

УДК 66.021.3:66.069.833-023.842(048.83)

МКУЛЬОНОК І. О.^{1,2*}, ЛУКІНЮК М. В.¹

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
² Інститут газу Національної академії наук України

РОЗМІЩЕННЯ ОРІЄНТОВАНОЇ КІЛЬЦЕВОЇ НАСАДКИ В КОЛОННИХ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ АПАРАТАХ (Огляд)

Одними з найбільш поширених, конструктивно простих та універсальних контактних елементів колонних теплообмінних апаратів є кільцева насадка, класичним представником якої є запатентоване 1914 року кільце Рашига, безумовними перевагами якого є висока технологічність та універсальність, а недоліками – відносно низька питома поверхня та різні гідродинамічні умови оброблюваних фаз усередині та ззовні кільця, що особливо стає відчутним в разі завантаження кільцевої насадки не внавал (насіпом), а орієнтовано – у вертикальному положенні. Орієнтована (або регулярна, структурована) насадка має менший гідравлічний опір і більшу допустиму швидкість легкої фази. При цьому можливі різні способи її укладки як у межах окремого шару, так і сусідніх шарів: впорядкована щільна або вільна по вершинах правильних трикутників, впорядкована щільно-вільна по концентричних колах, хаотична, впорядкована вільна нерівномірна, з утворенням прямолінійних або ступінчастих каналів, впорядкована щільно-вільна нерівномірна, а також розміщення за принципом «матрьошки». Незважаючи на більш ніж сторічний термін використання кільцевої насадки, удосконалення її конструкції та способів розміщення в теплообмінних апаратах тривають. У розробленні інноваційних конструкцій кільцевих насадок істотну допомогу можуть надати досягнення матеріалознавства й технології, а також штучний інтелект, що дає змогу їм успішно конкурувати з іншими типами контактних пристроїв теплообмінного обладнання.

Ключові слова: теплообмінний апарат, кільцева насадка, кільця Рашига, гідродинаміка фаз, спосіб укладання, конструкція

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2025.325834

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 16 January 2025; Accepted 27 February 2025

Постановка проблеми. Однією з найбільш поширених, конструктивно простих та універсальних контактних елементів колонних теплообмінних апаратів [1–7] є кільцева насадка [8, 9], класичною різновидністю якої є запатентовані 1914 року в Німеччині «Циліндрична насадка з листового металу для абсорбційних і реакційних колон» [10], а також того самого року у Великобританії «Удосконалення наповнювачів для реакційних або абсорбційних колон або пов'язане з ними» [11]. Винахідник і володілець зазначеного патенту – німецький хімік-технолог Фрідріх Август Рашиг (також відомий як Фріц Рашиг: Friedrich August Raschig, Fritz Raschig, 1863–1928 [12]) – розробив простий і достатньо ефективний контактний елемент, який згодом було названо на його честь «кільцем Рашига» (Raschig ring) [13–17].

Перевагами кільця Рашига є їхня висока технологічність (штампуванням [18, 19], екструзуванням [20–24] з наступним розрізанням трубчастої заготовки), а недоліками – відносно низька питома поверхня та різні гідродинамічні умови оброблюваних фаз з боку внутрішньої та зовнішньої поверхонь елементів насадки.

Аналіз попередніх досліджень. Традиційне кільце Рашига представляє собою металевий або керамічний прямий круговий кільцевий циліндр, висота якого дорівнює його зовнішньому діаметру й належить до найбільш простих поверхонь другого порядку [25] (рис. 1). Відповідно до згаданих уже патентів [10, 11] висота металевих кільць Рашига приблизно дорівнює їхньому діаметру й становить від 15 до 50 мм, проте з часом було розширено як діапазон розмірів кільць, так і номенклатуру їхніх матеріалів: кераміка, фарфор тощо [26, 27].

При цьому можливо виготовлення кільцевих елементів насадки, у тому числі й кільць Рашига, у вигляді фрагментів бракованих або спрацьованих полімерних, металевих, скляних, керамічних, фарфорових труб круглого, прямокутного, квадратного або овального поперечного перерізу з гострими або плавними кутами. Виконання торцевих поверхонь кожного з фрагментів труб, розташованих під довільним кутом до його

поздовжньої осі, дає змогу цілеспрямовано змінювати положення елементів насадки в контактній частині тепломасообмінного апарата та утворювати канали для проходження оброблюваних фаз різного напрямку й форми (пат. UA110863U).



Рис. 1 – Керамічні кільця Рашига [28]

Кільця Рашига на початку їх промислового застосування завантажували в колонний апарат неорієнтовано – «внавал». Проте в цьому разі апарат мав високий гідравлічний опір, який у два-три рази перевищував опір в разі застосування набагато досконалішої насадки – металевих або пластмасових кілець Палля (Pall-Ring) і більш технологічних кілець Бялецького (Bialecki ring) [13], розроблених хіміком Вільгельмом Пфаннмюллером (Wilhelm Pfannmüller) з німецької фірми BASF під час Другої світової війни [29]. Саме тому згодом кільця Рашига почали розміщувати в контактній частині колонних апаратів орієнтовано, утворюючи так звану регулярну (структуровану) насадку (англ. *Structured Packings*), а саме розташовуючи їх 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 зміщують один відносно одного на половину діаметра кільця [30].

Кільця Рашига, як і сідла Берля, належать до першого покоління насадок, активне використання яких тривало впродовж 1895–1950 рр. Для другого покоління насадок (кінець 1950-х – початок 1970-х рр.) характерно використання кілець Палля й сідел Інталокс, для третього (кінець 1970-х – 1990-х рр.) – кілець CMR, Nutter та IMTR. До четвертого покоління насадок, яке почалося з 1990-х рр., належать суперкільця Рашига (Raschig super-rings) [8]. Проте суперкільця Рашига, а також інші «кільцеві» насадки останніх двох поколінь, не є класичною кільцевою насадкою, а представляють собою просторові елементи, одержані штампуванням листової металевої або пластмасової заготовки з відігнутими по обидва боки від її площини фрагментами: частіше стрічками й рідше пелюстками [8, 31] (рис. 2).

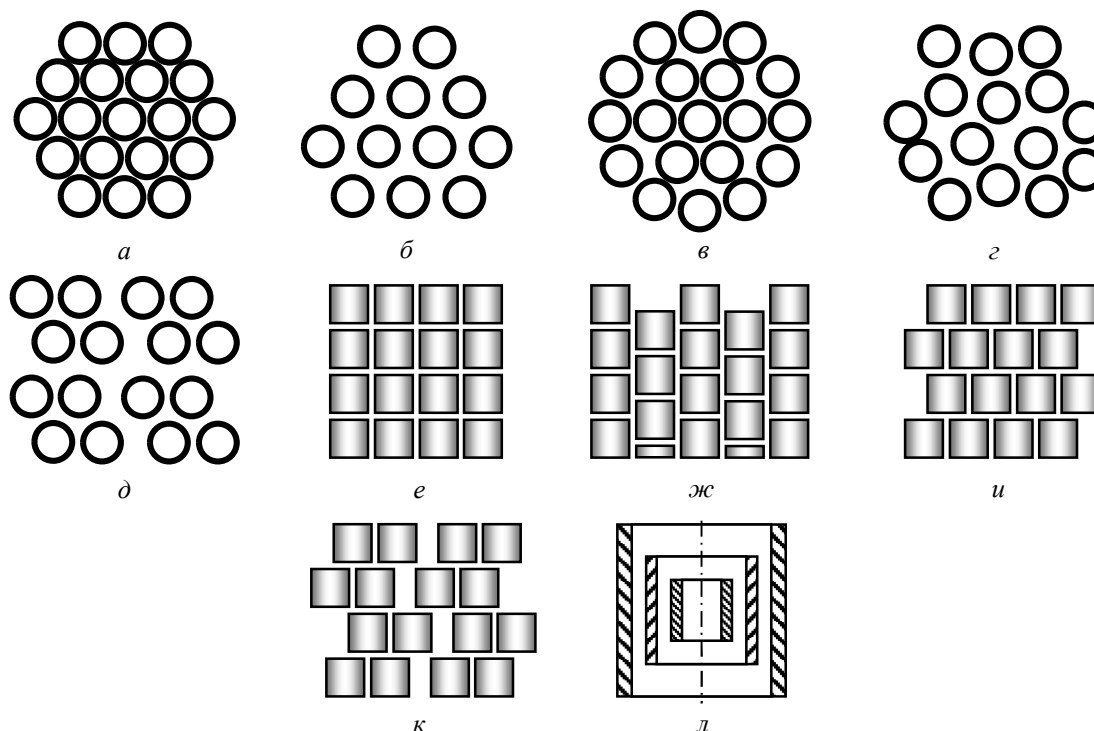


Рис. 2 – Металеve суперкільце Рашига [32]

Тому надалі розглядатимемо дійсно кільцеві насадки у вигляді замкненої оболонки здебільшого циліндричної форми з відкритими основами (зокрема не розглядатимемо елементи насадки у вигляді оболонок-багатогранників з відкритими основами, наприклад, згідно з пат. 124348C2, UA1321U, UA1675U, UA1724U, UA2229U, UA3069U, UA12700U, UA105258U, UA150776U).

Метою статті є критичний аналіз технічних засобів підвищення ефективності одного з найпростіших та універсальних контактних елементів колонних тепломасообмінних апаратів – регулярної кільцевої насадки й насамперед кілець Рашига, які впродовж понад століття успішно застосовуються у хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій, мікробіологічній, теплоенергетичній та інших галузях промисловості.

Виклад основного матеріалу. Кільцеву насадку довільного розміру зазвичай розміщують у контактній частині тепломасообмінного апарата неорієнтовано («внавал»), як і було запропоновано Фрідріхом Рашигом у його патентах DE286122С і GB191406288А 1914 року. Проте для великих і середніх елементів кільцевої насадки (еквівалентний діаметр не менше 50 мм) також застосовують орієнтоване завантаження – розміщення зазвичай у вертикальному положенні (у науково-технічних джерелах інформації зустрічається також не зовсім коректні терміни «регулярна насадка» та «впорядкована насадка»). Переваги орієнтованої насадки – менший гідравлічний опір і велика допустима швидкість легкої фази, а основні недоліки – відносна складність операцій завантаження й вивантаження (особливо для великогабаритних апаратів) і нерівномірність потоків фаз по перерізу контактної частини (навіть до виникнення режиму байпасування фаз поблизу стінок корпусу внаслідок зниженого гідравлічного опору [6]). При цьому можливі різні способи укладання кільцевої насадки: як у межах окремого шару, так і сусідніх шарів (рис. 3).



a – впорядкована щільна укладка по вершинах правильних трикутників (у шаховому порядку);
б – впорядкована вільна укладка по вершинах правильних трикутників; *в* – комбінована (щільно-вільна) впорядкована укладка по концентричних колах; *г* – хаотична укладка; *д* – впорядкована вільна нерівномірна укладка; *е* – укладка з утворенням прямолінійних каналів; *жс* – укладка з утворенням прямолінійних каналів та сусідніми елементами, зміщеними по висоті; *и* – укладка з утворенням ступінчастих каналів (укладка зі зміщенням сусідніх шарів на половину діаметра кільця); *к* – комбінована (щільно-вільна) впорядкована нерівномірна укладка; *л* – розміщення елементів різного розміру за принципом «матрьошки»

Рис. 3 – Способи орієнтованого розміщення кілець Рашига

Найменшим гідравлічним опором характеризується шар орієнтованої насадки, елементи якої укладено з утворенням прямолінійних каналів (рис. 3, *е*). Для підвищення стійкості форми такого шару насадки запропоновано укладку сусідні елементи зміщувати по висоті (пат. UA 36110U, CN115722182A; рис. 3, *жс*), проте такий спосіб укладання передбачає застосування в нижньому шарі насадки сукупності елементів зменшеної або збільшеної висоти.

Для підвищення надійності фіксації елементів насадки один відносно одного й забезпечення прямолінійності утворюваних ними каналів (див. рис. 3, *е, жс*) у кожному з кільцевих елементів запропоновано з боку однієї з його основ виконувати проточку, а в елементі з боку іншої його основи – розточку для розміщення в ній ділянки елемента з проточкою іншого елемента насадки (рис. 4).

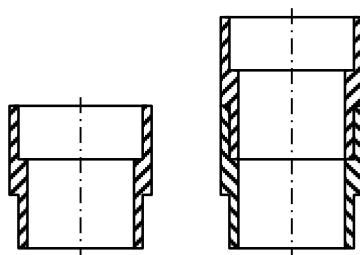


Рис. 4 – Кільцевий елемент насадки й спосіб розміщення таких елементів у шарі насадки (пат. UA 106349U)

Для запобігання зміщенню елементів сусідніх шарів на торцевих поверхнях оболонки запропоновано виконувати рівномірно розміщені паралельні виступи і западини, що чергуються між собою (пат. UA42586U). Розташування виступів певного елемента між западинами верхнього та/або нижнього елемента надійно фіксують положення обох елементів у шарі насадки, що стабілізує гідродинаміку фаз упродовж тривалого часу.

Також запропоновано спосіб впорядкованої щільної укладки сукупності орієнтованих елементів кільцевої насадки, за якого елементи укладають по концентричних колах горизонтальними шарами з кутовим зміщенням сусідніх рядів на величину, що не перевищує товщини стінки елемента, при цьому після повного перекриття внутрішнього перерізу кілець, напрямки зсуву змінюють на протилежний (а. с. SU316458A1; рис. 5). Основні недоліки зазначеного способу – складність реалізації та низька стійкість шару насадки. Аналогічне технічне рішення для колон великого діаметра запропоноване в а. с. SU880454A1.

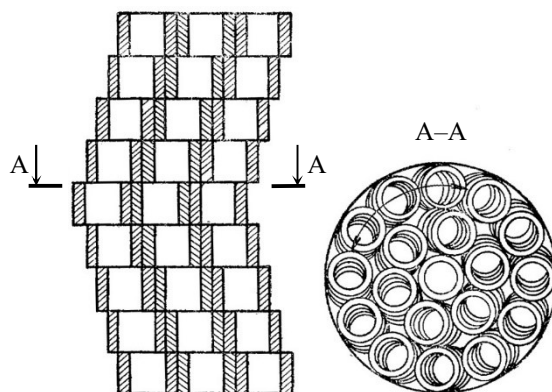


Рис. 5 – Спосіб впорядкованої щільної укладки орієнтованих кілець Рашига згідно з а. с. SU316458A1

Незвичний спосіб впорядкованої щільної укладки сукупності орієнтованих елементів кільцевої насадки полягає в тому, що в зазначених елементах виконано зміщені по їхній висоті наскрізні діаметральні отвори, крізь які пропущено гнучкий з'єднувальний елемент, наприклад, металевий дріт (а. с. SU1225607A1; рис. 6). При цьому нижній шар елементів спираються не на підтримувальну решітку, а на кільцеву опору, завдяки чому центральні елементи провисають відносно периферійних, утворюючи таким чином конічні шари, спрямовані вершинами донизу. Таке технічне рішення дає змогу ефективно перерозподіляти важку фазу від периферії контактної частини апарата до її центра та уникати застосування перерозподільних тарілок. Проте такий спосіб укладання насадки дуже проблематичний у разі її невеликих розмірів та одночасно значного діаметра колони через надмірну вагу шару насадки в цілому. Крім того, цей спосіб не передбачає застосування класичних кілець Рашига, що істотно звужує його технологічні можливості.

Розміщення за принципом «матрьошки» реалізовано в пат. UA99875U (рис. 7). Кожний елемент насадки містить зафіксовані одна в одній щонайменше дві циліндричні оболонки з відкритими основами 1–3, при цьому висота кожної оболонки дорівнює її діаметру, а сусідні оболонки з'єднано між собою за допомогою розташованих з боку основ внутрішньої оболонки (оболонка 2 для пари оболонок 1 і 2, а також оболонка 3 для пари оболонок 2 і 3 є внутрішніми) двох пружних смужок 4, довжина кожної з яких у вільному стані

більше за внутрішній діаметр зовнішньої оболонки. Зазначені пружні смужки 4 для з'єднання сусідніх оболонок переважно розташовувати з поворотом на 90° одна відносно одної. Таке технічне рішення істотно підвищує питому поверхню окремого кільця Рашига (зовнішнього найбільшого діаметра), а також забезпечує можливість використання наявних стандартних кілець Рашига для його виготовлення. Для цього можуть бути використані як спеціально виготовлені оболонки 1–3, так і стандартні кільця Рашига таких розмірів (діаметр \times висота \times товщина стінки, мм): керамічні – $100 \times 100 \times 10$, $80 \times 80 \times 8$, $50 \times 50 \times 5$, $35 \times 35 \times 4$, $25 \times 25 \times 3$, $15 \times 15 \times 2$ і $10 \times 10 \times 1,5$ мм, а також металеві – $50 \times 50 \times 1$, $35 \times 35 \times 0,8$, $25 \times 25 \times 0,8$, $15 \times 15 \times 0,5$ і $10 \times 10 \times 0,5$ мм. Аналогічне технічне рішення, але для кільцевих елементів з поздовжніми зовнішніми та/або внутрішніми ребрами запропоноване в пат. UA149368U.

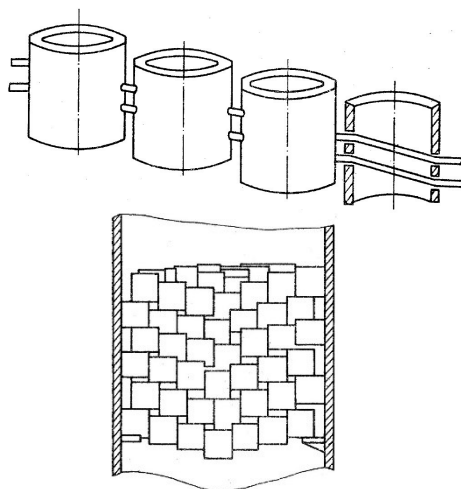
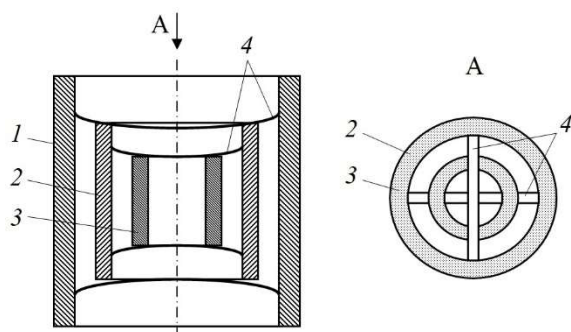


Рис. 6 – Спосіб впорядкованої укладки орієнтованих кілець Рашига згідно з а. с. SU1225607A1

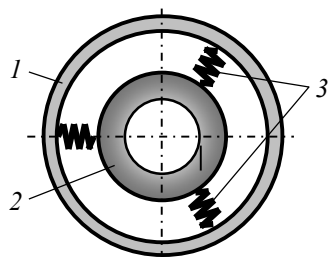


1–3 – найбільша, середня й найменша оболонки; 4 – пружні смужки

Рис. 7 – Спосіб розміщення кільцевих елементів насадки за принципом «матрьошки» (пат. UA99875U)

Інший спосіб фіксації оболонок одна в одній за принципом «матрьошки» запропоновано в пат. UA110926U. У цьому елементі, що містить замкнену оболонку у вигляді прямого кругового циліндра з відкритими основами з розміщеною в її порожнині іншої аналогічної оболонки меншого діаметра, при цьому в стінках сусідніх оболонок виконано отвори з розмішеними в них своїми кінцями пружинами розтягу (рис. 8). Внутрішні оболонки під дією газового, парового або парогазового потоку, що проходить крізь елемент, хаотично коливаються, що додатково турбулізує потоки оброблюваних фаз та створює їх пульсаційний рух, а отже й інтенсифікує процес тепломасообміну в цілому.

При цьому, якщо впорядковане щільне укладання кільцевих елементів по вершинах правильних трикутників не спричинює труднощів (адже елементи в межах кожного шару фіксуються сусідніми елементами та корпусом апарата), то їх впорядковане вільне укладання зазвичай передбачає фіксацію потрібного положення кожного елемента (адже з боку зовнішньої поверхні елемент не має жодного упору).



1 – зовнішня оболонка; 2 – внутрішня оболонка; 3 – пружини розтягу

Рис. 8 – Спосіб розміщення кільцевих оболонок за принципом «матрьошки» в елементі насадки (пат. UA110926U)

Для забезпечення певної відстані між сусідніми в межах кожного шару елементами орієнтованої насадки, що сприяє вирівнюванню режимів потоків фаз всередині та ззовні елементів насадки, запропоновано пристрій у вигляді m-подібної скоби (пат. UA75745U; рис. 9).

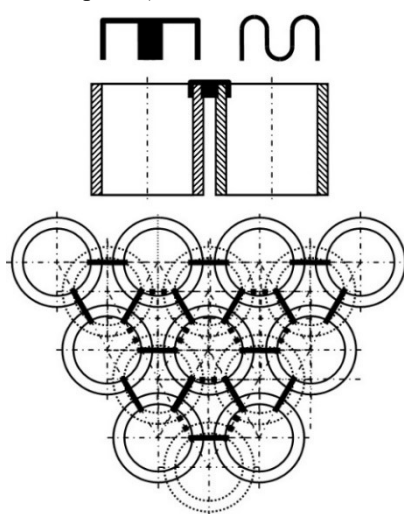
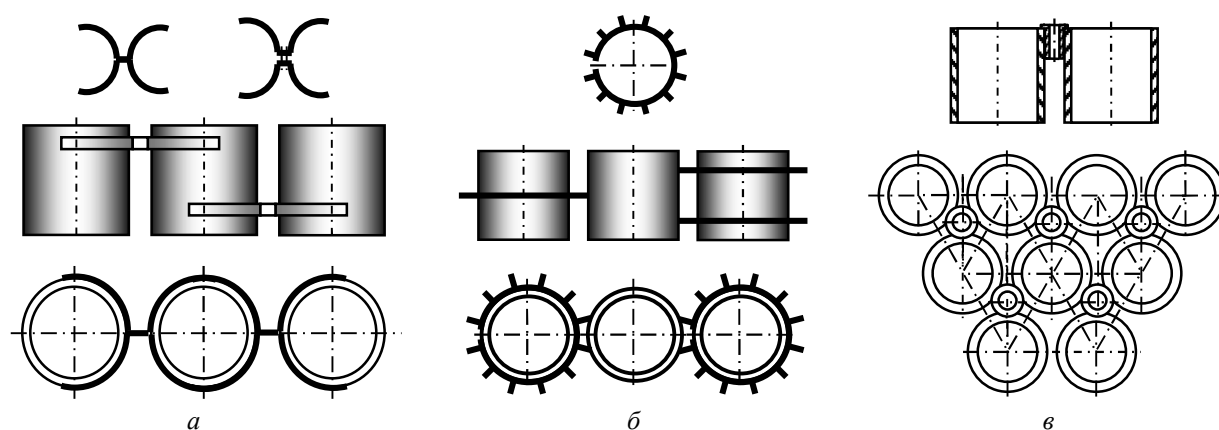


Рис. 9 – Пристрій для дистанційного розташування кілець Рашига та його застосування (пат. UA75745U)

Конструкції інших пристроїв аналогічного призначення наведено на рис. 10.



a – пат. UA107206U; б – пат. UA107208U; в – пат. UA107209U

Рис. 10 – Пристрої для дистанційного розташування кілець Рашига

Відповідно до пат. UA107206U пристрій для дистанційного укладання кільцевих насадок (рис. 10, а) складається з двох розміщених в одній площині і з'єднаних між собою перемичкою пружних фіксаторів, кожний з яких виконано у вигляді дуги кола з центральним кутом понад 180° і радіусом, що відповідає радіусу кільцевих насадкових тіл. При цьому пристрій може бути виготовлено суцільним (у вигляді деталі) з полімерного матеріалу, наприклад, литтям під тиском [22, 24], а також складеним із двох однакових пружних пластин, з'єднаних між собою в місці перемички.

Відповідно до пат. UA107208U пристрій аналогічного призначення (рис. 10, б) виконано у вигляді розрізного пружного кільця з розташованими в його площині виступами, при цьому його також може бути виконано у вигляді деталі з полімерного матеріалу.

Відповідно до пат. UA107209U аналогічний пристрій виконано у вигляді круглого кільцевого циліндра із зовнішнім буртиком або зовнішньою відбортовкою на одному з його торців, при цьому зазначений циліндр переважно виконувати заввишки не менше від його діаметра (рис. 10, в).

Аналогічно пристрою згідно з пат. UA107206U (див. рис. 10, а) розроблено пристрій для застосування разом з кільцевими насадковими елементами, виготовленими з феромагнітного матеріалу, але при цьому кожний з фіксаторів виготовлено у вигляді постійного магніту, наприклад, з полімерного композиційного матеріалу (пат. UA150593U). У цьому разі центральний кут дуги кола кожного з фіксаторів може бути менше 180° , що зменшує матеріалоємність пристрою. Проте цей пристрій має суттєве обмеження щодо матеріалу елементів насадки, зокрема зазвичай виготовлених з корозійностійкої немагнітної сталі аустенітного класу, наприклад, таких поширених у хімічній і харчовій промисловості сталей, що містять значну частку нікелю, як 08X18H10, 12X18H10T та ін. [33].

Висновки. Незважаючи на більш ніж сторічний термін використання кілець Рашига та інших видів кільцевих насадок, інженери, науковці й винахідники продовжують удосконалювати їхні конструкції, а також способи й засоби для їх розміщення в тепломасообмінних апаратах. При цьому увага приділяється не лише елементам насадки безпосередньо, а й засобам для їх дистанційного укладання у межах окремого шару контактної частини апарата або її ярусу для забезпечення аналогічних гідродинамічних умов як всередині кожного з елементів, так і в просторі між ними, що підвищує інтенсивність та ефективність тепломасообмінного процесу в апараті. У розробленні інноваційних конструкцій кільцевих насадок істотну допомогу можуть надати сучасні досягнення в матеріалознавстві й технології, насамперед нові композиційні матеріали [22, 24, 34–37], комп'ютерне моделювання [38] та 3D-друк [39, 40], а також штучний інтелект [41]. Це дає змогу кільцевим насадкам і сьогодні успішно конкурувати з іншими типами контактних пристроїв тепломасообмінного обладнання, призначеного для розділення рідких і газоподібних сумішей широкої номенклатури.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати шляхи вдосконалення таких поширених разом з кільцями Рашига та їхніми аналогами технологічних у виготовленні й простих в експлуатації елементів насадки як штамповані елементи насадки, які характеризуються простотою виготовлення, низькою вартістю, а також високим ступенем використання матеріалу (низьким рівнем утворення відходів під час виробництва).

Список використаної літератури

1. Тютюнников А. Б., Товажнянский Л. Л., Готлинская А. П. Контактные элементы массообменных колонн. Киев : ИСИО, 1993. 440 с.
2. Врагов А. П. Массообменные процессы та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв. Суми : Університетська книга, 2007. 284 с.
3. Mikulionok I. O. Classification of Nozzles of Mass Transfer Apparatuses // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 83, N 9. P. 1631–1637. DOI: 10.1134/S107042721109031X
4. Мікульонок І. О. Керамічні насадки тепломасообмінних апаратів // Кераміка: наука и жизнь. 2011. № 2. С. 24–34.
5. Пушнов А. С., Микулёнок И. О., Севрюков А. С., Беренгартен М. Г. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов интенсификации в них процессов тепломассообмена // Химическая технология. 2014. № 4. С. 244–250.
6. 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>
7. 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>
8. Schultes M. Raschig Super-Ring: A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages // *Chemical Engineering Research and Design*. 2003. Vol. 81, Part A. P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.1205/026387603321158186>
 9. Schultes M. Dedicated to Dr. Ralf Goedecke on the occasion of his 70th birthday // *Chemie Ingenieur Technik*. 2014. Vol. 86, N 5. P. 1–9. DOI: 10.1002/cite.201300166
 10. Patent DE286122C "Zylindrische Füllkörper aus Metallblech für Absorptions- und Reaktionstürme"; Dr. F. Raschig; LUDWIGSHAFEN a. Rh.; Date of Patent 06.02.1914.
 11. Patent GB191406288A "Improvement in or relating to Filling Materials for Reaction or Absorption-towers" / Friedrich Raschig (DE); Date of Filing 12.03.1914; Date of Patent 30.07.1914.
 12. Friedrich Raschig. https://en.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Raschig (дата звернення: 12.01.2025).
 13. Raschig ring. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Raschig_ring (дата звернення: 12.01.2025).
 14. Mikulionok I. O. Ring packing contact elements of mass transfer devices (review of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, N 1–2. P. 125–129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-018-0450-y>
 15. 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>
 16. *Distillation: Equipment and Processes* / A. Górak, Ž. Olujić (eds.). London : Elsevier Inc., 2014. 374 p. URL: https://www.academia.edu/33304932/Distillation_Equipment_and_Processes
 17. Kister H. Z. *Distillation Design*. New York : McGraw-Hill, Inc., 1992. 722 p. URL: <https://aussiedistiller.com.au/books2/Distillation%20Design.pdf>
 18. Мікульюнок І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 419 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061>
 19. Мікульюнок І. О. Виготовлення обладнання хімічних виробництв. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 236 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358>
 20. 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>
 21. Rauwendaal C. *Polymer extrusion*. 5th ed. Munich : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
 22. Мікульюнок І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
 23. 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
 24. Мікульюнок 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>
 25. 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, N 11–12. P. 976–981. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01034-y>
 26. Patent DE292622C "Zylindrische Füllkörper für Absorptions- und Reaktionstürme"; Dr. F. Raschig; LUDWIGSHAFEN a. Rh.; Date of Patent 06.05.1915.
 27. Patent DE297379C "Zylindrische Füllkörper aus Metallblech für Absorptions- und Reaktionstürme"; Dr. F. Raschig; CHEMISCHE FABRIK in LUDWIGSHAFEN a. Rh.; Date of Patent 19.02.1916.
 28. AS ENERGI. Ceramic Raschig Rings. URL: <https://asenergi.com/en/products/ceramic-raschig-rings.html> (дата звернення: 12.01.2025).
 29. Pat. DE853159C "Föllkörper" / Wilhelm Pfannmüller (DE); Date of Filing 21.07.1944; Date of Patent 23.10.1952.
 30. Walsh F. C., Arenas L. F., León de C. P. Editors' Choice – Critical Review – The Bipolar Trickle Tower Reactor: Concept, Development and Applications // *Journal of The Electrochemical Society*. 2021. Vol. 168, N 2. Article 023503. 23 p. DOI: 10.1149/1945-7111/abdd7a
 31. Mikulionok I. O. Classification of stamped packing elements of mass-exchange apparatuses (survey of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 56, N 9–10. P. 861–869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00853-9>
 32. Pingxiang Yamtop Chemical Co., Ltd. Metallic Super Raschig Ring. URL:
-

- <https://www.yamtop.com/products/metallic-super-raschig-ring.html> (дата звернення: 12.01.2025).
33. 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>
 34. 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
 35. Мікульонюк І. О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы. 2012. № 9. С. 29–38.
 36. Мікульонюк І.О., Радченко Л.Б. Полімерні композитні матеріали й виробы з них. Одержання, перероблення та властивості. Київ : ІВЦ «Видавництво “Політехніка”», 2005. 179 с.
 37. Мікульонюк І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і виробы з них (одержання, перероблення, властивості). Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 208 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632>
 38. Baehr H. D., Stephan K. Heat and Mass Transfer. 2nd ed. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 705 p. URL: <https://himatekkim.ulm.ac.id/id/wp-content/uploads/2021/06/Baehr-H.D.-Stephan-K-Heat-and-Mass-Transfer-2nd-Edition.pdf>
 39. 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
 40. 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
 41. Dargham J. A., Moug 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., Moug 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
-

Ihor Mikulionok, Mykhailo Lukiniuk

LOCATION OF ORIENTED RING PACKING ELEMENTS IN COLUMN HEAT AND MASS EXCHANGE APPARATUS (REVIEW)

The subject of the research is the construction of ring nozzles (ring packing elements) of heat and mass exchange equipment and methods of their oriented placement.

The purpose of the research is a critical analysis of technical means of increasing the efficiency of an oriented (regular, structured) ring nozzle and, first of all, Raschig ring, which have been successfully used in various industries for more than a century.

One of the most common, constructively simple and universal contact elements of column heat exchangers is a ring nozzle, in particular the "Raschig ring" patented in 1914 in Germany and Great Britain, the advantages of which are their high manufacturability and versatility in terms of the nomenclature of the processed phases, and the disadvantages are a relatively low specific surface area and different hydrodynamic conditions of the processed phases from the inner and outer surfaces of the nozzle elements, which is especially noticeable when the annular nozzle is loaded into the column apparatus in bulk, and oriented in a vertical position.

An oriented (regular, structured) nozzle has a lower hydraulic resistance and a higher allowable velocity of the light phase. At the same time, various methods of stacking the ring nozzle are possible both within a separate layer and in adjacent layers: the formation of an ordered dense or loose stacking along the vertices of regular triangles (in checkerboard order), an ordered dense-loose stacking along concentric circles, chaotic stacking, ordered free uneven laying, laying with the formation of straight or stepped channels, ordered dense-free uneven laying, as well as placing elements of the ring nozzle according to the nesting doll principle.

Modern advances in materials science and technology, as well as artificial intelligence, can provide significant help in the development of innovative designs of ring nozzles, which allows ring nozzles to successfully compete with other types of contact devices of heat and mass exchange equipment designed for the separation of various liquid and gaseous systems.

The above Review can be useful to designers and inventors in the search for innovative technical solutions in the field of contact elements of heat and mass exchange equipment.

Keywords: heat and mass exchange apparatus, annular nozzle, Raschig ring, hydrodynamics of phases, method of stacking, construction

References

1. Tyutyunnikov, A. B., Tovazhnyanskiy, L. L., Gotlinskaya, A. P. (1993). Kontaknyye elementi massoobmennykh kolonn [Contact elements of mass transfer columns]. ISIO, Kiyev (Rus.)
2. 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.).
3. 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
4. Mikulionok I. O. (2011). Keramichni nasadky teplomasoobminnykh aparativ [Ceramic nozzles of heat and mass exchange aparatus]. *Keramika: nauka i zhyzn*, no. 2, pp. 24–34 (Ukr.)
5. Pushnov, A. S., Mikulionok I. O., Sevryukov, A. S., Berengarten, M. G. (2014). Klassifikatsiya konstruksiy nasadok kolonnykh apparatov i metodov intensifikatsii v nikh protsessov teplomasoobmena [Classification of column packings designs and methods of intensifying heat and mass transfer processes in them]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, no. 4, pp. 244–250 (Rus.)
6. Mikulionok, I. O. (2014). Mekhanichni, hidromekhanichni i masoobminni protsesy 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.)
7. 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.)
8. Schultes M. (2003). Raschig Super-Ring: A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages. *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 81, part A, pp. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.1205/026387603321158186>
9. Schultes M. (2014). Dedicated to Dr. Ralf Goedecke on the occasion of his 70th birthday. *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 86, no. 5, pp. 1–9. DOI: 10.1002/cite.201300166
10. Patent DE286122C "Zylindrische Füllkörper aus Metallblech für Absorptions- und Reaktionstürme"; Dr. F. Raschig; LUDWIGSHAFFEN a. Rh.; Date of Patent 06.02.1914.
11. Patent GB191406288A "Improvement in or relating to Filling Materials for Reaction or Absorption-towers" / Friedrich Raschig (DE); Date of Filing 12.03.1914; Date of Patent 30.07.1914.
12. Friedrich Raschig. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Friedrich_Raschig (Accessed January 12, 2025)
13. Raschig ring. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Raschig_ring (Accessed January 12, 2025)
14. 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>
15. 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. 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>
16. Distillation: Equipment and Processes (2014) / A. Görak, Ž. Olujić (eds.). Elsevier Inc., London. URL: https://www.academia.edu/33304932/Distillation_Equipment_and_Processes
17. Kister H. Z. (1992). Distillation Design. McGraw-Hill, Inc., New York. URL: <https://aussiedistiller.com.au/books2/Distillation%20Design.pdf>
18. Mikulionok, I. O. (2012). Vygotovlennia, montazh ta ekspluatatsiia obladnannia khimichnykh vyrobnystv [Manufacture, installation and operation of chemical equipment]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061> (Ukr.)
19. Mikulionok, I. O. (2022). Vygotovlennia obladnannia khimichnykh vyrobnystv [Manufacture of chemical equipment]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358> (Ukr.)
20. 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>
21. Rauwendaal, C. (2014). Polymer extrusion. 5th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>

22. 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.)
23. 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
24. 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/123456789/35084> (Ukr.)
25. 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>
26. Patent DE292622C "Zylindrische Füllkörper für Absorptions- und Reaktionstürme"; Dr. F. Raschig; LUDWIGSHAFEN a. Rh.; Date of Patent 06.05.1915.
27. Patent DE297379C "Zylindrische Füllkörper aus Metallblech für Absorptions- und Reaktionstürme"; Dr. F. Raschig; CHEMISCHE FABRIK in LUDWIGSHAFEN a. Rh.; Date of Patent 19.02.1916.
28. AS ENERGI. Ceramic Raschig Rings. URL: <https://asenergi.com/en/products/ceramic-raschig-rings.html> (Accessed January 12, 2025)
29. Pat. DE853159C "Föllkörper" / Wilhelm Pfannmüller (DE); Date of Filing 21.07.1944; Date of Patent 23.10.1952.
30. Walsh, F. C., Arenas, L. F., León de, C. P. (2021). Editors' Choice – Critical Review – The Bipolar Trickle Tower Reactor: Concept, Development and Applications. *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 168, no. 2. Article 023503. 23 p. DOI: 10.1149/1945-7111/abdd7a
31. 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>
32. Pingxiang Yamtop Chemical Co., Ltd. Metallic Super Raschig Ring. URL: <https://www.yamtop.com/products/metallic-super-raschig-ring.html> (Accessed January 12, 2025)
33. 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.)
34. 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
35. Mikulionok, I. O. (2012). Klassifikatsiya termoplasticheskikh kompozitsionnykh materialov i ikh napolniteley [Classification of thermoplastic composite materials and their fillers]. *Plasticheskiye massy*, no 9, pp. 29–38. (Rus.)
36. 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 "Politekhnik"», Kyiv (Ukr.)
37. 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.)
38. 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>
39. 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: https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_7_ISSUE_3/IJMET_07_03_036.pdf
40. 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
41. 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. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-1432-2_5