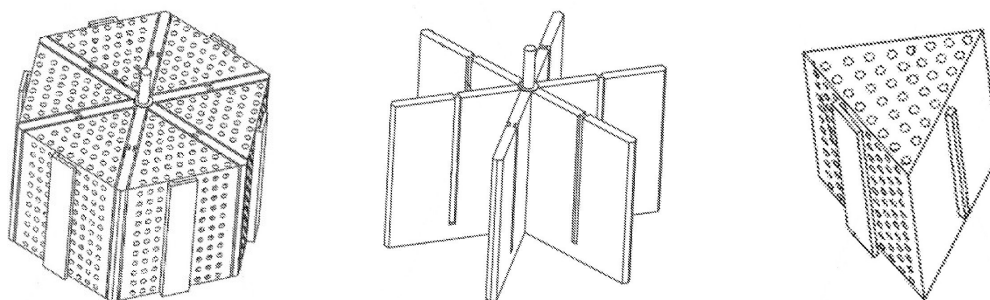


Рис. 11 – Елемент регулярної насадки у вигляді правильної прямої шестикутної призми та його складові елементи: каркас та один з шістьох насадкових блоків (пат. CN217042615U)

Сітчастий елемент насадки, що складається з порожнистої прямої трикутної призми та двох сітчастих торцевих кришок, при цьому порожнину елемента заповнено сітчастим наповнювачем (пат. CN222518614U). Декілька елементів насадки залежно від вимог проходження масо обмінного процесу можуть бути складені у вигляді інших об'єктів, зокрема чотирикутної або шестикутної призми (рис. 12).

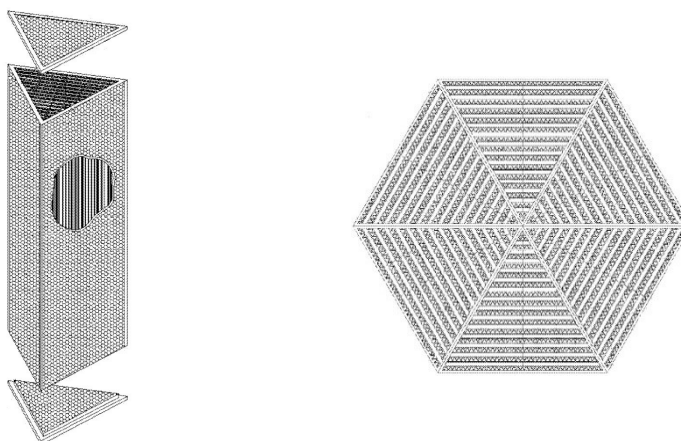


Рис. 12 – Елемент регулярної насадки у вигляді правильної прямої трикутної сітчастої призми зі знімними основами та складений з таких елементів блок насадки у вигляді правильної прямої шестикутної сітчастої призми (пат. CN222518614U)

Інший елемент регулярної насадки у вигляді складальної одиниці містить центральний стрижень і пакет зафіксованих на ньому знімних насадкових пластин у вигляді прямих правильних шестикутних призми з поздовжніми циліндричними каналами (пат. CN218131927U). У складеному вигляді насадка має форму правильної прямої шестикутної призми з наскрізними циліндричними каналами, що проходять крізь усі насадкові пластини складеного пакету.

Елемент, виготовлений з листового матеріалу у вигляді шестигранної правильної прямої призматичної оболонки з відкритими основами на бічних гранях, містить надрізані та відігнуті всередину трикутні пелюстки (пат. № UA1321U). При цьому на сусідніх гранях пелюстки рознесено по висоті оболонки, що виключає проскакування оброблюваних фаз (проходження фаз без їх взаємодії одна з одною) за умови незначного збільшення гідравлічного опору.

У пат. № UA12700U запропоновано удосконалений елемент: пелюстки, виконані у вигляді рівнобедрених трикутників, довжина бічних сторін яких більша за довжину основи, забезпечують похиле відносно поздовжньої осі елемента положення пелюсток, що знижує гідравлічний опір насадки.

Елемент аналогічної форми, але із закріпленою по висоті оболонки похилою перегородкою у вигляді прямокутника або рівнобедреного трикутника, вершини яких збігаються з вершинами оболонки (пат. № UA1675U). Конструкція елемента також виключає проскакування фаз та утворення застійних зон оброблюваних фаз. При цьому в пат. № UA1724U на бічних гранях оболонки надрізано й відігнуто назовні пелюстки, що забезпечує гарантований проміжок між сусідніми елементами насадки, а отже й збільшення поверхні контакту фаз порівняно з щільно прилеглими один до одного елементами без зазначених пелюсток.

Елемент аналогічної форми із закріпленими по висоті оболонки двома протилежно спрямованими похилими перегородками у вигляді зігнутих по довжині загострених кутиків, які в плані мають форму рівнобедрених трикутників (пат. № UA3069U).

Елемент у вигляді куба з відкритими основами та трикутними поперечними пелюстками, основи яких збігаються з ребрами основ куба (пат. № UA2229U). На кожній основі пелюстки виконано парними та розташованими на протилежних ребрах основи, а пари пелюсток на різних основах розташовано під прямим кутом один відносно одного, що виключає проскакування оброблюваних фаз крізь елемент. Елемент виготовляється з однієї листової заготовки, що є розгорткою оболонки з пелюстками, та представляє собою квадратну тороїдальну призму [14] з попарно видаленими та подовженими пелюстками основ.

Елемент насадки тепломасообмінного апарата, що має форму прямої правильної шестикутної порожнистої призми з відкритими основами, при цьому він має три відокремлені між собою бічні грані, з'єднані між собою подовжніми ребрами, розташованими всередині зазначеної порожнистої призми (пат. № UA124348C2, UA140362U; рис. 13). Також бічні грані елемента можуть бути з'єднані між собою подовжніми ребрами через оболонку у формі прямої правильної багатокутної, наприклад, трикутної або шестикутної, порожнистої призми з відкритими основами. На відміну від класичної призматичної насадки у формі прямої правильної шестикутної порожнистої призми з відкритими основами, яка за умови щільного впорядкованого укладання елементів насадки в контактній частині масообмінного апарата виключає участь зовнішніх поверхонь бічних граней призм у масообмінному процесі, пропонується конструкція забезпечує участь у цьому процесі зовнішніх поверхонь елементів насадки, що істотно знижує матеріалоємність насадки, збільшує поверхню контакту фаз і підвищує ефективність процесу масообміну.

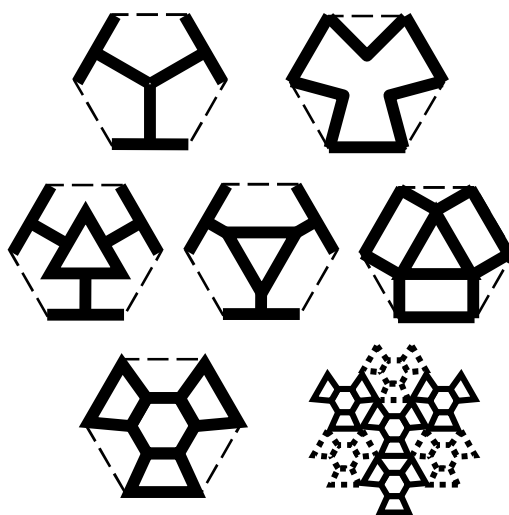


Рис. 13 – Вигляд з торця регулярної насадки згідно з пат. № UA124348C2 та UA140362U

В удосконаленому елементі сусідні бічні грані з'єднані між собою рознесеними по висоті призми щонайменше двома поперечними перемичками (пат. № UA150776U). При цьому бічні грані можуть бути з'єднані між собою подовжніми перегородками зі спільним бічним ребром (рис. 14).

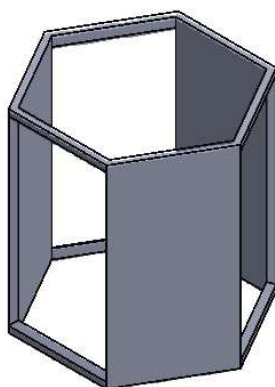


Рис. 14 – Загальний вигляд елемента насадки згідно з пат. № UA150776U

Для забезпечення можливості контакту зовнішньої поверхні бічних сторін елементів регулярної насадки у вигляді прямої шестикутної призми за аналогією з кільцевою круговою насадкою [13] застосовують m-подібну скобу, ширина внутрішньої ніжки якої визначає величину проміжку між сусідніми елементами насадки, а зовнішні ніжки призначені для фіксації зазначених елементів між собою (пат. UA75745U; рис. 15).

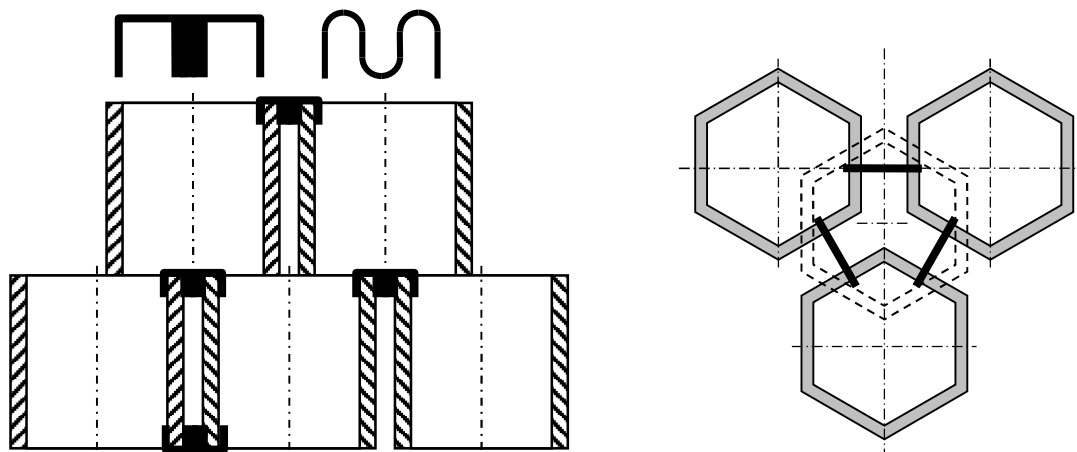


Рис. 15 – Пристрій для дистанційного розташування елементів призматичної насадки (пат. № UA75745U)

Також запропоновано елемент насадки, що має форму правильної шестикутної призми з подовжніми циліндричними каналами та подовжніми циліндричними пазами на її бічних гранях, радіус яких дорівнює радіусу каналів, при цьому центри каналів і пазів розташовано по вершинах правильних трикутників, а центри каналів і пазів розташовано з кроком 1,2–1,8 діаметра каналів (пат. № UA150573U; рис. 16). У найприйнятніших прикладах виконання елемента він має сім каналів, а також форму похилої правильної шестикутної призми. Технічне рішення забезпечує розвинену гідродинаміку оброблюваних фаз як всередині елементів насадки, так і в проміжках між ними.

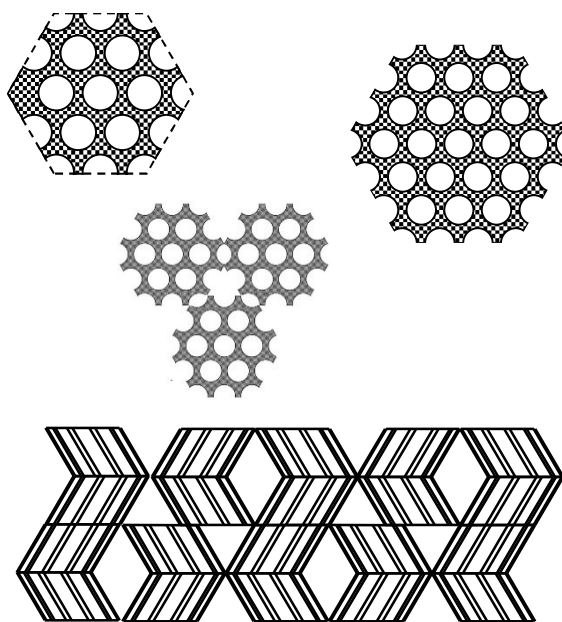


Рис. 16 – Елемент насадки у вигляді правильної похилої шестикутної призми (пат. № UA150573U)

При цьому в пат. № UA150574U запропоновано спосіб укладання регулярної насадки із зазначених елементів у вигляді правильної шестикутної призми, за якого після укладання щонайменше одного горизонтального шару елементів насадки між ними розміщують подовжні вставки, кожна з яких у поперечному перерізі має форму правильної трипроменевої зірки. При цьому між елементами насадки розміщують подовжні вставки, кінці променів яких взаємодіють зі стінками пазів сусідніх елементів насадки, або подовжні вставки, кінці променів яких взаємодіють з бічними гранями сусідніх елементів насадки (рис. 17).

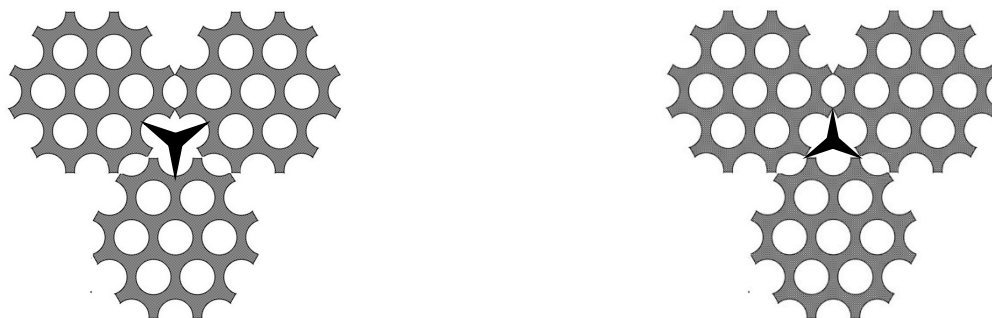


Рис. 17 – Спосіб укладання регулярної насадки з елементів у вигляді правильної шестикутної призми (пат. № UA150574U)

Розроблено призматично-спіральну насадку-«матрьошку», що скошляється з декількох оснащених пелюстками та з'єднаних між собою поздовжніми спіральними перегородками співвісних призматичних оболонок з відкритим основами (пат. № CN203842590U; рис. 18). Відігнуті назовні пелюстки унеможливають щільний контакт бічних поверхонь сусідніх елементів насадки між собою, що збільшує питому поверхню шару насадки. Аналогічне технічне рішення, але за допомогою зовнішніх поздовжніх ребер насадки у вигляді прямої правильної чотирикутної призми наведено в пат. JPS5245744U (рис. 19).

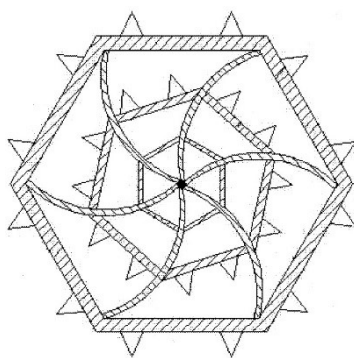


Рис. 18 – Призматично-спіральна насадка-«матрьошка» (пат. № CN203842590U)

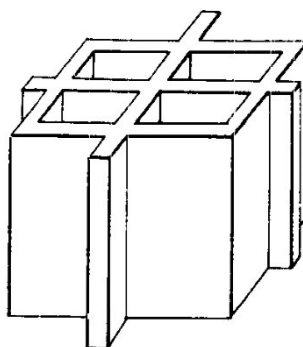


Рис. 19 – Насадка у вигляді прямої правильної чотирикутної призми з поздовжніми внутрішніми перегородками та зовнішніми ребрами (пат. JPS5245744U)

Пакет регулярної насадки масообмінного апарата містить сукупність розташованих один на одному шарів елементів, кожний з яких виконано у вигляді перфорованої оболонки з днищем, при цьому відповідні по висоті насадкові тіла сусідніх шарів перевернуті одне відносно одного (пат. UA36110U; рис. 20). Завдяки наявності днищ у насадок під час руху фаз крізь контактну частину апарата вони рухаються за складними траєкторіями, повністю унеможливаючи проскакування фаз контактної частини апарата без їх взаємодії одна з одною.

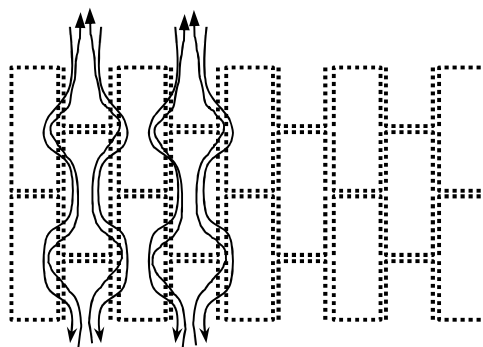


Рис. 20 – Пакет регулярної призматичної насадки (пат. № UA36110U)

Насадка містить оболонку у вигляді прямої правильної шестигранної призми з відкритими основами, а також надрізнаними на гранях оболонки й відігнутими всередину неї пелюстками, основа кожної з яких розташована паралельно основам оболонки, при цьому пелюстки виконані з наскрізними отворами й розташовані в одній площині поперек поздовжньої осі оболонки, при цьому оболонку виконано з сітки (пат. UA105258U; рис. 21). Застосування цієї насадки забезпечує як плівковий режим течії важкої фази по поверхні оболонки, так і режим емульгування над поперечними пелюстками, що істотно інтенсифікує масообмінний процес.

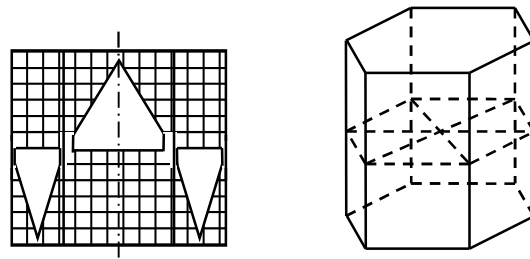


Рис. 21 – Призматична насадка з реалізацією плівкового режиму вадкої фази та режиму емульгування (пат. № UA105258U)

Насадка містить дві зігнуті перфоровані стрічки з поперечними надрізами для взаємного зачеплення стрічок між собою (пат. UA71358U; рис. 22).

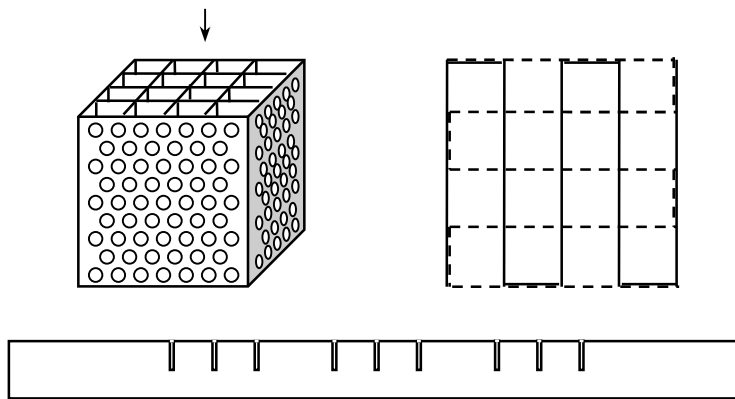


Рис. 22 – Насадка у вигляді зчеплених між собою двох стрічок (пат. № UA71358U)

Насадку у формі куба сформовано поздовжніми пластинами, що утворюють фрактальну структуру, тобто структуру, що складається з частин, які в певному сенсі подібні до цілого (пат. EP3851416A2; рис. 23).

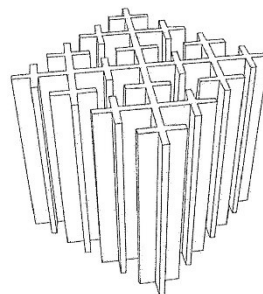


Рис. 23 – Кубічна насадка з фрактальною структурою (пат. № EP3851416A2)

Насадку у формі прямої правильної шестигранної призми також сформовано поздовжніми пластинами, що утворюють фрактальну структуру (пат. IL245928A; рис. 24).

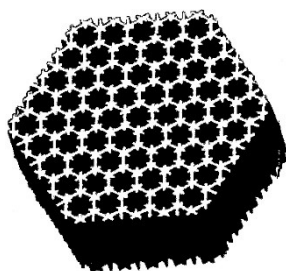


Рис. 24 – Насадка у вигляді правильної прямої шестикутної призми з фрактальною структурою (пат. № IL245928A)

Насадка у формі прямої трипроменевої зірчастої призми має три промені з поздовжніми каналами у вигляді шестикутних призми (пат. GB2121702A; рис. 25).

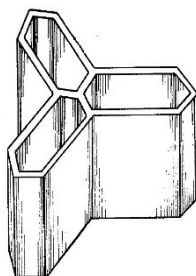


Рис. 25 – Насадка у формі прямої трипроменевої зірчастої призми з порожнистими променями (пат. № GB2121702A)

Також насадку у вигляді прямих п'яти- та шестипроменевих зірчастих призми з поздовжнім центральним циліндричним каналом запропоновано в пат. KR20170021870A (рис. 26). У цьому патенті описано й насадку у вигляді прямої правильної п'ятикутної скрученої призми.

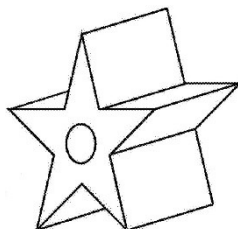


Рис. 26 – Насадка у формі прямої п'ятипроменевої зірчастої призми (пат. № KR20170021870A)

Насадка з формою прямої шестипроменевої зірчастої призми з двома внутрішніми співвісними циліндричними оболонками, з'єднаними між собою радіальними перегородками описано в пат. CN210700139U (рис. 27).

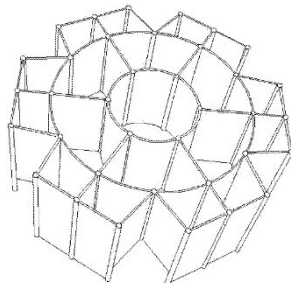


Рис. 27 – Насадка у вигляді шестипроменевої зірчастої призми з двома внутрішніми співвісними циліндричними оболонками (пат. № CN210700139U)

Насадка у формі прямої правильної порожнистої призми (три-, чотири або шестикутної) з насипним заповнювачем дає змогу регулювати масу насадки, а також її вільний об'єм і питому поверхню (пат. № EP1068007A1, заявка WO99/48604A1; рис. 28). Комбінуючи вид і кількість елементів пропонуваної насадки, можна заповнювати контактну частину масообмінного апарата різного діаметра.

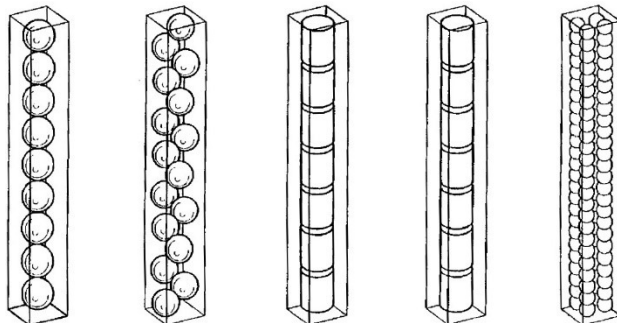


Рис. 28 – Насадка у формі прямої правильної порожнистої призми з насипним заповнювачем (пат. № EP1068007A1, заявка WO99/48604A1)

Запропоновано умовно призматичну насадку у вигляді оболонки з двома паралельно розташованими відкритими основами та плоскими ділянками на її зовнішній поверхні, при цьому основи оболонки виконано у вигляді правильних шестикутників, плоскі ділянки – у вигляді рівносторонніх або рівнобедрених трикутників, основа кожного з трикутників з боку основ оболонки збігається зі стороною ребра відповідної основи, а всі трикутники утворюють поверхню, близьку до бічної поверхні правильної прямої шестикутної призми (пат. № UA132065U; рис. 29). При цьому між основами оболонка може мати непарну кількість шарів плоских ділянок, у цьому разі основи повернуто одна відносно одної на 30° .

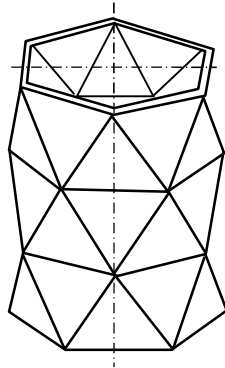


Рис. 29 – Умовно призматична насадка (пат. № UA132065U)

Також до умовно призматичних насадок можна віднести насадку у формі трикутної призми із заокругленими ребрами та трьома поздовжніми циліндричними каналами (пат. № RU2086299C1; рис. 30).

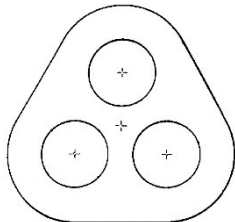


Рис. 30 – Умовно призматична насадка (пат. № RU2086299C1)

До умовно призматичних насадок можна віднести і прямі насадки з поперечним перерізом постійної ширини у формі правильних багатокутників з опуклими сторонами.

Запропоновано умовно призматичну насадку у вигляді прямої циліндричної оболонки з двома відкритими основами, при цьому оболонка в поперечному перерізі має форму правильного трикутника з опуклими сторонами, зокрема трикутника Рьоло (пат. UA83712U; рис. 31). При цьому всередині оболонки може бути розташовано повернуту відносно неї на 60° додаткову оболонку аналогічної форми (за принципом «матрьошки»). Особливість трикутника Рьоло як плоскої опуклої геометричної фігури є сталість її ширини (як і кола).

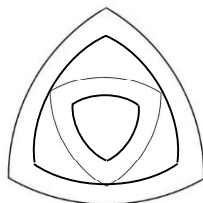


Рис. 31 – Умовно призматична насадка з трикутниками Рьоло в її основах (пат. № UA132065U)

Насадки з поперечним перерізом у вигляді трикутника Рьоло і порожниною у формі прямої правильної трикутної призми, а також у вигляді оболонки з поперечним перерізом у вигляді опуклого п'ятикутника постійної ширини та внутрішньою порожниною у формі прямої правильної п'ятикутної призми мають підвищену міцність (пат. RU210652U1, RU211779U1; рис. 32). Проте істотно зростає маса насадки, а також зменшується її питома поверхня, а також збільшується схильність потрапляння бруду в загострених западинах її порожнини. Також у пат. RU219346U1 описано насадку з поперечним перерізом у вигляді трикутника Рьоло й порожниною у формі прямої правильної трикутної призми, а також поздовжньою трипроменевою перегородкою.



Рис. 32 – Умовно призматична насадка постійної ширини з порожнинами у формі прямих правильних призм (пат. № RU210652U1, RU211779U1)

Удосконалені насадки аналогічної форми з щонайменше однією поздовжньою перегородкою та надрізними й відігнутими всередину поздовжніми пелюстками описано в пат. UA152167U та CN654216A5, відповідно. Елемент блоку зрошувача градинні виконано у вигляді сукупності паралельних подовжених оболонок з полімерного термопластичного матеріалу, кожна з яких по довжині складається з трьох ділянок: двох коротких кінцевих у формі правильних призм, а також центральної подовженої у формі правильної або зірчастої призми (пат. RU2318171C1).

Також розроблено умовно призматичну з поперечним перерізом у вигляді опуклого п'ятикутника постійної ширини та внутрішньою поздовжньою п'ятипроменевою перегородкою (пат. RU211778U1; рис. 33). Аналогічну насадку, але із зігнутими променями перегородки описано в пат. RU218978U1, а насадку з поперечним перерізом у вигляді трикутника Рьоло та внутрішньою поздовжньою трипроменевою перегородкою із зігнутими променями – в пат. RU218794U1.

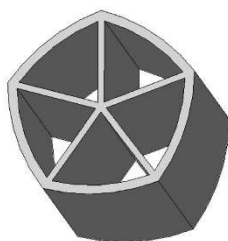


Рис. 33 – Умовно призматична насадка з поперечним перерізом у вигляді опуклого п'ятикутника постійної ширини (пат. № RU211778U1)

Насадки у вигляді різноманітних умовно призматичних форм розглянуто в пат. EP3431178A1 і EP3659703A1, а також заявці WO2020/108872A1 (рис. 34).



Рис. 34 – Умовно призматичні насадки з поперечним перерізом у вигляді порожнистих правильних опукло-увігнутих трикутників (пат. № EP3431178A1, EP3659703A1, заявка WO2020/108872A1)

У заявці № DE102010052126A1 описано умовно призматичну насадку з поперечним перерізом у вигляді правильного опукло-увігнутого чотирикутника з осьовим циліндричним каналом (рис. 35), а в пат. CN209076692U – умовно призматичну насадку каркасної структури з поперечним перерізом у вигляді правильного восьмикутника з увігнутими гранями (рис. 36).

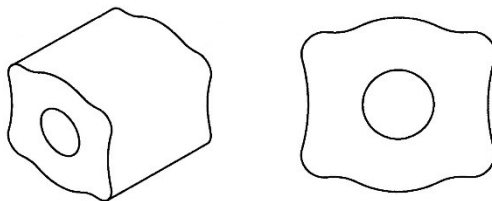


Рис. 35 – Умовно призматична насадка з поперечним перерізом у вигляді порожнистого правильного опукло-увігнутого чотирикутника (заявка № DE102010052126A1)

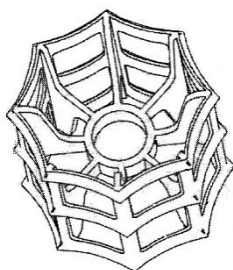


Рис. 36 – Умовно призматична насадка каркасної структури з поперечним перерізом у вигляді правильного восьмикутника з увігнутими гранями (пат. № CN209076692U)

Незважаючи на велику різноманітність призматичних насадок масообмінних апаратів, їх конструкції завдяки високій технологічності й відносно низькій вартості неперервно вдосконалюються.

Висновки. Незважаючи на більш ніж сторічний термін використання насадок як контактних елементів масообмінних колон, науковці, інженери та винахідники продовжують удосконалювати їхні конструкції, а також способи і пристрої для їх упорядкованого розміщення в контактній частині зазначених апаратів. Це насамперед стосується циліндричних насадок, різновидом яких є насадки у формі призми. При цьому увага приділяється не лише насадкам безпосередньо, а й засобам для їх дистанційного укладання у межах окремого шару контактної частини апарата для забезпечення аналогічних гідродинамічних умов усередині кожного з елементів насадки та в просторі між ними, що підвищує інтенсивність та ефективність масообмінного процесу. Істотно пришвидшити процес розроблення інноваційних призматичних насадок можуть сучасні досягнення матеріалознавства й технології, комп'ютерне моделювання [30], а також штучний інтелект [31]. Зокрема розроблені композиційні матеріали з наперед заданими властивостями для ефективного розділення певних рідких або газових сумішей можуть успішно конкурувати з такими поширеними в хімічній і харчовій промисловості, але достатньо дефіцитними й важко оброблюваними корозійностійкими сталями аустенітного класу як 08X18H10, 12X18H10T та ін. [32].

З огляду на зазначене, можна з упевненістю стверджувати, що призматичні насадки зможуть успішно конкурувати з іншими типами контактних пристроїв масообмінних колон ще тривалий час.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати стан питання й напрямки вдосконалення інших контактних елементів масообмінних колон – насадок і тарілок – з урахуванням надзвичайної активності винахідників (насамперед представників України та Китайської Народної Республіки) у цьому питанні.

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. Мікульонок 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. Мікульонок 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-obovyzkovi/>
6. Андреев І. А. Колонні апарати. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 74 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/72186>
7. Іваненко О. І., Носачова Ю. В. Техноекологія. Київ : Видавничий дім «Кондор», 2017. 294 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Ivanenko_2017_294.pdf
8. Raschig ring. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Raschig_ring (дата звернення: 28.07.2025).
9. 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>
10. Schultes M., Summers D. R. 100 Years of Distillation with Trays and Packings and Beyond // The 12th international conference Distillation & Absorption 2022. Toulouse (France), 18–21 September 2022. 12 p. URL: <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>
11. Kister H. Z. Distillation Design. New York : McGraw-Hill, Inc., 1992. 722 p. URL: <https://aussiedistiller.com.au/books2/Distillation%20Design.pdf>
12. Distillation: Equipment and Processes / A. Göraç, Ž. Olujić (eds.). London : Elsevier Inc., 2014. 374 p. URL: https://www.academia.edu/33304932/Distillation_Equipment_and_Processes
13. Мікульонок 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
14. Prism (geometry). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Prism_\(geometry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Prism_(geometry)) (дата звернення: 28.07.2025)
15. 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>
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. Мікульонюк І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 419 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061>
 18. Мікульонюк І. О. Виготовлення обладнання хімічних виробництв. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 236 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358>
 19. Handbook of fillers and reinforcements for plastics / H.S.Katz, J.V.Milewski (eds.). New York : Van Nostrand Reinhold, 1978. 652 p. URL: <https://doi.org/10.1002/pol.1978.130161012>
 20. Мікульонюк І. О., Радченко Л. Б. Полімерні композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості. Київ : ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2005. 179 с.
 21. Chung D.D.L. Composite Materials: Science and Applications. London : Springer Verlag London Limited, 2010. 349 p. URL: https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications
 22. Мікульонюк І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості). Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 208 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632>
 23. Wypych G. Handbook of Fillers. 4th ed. Toronto : ChemTec Publishing, 2016. 922 p. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-91-1.50001-4>
 24. Tadmor Z., Gogos C. G. Principles of polymer processing. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2006. 961 p. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento1/material/Tadmor-Gogos.pdf>
 25. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Munich : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
 26. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
 27. Vlachopoulos J., Polychronopoulos N. D. Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion. Dundas : Polydynamics Inc., 2019. 337 p. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf
 28. 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>
 29. 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>
 30. Baehr H. D., Stephan K. Heat and Mass Transfer. 2nd ed. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 705 p. URL: <https://himatek.kim.ulm.ac.id/wp-content/uploads/2021/06/Baehr-H.D.-Stephan-K-Heat-and-Mass-Transfer-2nd-Edition.pdf>
 31. Dargham J. A., Mounq E. G., Chin R. K. Y., Mamat M., Wong T. H. Artificial Intelligence (AI) and the Future of Mankind. In: Yew H. T., Mamat M., Dargham J. A., Seng Kheau C., Mounq E. G. (Eds.) Internet of Things and Artificial Intelligence for Smart Environments. Singapore : Springer, 2024. P. 67–82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1432-2_5
 32. 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>
-

Ihor Mikulionok, Olena Ivanenko

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

The subject of the study is the design of prismatic nozzles of heat and mass exchange equipment and means for their oriented placement in the contact zone of the column apparatus.

The purpose of the article is a critical analysis of the designs of prism-shaped mass exchange column packings used in chemical, petrochemical, oil refining, food, microbiological, thermal power, gas and liquid industrial emissions treatment systems, and other industries.

One of the most common, structurally simple and universal contact elements of column mass exchangers is an annular nozzle in the form of a right circular ring cylinder. However, along with the packing of the specified shape, many

other designs of cylindrical packings have been developed, in particular in the form of prisms, i.e. polyhedra, two of which, located in parallel planes, have faces (bases) that are congruent polygons, and the other faces (sides) are parallelograms that have common sides with the specified polygons. In most cases, unlike the more versatile ring packing in the form of a right circular ring cylinder, the prismatic packing is used as a structured packing. The undoubted advantages of prismatic packings are high manufacturability and versatility, and the disadvantages are a relatively low specific surface area in the case of a tight fit of the flat side faces of adjacent packing elements. That is why various technical solutions are proposed for the remote location of prismatic elements, both due to various protrusions on the side faces of the packing, and the use of special distance devices to separate adjacent packing elements from each other. In the case of loading the prismatic packing oriented, namely in a vertical position with a certain gap between adjacent elements, not only does the specific surface area of the packing layer increase, but similar hydrodynamic conditions of the processed phases inside and outside the packing elements are also ensured. At the same time, a structured (oriented, regular) packing has lower hydraulic resistance and a higher permissible speed of the light phase.

Despite the numerous designs of prismatic packings, primarily in the form of almost all types of prisms, namely regular and irregular, uniform and truncated, right and oblique, star prism and toroidal prism, twisted, as well as antiprisms, improvements in their designs and methods of placement in mass exchange devices continue.

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 equipment.

Keywords: heat and mass exchange columns, structured column packing, packing element, prism, 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). Kontaktnei ta dopomizhnyi 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. Tovazhnyanskiy, L. L., Gotlinskaya, 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/>
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. 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.)
8. Raschig ring. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Raschig_ring (Accessed July 28, 2025).
9. 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>
10. Schultes M., Summers D. R. (2022). 100 Years of Distillation with Trays and Packings and Beyond // The 12th international conference Distillation & Absorption 2022. Toulouse (France), 18–21 September 2022. URL: <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>
11. Kister H. Z. (1992). Distillation Design. McGraw-Hill, Inc., New York. URL: <https://aussiedistiller.com.au/books2/Distillation%20Design.pdf>
12. Distillation: Equipment and Processes (2014) / A. Göřak, Ź. Olujć (eds.). Elsevier Inc., London. URL: https://www.academia.edu/33304932/Distillation_Equipment_and_Processes
13. 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.)
14. Prism (geometry). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Prism_\(geometry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Prism_(geometry)) (Accessed July 28, 2025)
 15. 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>
 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. 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.)
 18. 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.)
 19. Handbook of fillers and reinforcements for plastics (1978) / H.S.Katz, J.V.Milewski (eds.). Van Nostrand Reinhold, New York. URL: <https://doi.org/10.1002/pol.1978.130161012>
 20. Mikulionok, I. O., Radchenko, L.B. (2005). Polimerni kompozytni materialy i vyroby z nykh. oderzhannia, pereroblennia ta vlastyvosti [Polymer composite materials and products from them. Production, processing and properties]. IVTs "Vydavnytstvo "Politekhniku", Kyiv (Ukr.)
 21. Chung, D. D. L. (2010). Composite Materials: Science and Applications. Springer Verlag London Limited, London. URL: https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications
 22. Mikulionok, I. O., Sokolskyi, O. L. (2015). Polimerni materialy i vyroby z nykh (oderzhannia, pereroblennia, vlastyvosti) [Polymer materials and products from them (production, processing, properties)]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632> (Ukr.)
 23. Wypych G. (2016). Handbook of Fillers. 4th ed. ChemTec Publishing, Toronto. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-91-1.50001-4>
 24. Tadmor Z., Gogos C. G. (2006). Principles of polymer processing. 2nd ed. John Wiley & Sons, Hoboken. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento1/material/Tadmor-Gogos.pdf>
 25. Rauwendaal C. (2014). Polymer extrusion. 5th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
 26. Mikulionok, I. O. (2015). Technologichni osnovy pereroblennia polimeriv, plastmas i gumovykh sumishei [Technological bases of polymers, plastics and rubber mixtures processing]. NTUU "KPI", Kyiv. (Ukr.)
 27. Vlachopoulos J., Polychronopoulos N. D. (2019). Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion. Polydynamics Inc., Dundas. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf
 28. Mikulionok, I. O. (2024). Technologichni 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.)
 29. 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.)
 30. Baehr H. D., Stephan K. (2006). Heat and Mass Transfer. 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin. URL: <https://himatekkim.ulm.ac.id/id/wp-content/uploads/2021/06/Baehr-H.D.-Stephan-K-Heat-and-Mass-Transfer-2nd-Edition.pdf>
 31. Dargham J. A., Mounq E. G., Chin R. K. Y., Mamat M., Wong T. H. (2024). Artificial Intelligence (AI) and the Future of Mankind. In: Yew H. T., Mamat M., Dargham J. A., Seng Kheau C., Mounq E. G. (Eds.) Internet of Things and Artificial Intelligence for Smart Environments. Springer, Singapore, pp. 67–82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1432-2_5
 32. Dobronogov, V. G., Mikulionok, I. O. (2011). Zastusuvannia koroziiostiikykh, zharostiikykh, zharomirnykh stalei 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.).