

УДК 66-912:66.021.4(048.83)

МКУЛЬОНОК І. О.*, **КАРВАЦЬКИЙ А. Я.**, **ІВАНЕНКО О. І.**, **ЛЕЛЕКА С. В.**
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕПЛООБМІННИКИ З ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯМ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ (Огляд конструкцій)

Розроблено класифікацію теплообмінників з псевдозрідженням сипкого матеріалу для застосування на підприємствах хімічної, гірничорудної, будівельної, харчової, металургійної та переробної галузей промисловості. Виконано критичний огляд найбільш характерних конструкцій теплообмінних апаратів з псевдозрідженим шаром, запропонованих науковцями, конструкторами й винахідниками провідних країн світу. Конструкції теплообмінних апаратів проаналізовано залежно від методу псевдозрідження, ролі сипкого матеріалу в процесі теплообміну, характеру процесу теплообміну в часі, характеру псевдозрідження (в теплообмінниках безперервної дії), механізму теплообміну сипкого матеріалу, кількості псевдозріджених шарів, що беруть участь у теплообміні, типу теплообмінного апарата, наявності додаткових теплообмінних пристроїв у теплообміннику, наявності рухомих конструктивних елементів, а також типу сипучого матеріалу киплячого шару.

Ключові слова: теплообмінний апарат, сипкий матеріал, псевдозріджений шар, класифікація, конструкція.

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2022.265359

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua
Received 30 May 2022; Accepted 30 June 2022

Постановка проблеми. Псевдозріджений, або киплячий, шар – один з найбільш ефективних і продуктивних процесів хімічної, харчової, переробної, теплоенергетичної та інших галузей промисловості за участю сипких матеріалів [1–3]. Він характеризується високою питомою поверхнею контакту фаз, однорідністю концентрації та температури, стабільним гідравлічним опором, а також відносною простотою апаратного оформлення [4–8].

Завдяки зазначеним перевагам псевдозріджений шар використовується в різному технологічному обладнанні, у тому числі в теплообмінних апаратах для теплового оброблення різноманітних сипких матеріалів як кінцевого продукту або як проміжного теплоносія [9–11].

Далі розглянуто конструкції саме теплообмінників псевдозрідженого шару і майже не приділено уваги обладнанню для спалювання твердого палива в киплячому шарі [12, 13], розпилювальним сушаркам, хімічним реакторам, а також конструкціям газорозподільних пристроїв апаратів киплячого шару [14, 15].

Зазначене питання вже було порушене авторами [16], проте далі наведено більш ґрунтовний аналіз розроблених конструкцій теплообмінників з псевдозрідженням сипкого матеріалу.

Метою статті є розроблення розгорнутої класифікації теплообмінних апаратів з псевдозрідженим шаром сипкого матеріалу, а також аналіз найбільш характерних конструкцій.

Аналіз попередніх досліджень

Аналіз існуючих конструкцій теплообмінних апаратів з псевдозрідженим шаром дає змогу запропонувати їхню класифікацію, наведену на рис. 1.

За методом псевдозрідження розрізняють теплообмінники, псевдозрідження в яких реалізується зріджувальним агентом, вібрацією, а також їх комбінацією.

У більшості теплообмінників псевдозріджений шар утворюється за допомогою зріджувального агента – повітря, димових газів, води і т. д., який може рухатися не тільки вгору, але і вниз. Наприклад, розроблено апарат типу «труба в трубі» з двома псевдозрідженими шарами (а. с. № SU901798A1). У центральній трубі рухається висхідний потік одного зріджувального агента з частинками сипкого матеріалу, що перебуває над нижньою розподільною решіткою й має густину вищу за густину зріджувального агента. При цьому в зовнішній трубі рухається низхідний потік другого зріджувального агента з частинками сипкого матеріалу, що перебуває під верхньою розподільною решіткою й має густину нижчу від густини цього зріджувального

агента (рис. 2). У результаті в апараті реалізується ефективний режим протитечії з псевдозрідженим шаром в кожному з двох теплоносіїв.

Вертикальний теплообмінник комбінованого псевдозрідження з газорозподільними решітками, що вібрують, та коридорним пучком горизонтальних теплообмінних труб (заявка № DE19801753A1). Між вертикальними рядами теплообмінних труб на стрижнях, що коливаються, підвищено перфоровані пластини, які інтенсифікують гідродинаміку й теплообмін псевдозрідженого шару.

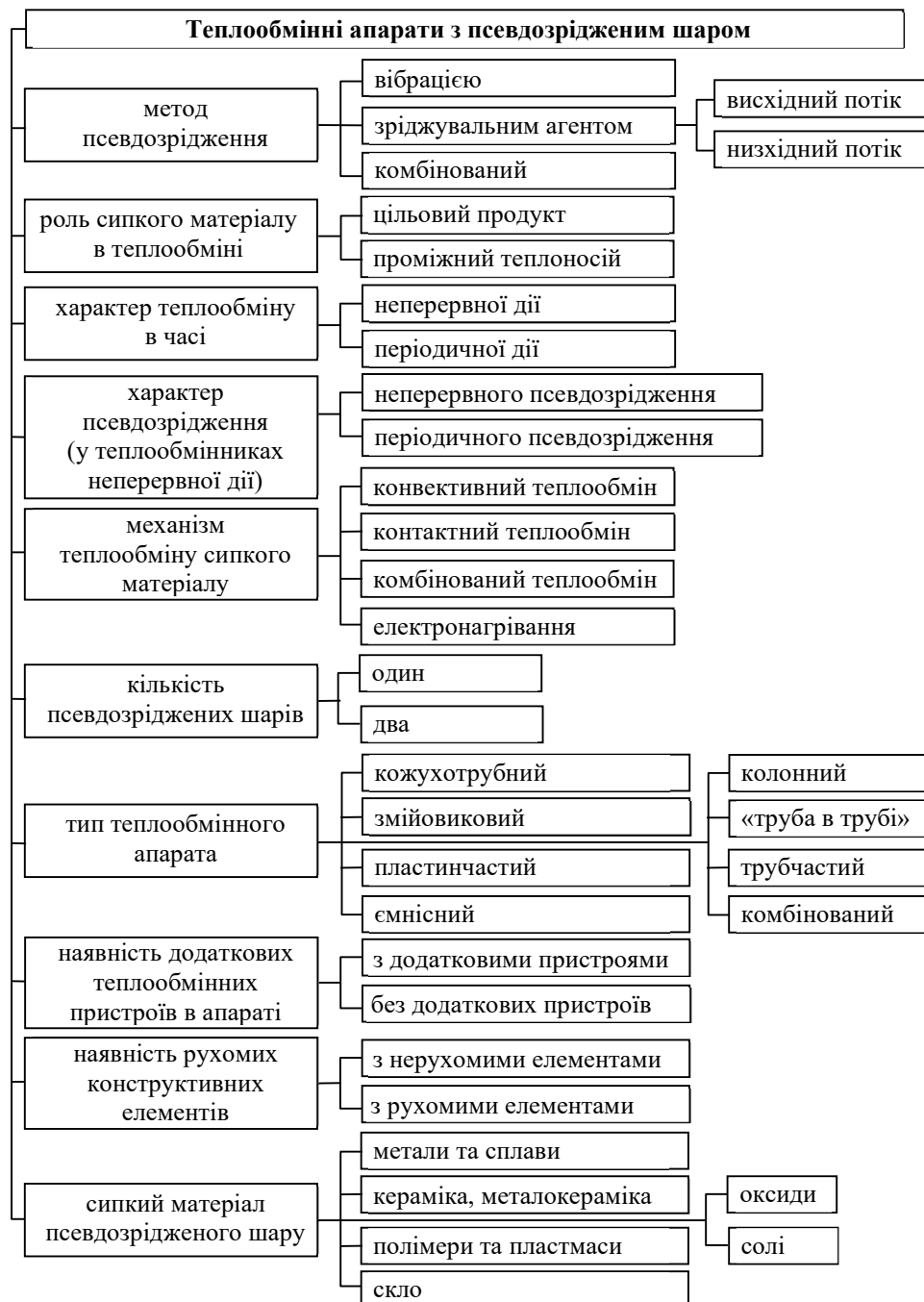


Рис. 1 – Класифікація теплообмінників з псевдозрідженим шаром

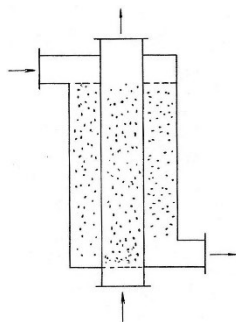


Рис. 2 – Теплообмінник з двома псевдозрідженими шарами згідно з а. с. № SU901798A1

У теплообміннику згідно із заявкою № US2002/011328A1 псевдозрідження шару сипкого матеріалу утворюється за допомогою віброприводу без використання зріджувального агента.

У горизонтальному теплообміннику вібрації піддаються коробчастий корпус або теплообмінні труби, що не тільки знижує термічний опір примежового шару біля зовнішньої поверхні теплообмінних труб, але й сприяє їхньому своєчасному очищенню від різноманітних відкладень (пат. № JPH0428997A).

За роллю сипкого матеріалу в процесі теплообміну розрізняють теплообмінники з сипким матеріалом як цільовим продуктом, а також як проміжним теплоносієм, що забезпечує нагрівання або охолодження цільового потоку рідкого або газоподібного середовища.

У теплообміннику для охолодження гранульованих добрив (пат. № RU2022229C1) газорозподільну решітку виконано з поперечними гофрами та нахиленою в напрямку вивантаження з апарата сипкого матеріалу. У западинах решітки встановлено теплообмінні труби для охолодної води, а отвори або щілини в решітці виконано в бічних ділянках гофрів, що запобігає утворенню застійних зон на решітці (проте залишається можливість налипання вологого матеріалу на верхні ділянки труб).

Аналогічний апарат, але з плоскими газорозподільними решітками розглянуто в пат. № UA51321U. Цей теплообмінник простіший у виготовленні, проте він ще більш схильний до утворення застійних зон, особливо в нижніх частинах теплообмінних труб.

Теплообмінник з проміжним псевдозрідженим сипким теплоносієм для утилізації сонячної енергії описано в заявці № WO2012/052661A2.

Апарат псевдозрідженого шару для теплообміну між рідким агентом і рідиною описано в пат. № CN575075A5. Для нагрівання або охолодження рідини її подають у плоскі трубки, розташовані вузькою гранню над газорозподільною решіткою. Теплообмін між зріджувальним агентом і рідиною інтенсифікується частинками сипкого матеріалу, що перебувають як між трубками, так і над ними (рис. 3).

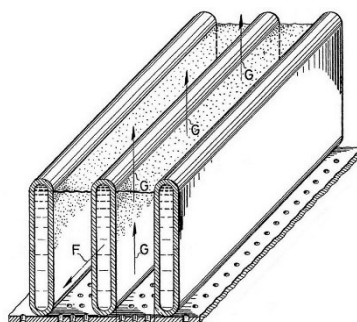


Рис. 3 – Теплообмінник згідно з пат. № CN575075A5

Регенеративний теплообмінник виконано у вигляді циліндричного корпуса з вигнутими вздовж його осі лопатками, що розділяють порожнину корпуса на камери холодного й гарячого теплоносіїв, які чергуються між собою в коловому напрямку (а. с. № SU1368606A1). Простір між лопатками заповнено рухомою насадкою, яка під дією висхідних потоків холодного й гарячого теплоносіїв та завдяки спеціальній

конструкції лопаток поступово переходить з камери в камеру, передаючи при цьому теплоту від гарячого теплоносія холодному теплоносієві.

За характером процесу теплообміну в часі розрізняють теплообмінники безперервної та періодичної (циклічної, переривчастої) дії.

Теплообмінник періодичної дії у вигляді відкритої циліндричного стакана з розташованим у днища конічним перфорованим розподільником зріджувального агента й співвісною зі стаканом вертикальною підвідною трубою описано в пат. № JPS59161690A та заявці № EP0116920A1.

Теплообмінник періодичної дії у вигляді відкритого циліндричного стакана з розташованим у днища конічним перфорованим розподільником зріджувального агента та співвісною зі стаканом вертикальною підвідною трубою (пат. № JPS59161690A, заявка № EP0116920A1).

Теплообмінник періодичної дії складається з двох розташованих на одному рівні вертикальних корпусів з газорозподільними решітками та переточними трубами (а. с. № SU638834A1). Нижню частину кожного з корпусів за допомогою похилих труб сполучено з верхньою частиною іншого корпусу, що забезпечує циркуляцію сипкого матеріалу не тільки в межах кожного корпусу, але й між ними. Після оброблення сипкого матеріалу, наприклад, гарячим зріджувальним агентом, через корпуси пропускають зріджувальний агент, що підлягає нагріванню.

Теплообмінник для охолодження високотемпературних запиленних газів (наприклад, димових газів) містить вертикальний циліндричний корпус з газорозподільними решітками (а. с. № SU723355A1; рис. 4). У верхню частину центральної труби, нижній зріз якої розташовано під газорозподільною решіткою, вводиться охолоджуваний газ. Внаслідок повороту на 180° з газу під дією сил інерції виділяються великі дисперсні частинки, що осідають у нижній частині корпусу. Далі частково очищений газ проходить крізь газорозподільну решітку, забезпечуючи псевдозрідження та нагрівання інертного сипкого матеріалу. При цьому нагрівається теплоносій, що проходить крізь змійовик, розташований над газорозподільною решіткою в шарі сипкого матеріалу. Виділені з газу в псевдозрідженому шарі дрібнодисперсні частинки по трубі транспортуються в нижню частину корпусу та приєднуються до попередньо відділених великих частинок. Таким чином, цей теплообмінник одночасно виконує роль газового фільтра (сепаратора).

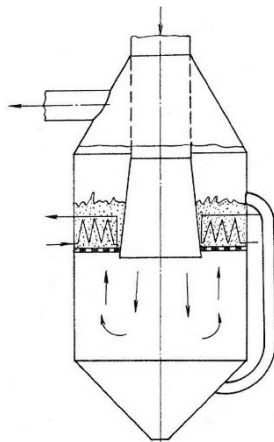


Рис. 4 – Теплообмінник-фільтр згідно з а. с. № SU723355A1

У пат. № KR960701971A та US5773379A нагрітий сипкий матеріал охолоджується не безпосередньо в псевдозрідженому шарі апарата безперервної дії, а в низхідному щільному шарі частини матеріалу, що відводиться із зони псевдозрідження у виносному теплообміннику. Надлишок теплоти від сипкого матеріалу відбирається легкокиплячою рідиною, що циркулює в теплообмінних трубах теплообмінника.

Виносний змійовиковий теплообмінник аналогічного принципу дії описано також у заявках № KR19990023666A та EP0898115A1. Нагрітий сипкий матеріал разом зі зріджувальним агентом відводиться з верхньої частини апарата псевдозрідженого шару, відокремлюється від зріджувального агента в циклоні, охолоджується у виносному теплообміннику та повертається в апарат псевдозрідженого шару.

Теплообмінник періодичної дії для сушіння вологого сипкого матеріалу з механічним перемішувальним пристроєм, який ускладнює конструкцію та експлуатацію теплообмінника (пат. № RU155222U1).

Регенеративний теплообмінник періодичної дії у вигляді закритої циліндричної ємності псевдозрідженого шару з підведеними до неї магістралями гарячого й холодного теплоносіїв (заявка № WO2015/150104A1).

Незважаючи на меншу продуктивність теплообмінники періодичної (циклічної) дії характеризуються широкими технологічними можливостями та забезпечують оброблення найрізноманітніших теплоносіїв.

За характером псевдозрідження (у теплообмінниках безперервної дії) розрізняють теплообмінники безперервного та періодичного (циклічного, переривчастого) псевдозрідження.

Більшість теплообмінників належить до апаратів безперервного псевдозрідження. Проте в апараті безперервної дії й періодичного псевдозрідження зріджувальний агент подається лише за потреби, зокрема для підтримки ендотермічного або екзотермічного процесу в шарі (пат. № GB929156A, US3242974A).

У вертикальному кожухотрубному теплообміннику сипкий матеріал перебуває в міжтрубному просторі на розподільній решітці в нерухомому стані, оскільки швидкість висхідного потоку рідкого теплоносія міжтрубного простору незначна (а. с. № SU1145236A1). За потреби очищення зовнішньої поверхні теплообмінних труб від відкладень під решітку короткочасно подають газ, інертний по відношенню до зазначеного рідкого теплоносія, і забезпечують псевдозрідження сипкого матеріалу. Недолік теплообмінника – високий гідравлічний опір міжтрубного простору та знижена теплообмінна поверхня труб у робочих умовах.

За механізмом теплообміну сипкого матеріалу розрізняють апарати з конвективним, контактним, комбінованим теплообміном, а також електронагріванням.

У вертикальному апараті сипкий матеріал охолоджується за рахунок контакту його частинок зі стінками корпусу, оснащеного оболонкою охолодження, а також з циліндричним змійовиком, розташованим над газорозподільною решіткою в робочій камері апарата (пат. № CH412835A).

Над розташованим на газорозподільній решітці змійовиком змонтовано зрошувальний пристрій (а. с. № SU624101A1). Вода, що надходить зі зрошувального пристрою, змочує частинки псевдозрідженого шару, що інтенсифікує охолодження рідини, яка рухається в змійовику. Теплообмінники з пучком горизонтальних паралельних труб і розташованим над ним зрошувальним пристроєм розглянуто в а. с. № SU1291810A1 та SU1423862A1.

Вертикальний кожухотрубний теплообмінник з рухомою насадкою всередині теплообмінних труб і форсунками для розбризкування води у верхній частині кожної з них (а. с. № SU1318781A1). Знизу в теплообмінні труби подається повітря, що зріджує розміщену в них насадку, а в міжтрубному просторі рухається рідина, яка охолоджується.

Конденсатор з розташованим над повітророзподільною решіткою та шаром сипкого матеріалу пучком теплообмінних труб описано в а. с. № SU1182249A1. Над решіткою також встановлено зрошувальний пристрій для подачі в шар сипкого матеріалу охолодженої води. Під час роботи апарата повітря, що нагнітається вентилятором, зріджує шар сипкого матеріалу, в який подається вода, що сприяє охолодженню газу, який надходить у теплообмінні труби.

Теплообмінник для випарного охолодження рідини містить вертикальний циліндричний корпус з розташованим біля його внутрішньої стінки циліндричним змійовиком для охолоджуваної рідини (а. с. № SU1272086A1). Усередині змійовика на днищі теплообмінника розміщено інертні кулі. По дотичній до корпусу в його порожнину подається повітря з додаванням води. Водно-повітряна суміш рухається всередині корпусу по висхідній спіралі, сприяючи псевдозрідженню інертних куль, які турбулізують потік водно-повітряної суміші.

Загальним недоліком більшості зрошувальних теплообмінників є підвищена безповоротна витрата води, що виноситься з апарата зріджувальним повітрям.

У вертикальному кожухотрубному теплообміннику циркуляція сипкого матеріалу здійснюється безпосередньо по теплообмінних трубах, скомпонованих у дві групи з кінцевими ділянками, що виступають над відповідними трубними решітками на різну висоту (пат. № DE3939028A1, DE3939029A1 і DE4007583A1, заявка № EP0496070A1). При цьому сипкий матеріал опускається трубами, нижні кінці яких розташовано ближче до газорозподільної решітки. У пат. № DE4016043A1 і DE4111409A1 розглянуто аналогічні теплообмінники, при цьому зворотні труби згруповано по центру трубних решіток.

Теплообмінник з двома розташованими один над одним незалежними змійовиками для нагрівання псевдозрідженого сипкого матеріалу (пат. № US3814176A). При цьому змійовики можуть мати різну площу теплообмінної поверхні (пат. № DE4010695A1).

В апараті комбінованого охолодження сипкого матеріалу, що перебуває в перфорованому жолобі з одним

або двома валами, оснащеними транспортно-перемішувальними лопатками (пат. № FR2811745A1). У разі подачі холодного зріджувального агента сипкий матеріал охолоджується як при контакті з холодним зріджувальним агентом, так і з перфорованим жолобом.

Вертикальний апарат з комбінованим охолодженням сипкого матеріалу розглянуто в пат. № СН381591А. У робочій камері апарата встановлено безліч оснащених поздовжніми зовнішніми ребрами вертикальних трубок для газоподібного холодоагенту, що забезпечують ефективне охолодження сипкого матеріалу в рівномірному псевдозрідженому шарі.

Апарат псевдозрідженого шару для нагрівання сипкого електропровідного матеріалу, наприклад, вуглецю (пат. № СН381778А). В об'єм матеріалу занурено пари основних і за потреби додаткових електродів, що забезпечують ефективне нагрівання сипкого матеріалу за рахунок джоулевої теплоти, що виділяється безпосередньо в ньому в результаті пропускання крізь електроди електричного струму.

У теплообміннику для охолодження повітря між повітророзподільною решіткою й пучком горизонтальних теплообмінних труб з холодоагентом розташовано електронагрівник (пат. № JPH04194590А). У разі підвищення вологості повітря сипкість твердого матеріалу знижується, а на поверхні теплообмінних труб утворюється шар льоду. У цьому разі вмикається електронагрівник, вологість повітря в робочій камері знижується й відновлюється висока ефективність теплообміну. Аналогічний теплообмінник з керамічним нагрівником стільникової структури описано в пат. № JPH05141883А.

За кількістю псевдозріджених шарів, що беруть участь у теплообміні, розрізняють апарати з одним і двома шарами.

Більшість теплообмінників належить до апаратів з одним псевдозрідженим шаром, проте розроблено вертикальні кожухотрубні теплообмінники з двома шарами псевдозріджених матеріалів: у трубному та міжтрубному просторах (пат. № GB868368А та JPH05231784А).

Псевдозріджений сипкий матеріал проходить у горизонтальному напрямку крізь міжтрубний простір вертикального трубчастого теплообмінника (заявки № KR19990023667А та EP0898116А1). Нагрітий сипкий матеріал, стикаючись із зовнішньою поверхнею теплообмінних труб, поступово охолоджується, віддаючи теплоту рідкому теплоносію, що рухається в зазначених трубах.

Вертикальний апарат для контактного теплообміну між частинками сипкого каталізатора й теплоносієм, що рухається у вертикальних теплообмінних трубах, описано в пат. № UA76938С2 та заявці № KR20020032409А. Для забезпечення стійкого псевдозрідження теплообмінні трубки розташовано по вершинах прямокутників або трикутників із співвідношенням їх розмірів у взаємно перпендикулярних напрямках не менше, ніж півтора.

Для теплообміну між двома псевдозрідженими шарами запропоновано й вертикальні апарати типу «труба в трубі» (а. с. № SU901798А1, пат. № GB975513А), а для теплообміну між псевдозрідженим шаром і однофазним теплоносієм, що рухається в міжтрубному просторі, – у заявці № WO03/064950А1.

Апарат прямокутного поперечного перерізу для нагрівання димовими газами чистого повітря за участю двох псевдозріджених шарів у кожному з потоків (заявка № GB2077615А). Повітря, що нагрівається, з колектора подається у вертикальні трубки Фільда, в міжтрубному просторі кожної з яких організується псевдозріджений шар. При цьому всі зазначені трубки занурено в шар іншого сипкого матеріалу, зріджуваного димовими газами.

Вертикальний кожухотрубний апарат для теплообміну між двома потоками сипкого матеріалу (заявка № WO84/04584А1). Обидва потоки або перебувають у режимі псевдозрідження й рухаються прямотечею вертикально вгору, або один з потоків перебуває в режимі псевдозрідження, а другий (низхідний) – у режимі протитечійного щільного гравітаційного шару.

За типом теплообмінного апарата розрізняють кожухотрубні, змійовікові, «труба в трубі», пластинчасті, колонні, ємнісні, трубчасті та комбіновані.

У процесах теплообміну за участю сипких матеріалів широко використовуються вертикальні кожухотрубні теплообмінники з текучим теплоносієм, що піднімається теплообмінними трубами та утворює в них псевдозріджений шар сипкого матеріалу (другий текучий теплоносій рухається в міжтрубному просторі). При цьому циркуляція сипкого матеріалу в трубному просторі забезпечується як усередині корпусу апарата (пат. № CN106595356А, KR850001415А, JPS5833093А, заявки № WO01/49639А1, EP0065333А1, EP0228144А1, EP0262725А1; рис. 5), так і за допомогою винесених за його межі зворотних труб (пат. № DE3432864А1, US6350928В1, CN107764107А, CN107764108А, CN107764109А, CN107764110А, CN206037793U та CN206037794U, заявки № WO94/24508А1, WO02/25199А1, WO02/25200А1, WO02/25201А1, WO03/056266А1, WO03/069247А1 і WO2007/108671А1). При цьому для підвищення

надійності повернення до розподільної решітки сипкого матеріалу запропоновано у верхню частину центральної циркуляційної труби подавати частину потоку зріджувального агента (заявка № EP0228144A1).

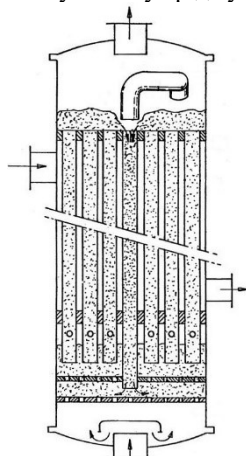


Рис. 5 – Кожухотрубний теплообмінник згідно з пат № KR850001415A та заявкою № EP0228144A1

У вертикальному кожухотрубному теплообміннику одна рідина піднімається теплообмінними трубами, утворюючи в трубному просторі псевдозріджений шар сипкого матеріалу, а друга рідина рухається протитечією в міжтрубному просторі, розділеному поперечними перегородками на кілька незалежних відсіків (пат. № GB1443298A). Подібне рішення запропоновано також у пат. №GB1506800A, US4119139A та US4220193A.

У вертикальному кожухотрубному теплообміннику псевдозріджений шар утворюється в міжтрубному просторі на декількох рівнях за допомогою перфорованих перегородок (пат. № GB1005630A).

У вертикальному кожухотрубному теплообміннику одна рідина піднімається теплообмінними трубами, утворюючи в трубному просторі псевдозріджений шар сипкого матеріалу. Друга рідина протитечією рухається в міжтрубному просторі, при цьому в разі її малої витрати (пат. № US4522252A, заявка № EP0095203A2) міжтрубний простір заповнюють твердими насадковими тілами [17, 18].

У теплообміннику псевдозрідженого шару для нагрівання гарячими газами холодоагенту, що рухається в трубах, використовуються тверді гідрофільні частинки з розвиненою поверхнею (пат. № JPS63180087A). Зазначені частинки при контакті з трубами не тільки видаляють з неї краплі води, що конденсується з газу, але й ефективно очищають труби від твердих відкладень (наприклад, утвореного льоду).

Для регулювання інтенсивності теплообміну з боку псевдозрідженого шару отвори в центральній циркуляційній трубі запропоновано оснащувати поворотними заслінками (а. с. № SU1040283A1).

Теплообмінник фонтануючого шару з центральним висхідним потоком сипкого матеріалу (а. с. № SU1002806A1). У робочій зоні апарата встановлено кільцевий інжектор для додаткової інтенсифікації гідродинаміки сипкого матеріалу. Недолік конструкції – інтенсивне абразивне зношування елементів вузла інжекції.

Вертикальний кожухотрубний теплообмінник із псевдозрідженим шаром у міжтрубному просторі (а. с. № SU500695A1). Зріджувальним агентом міжтрубного простору є рідина, теплоносієм у трубному просторі – рідина чи газ, при цьому верхню ділянку циліндричної обичайки корпусу виконано у вигляді дифузора для виділення частинок сипкого матеріалу з рідини перед її видаленням з міжтрубного простору.

Вертикальний кожухотрубний теплообмінник із псевдозрідженим шаром у трубному або міжтрубному просторі для інтенсифікації теплообміну та очищення теплообмінних поверхонь (пат. № US4300625A). Для гарантованого виділення частинок сипкого матеріалу зі зріджувального агента перед його видаленням з трубного (міжтрубного) простору верхні ділянки труб (циліндричної обичайки корпусу) виконано у вигляді дифузора.

Також у процесах теплообміну за участю сипких матеріалів використовуються змійникові теплообмінники. Один із таких теплообмінників містить кілька коаксіальних циліндричних змійовиків, занурених у псевдозріджений шар (пат. № JPS61252489A та заявці № EP0192906A1).

Теплообмінник з похилою прямокутною газорозподільною решіткою, поздовжнім рухом сипкого

матеріалу та зануреним у його шар плоским вертикальним змійовиком з протитечіним рухом води для генерування водяної пари описано в пат. №CN206056355U.

Теплообмінник з вертикальним спіральним циліндричним змійовиком для нагрівання рідини за допомогою проміжного зернистого теплоносія, що за допомогою нагрітого газу перебуває у зваженому стані (пат. № RU109838U1). Встановлена під змійовиком кільцева сталева підставка-відбійник дещо знижує абразивне зношування нижньої частини змійовика, але одночасно знижує ефективність теплообміну.

Під U-подібними відводами плоских вертикальних змійовиків встановлено захисні перегородки, які забезпечують активну участь у теплопередачі лише горизонтальних ділянок змійовиків (заявка № WO95/26483A1).

У пат. № CN662639A5 та заявці № EP0081619A1 газорозподільну решітку виконано з можливістю зміни її положення по висоті робочої камери апарата та відповідно ступеня занурення змійовиків з текучим теплоносієм у псевдозріджений шар. Таке технічне рішення забезпечує високу інтенсивність взаємодії частинок сипкого матеріалу зі змійовиками за постійної витрати зріджувального агента.

Теплообмінник для охолодження сипкого матеріалу, що перебуває в псевдозрідженому стані, нагрівається в плоскому змійовику з вертикальними прямими ділянками описано у заявці № EP0095427A1. Подібне технічне рішення також запропоновано в пат. № GB1495223A.

Аналогічний теплообмінник з багатоходовим змійовиком, що має надзвичайно розвинену теплообмінну поверхню, описано в заявці № EP0153214A1. На відміну від традиційних рідинних теплообмінників частинки псевдозрідженого шару ефективно видаляють із зовнішньої поверхні теплообмінних трубок відкладення та забруднення різної природи.

Одно- або багатоярусні плоскі змійовики розташовано над газорозподільною решіткою апарата псевдозрідженого шару (заявка № KR900007722B1). У разі багатоярусних змійовиків прямолінійні горизонтальні ділянки теплообмінних трубок змійовиків сусідніх ярусів можуть розташовуватися в коридорному або шаховому порядку. Аналогічний апарат з одним або декількома змійовиками, прямолінійні горизонтальні ділянки теплообмінних трубок яких розташовано в шаховому порядку, розглянуто в заявках № WO80/02193A1 і GB2060853A.

Теплообмінник для охолодження сипкого каталізатора за допомогою рідкого холодоагенту, що рухається в зануреному в шар псевдозрідженого матеріалу циліндричному змійовику, описано в пат. № KR910001346A та заявці № EP0403381A1.

У теплообміннику з плоскими змійовиками, розташованими у вертикальних площинах з проміжком між собою, горизонтальні трубки сусідніх витків кожного змійовика контактують одна з одною, тому кожен змійовик утворює суцільну вертикальну панель з поздовжніми гофрами (заявка № EP1804016A1). Така конструкція істотно інтенсифікує теплообмін з боку псевдозрідженого шару.

Також запропоновано теплообмінники з сусідніми горизонтальними трубками, що не контактують одна з одною (пат. № US4270599A, JPН08189787A, JPН0821694A, CN101706221A, CN105723152A, CN105745493A та CN201503230U, заявки № EP2884162A1–EP2884166A1, WO00/20818A1, WO2015/090636A1, WO2015/090665A1 та US2016/356488A1; рис. 6).

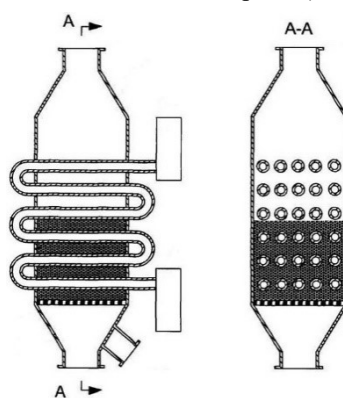


Рис. 6 – Теплообмінник згідно з пат. № CN101706221A та CN201503230U

Теплообмінник містить кільцеві колектори для циркуляції рідкого теплоносія, що сполучаються з

радіально розташованими у вертикальному циліндричному корпусі багаторівневими змійовиками (пат. № CN101922874A; рис. 7). Конструкція характеризується високою поверхнею теплообміну та ефективним очищенням теплообмінних елементів від відкладень.

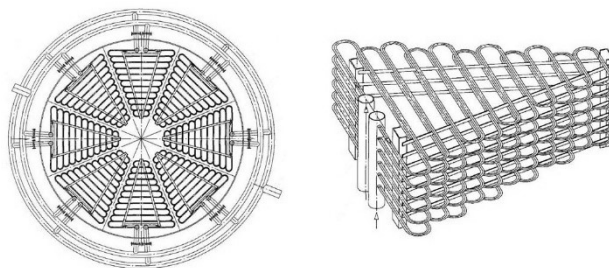


Рис. 7 – Теплообмінник (вид зверху) та його окрема секція згідно з пат. № CN101922874A

У змійовиковому багаторівневому теплообміннику газорозподільні пластини розташовано під трубами кожного рівня, тому в межах труб кожного рівня організується індивідуальний псевдозріджений шар (пат. № JPS6099991A).

Горизонтальні ділянки плоских змійовиків запропоновано екранувати захисними поворотними кожухами для регулювання ступеня контакту частинок псевдозрідженого шару із зовнішньою поверхнею теплообмінних трубок (пат. № US4335785A та US4396056A; рис. 8).

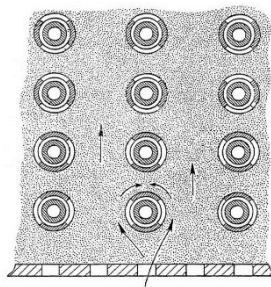


Рис. 8 – Захист теплообмінних трубок згідно з пат. № US4335785A та US4396056A

Змійовик теплообмінника містить горизонтальні U-подібні ланки, частково скручені по довжині (пат. № US4499944A, JPS594887A та JPS594888A; рис. 9). Таке конструктивне рішення підвищує ефективність теплообміну, але збільшує гідравлічний опір з боку псевдозрідженого шару. Трубу змійовика подібної форми також виконують з гвинтовими гофрами (пат. № JPS5929983A).

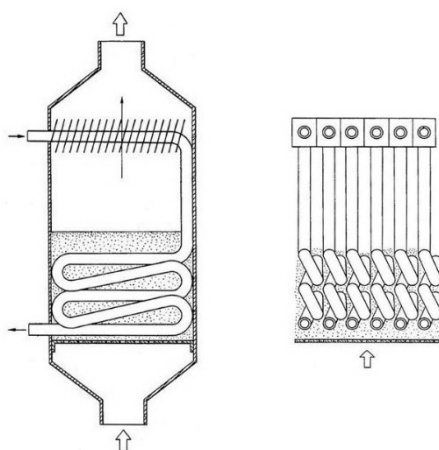


Рис. 9 – Змійовиковий теплообмінник згідно з пат. № US4499944A та JPS594887A

У циліндричному корпусі теплообмінника для підігріву води на кількох рівнях розташовано кілька змійовиків у вигляді плоских спіралей, а по центру корпусу розташовано зворотну трубу для гравітаційного руху сипкого матеріалу до газорозподільної решітки (пат. № JPH03110390A). Конструкція забезпечує ефективну циркуляцію псевдозрідженого шару між витками змійовиків.

У вертикальному апараті встановлено два коаксіальні циліндричні змійовики, що забезпечують теплообмін з сипким матеріалом, що рухається у фонтануючому шарі сипкого матеріалу (пат. № UA113073U). Подібне рішення з кількома незалежними змійовиками запропоновано в пат. № CN639477A5 і FR2454599.

У теплообміннику над змійовиком розташовано повітродувку, що забезпечує низхідний потік повітря разом із зваженими в ньому частинками твердого матеріалу (пат. № JPS6115084A). Завдяки збігу потоку повітря з напрямком сили тяжіння забезпечується висока ефективність теплообміну з рідиною, що нагрівається в змійовику.

Теплообмінник з горизонтальними теплообмінними трубами, оснащеними спільним вертикальним оребренням і зануреними в шар псевдозріджуваного сипкого матеріалу, описано в пат. № CN576116A5, GB1395900A та JPH02136695A (рис. 10). Аналогічні ребра, але індивідуально на кожній з горизонтальних ділянок змійовика, запропоновано в пат. № JP2008275290A. При цьому в пат. № JPS58142192A верхні ділянки індивідуальних ребер кожної труби відігнуто від вертикалі, що підвищує ефективність теплообміну.

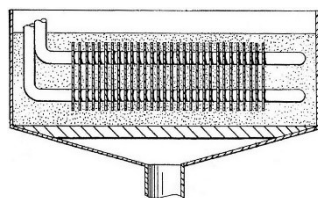


Рис. 10 – Теплообмінник згідно з пат. № CN576116A5, GB1395900A та JPH02136695A

Апарат типу «труба в трубі» для теплообміну між псевдозрідженим шаром, що рухаються прямотечею в центральній трубі, й рідиною в міжтрубному просторі (пат. № US3087253A). Для підвищення ефективності теплообміну труби можуть бути оснащено поздовжніми перегородками.

Теплообмінник пластинчастого типу з частинками киплячого шару для підігріву води описано в пат. № RU2650458C1. Перевага конструкції – можливість простого регулювання площі теплообміну зміною кількості пластин.

До ємнісних теплообмінників належить виконаний у вигляді прямокутного корита горизонтальний ємнісний апарат для теплової обробки сипучого матеріалу за допомогою текучого теплоносія, що рухається в вертикальних плоских змійовиках (пат. № CN309912A). По довжині корита встановлено вертикальні перегородки, що розділяють робочу порожнину апарата на декілька секцій, у межах кожної з яких можна забезпечувати індивідуальний тепловий режим оброблення сипкого матеріалу.

Також до ємнісних теплообмінників можна віднести апарати, розглянуті в пат. № JPS59161690A та заявці № WO2015/150104A1.

Градирно для охолодження рідини висхідним потоком газу, що забезпечує псевдозрідження сипкого матеріалу, розглянуто у заявці № WO2018/011539A1. Недолік конструкції – безповоротні втрати рідини під час скидання відпрацьованого газу атмосферу.

Теплообмінник колонного типу з ковпачковими тарілками [19] для псевдозрідження сипкого матеріалу, що послідовно переходить з тарілки на тарілку, і розміщеними над кожною тарілкою плоскими вертикальними змійовиками для нагрівання рідкого теплоносія (пат. № US2697653A). Цей апарат можна також віднести до комбінованих теплообмінників.

Окрему групу теплообмінників складають трубчасті апарати.

Теплообмінник з розташованим у псевдозрідженому шарі пучком горизонтальних труб з вертикальними ребрами. Ребра трубок сусідніх рядів частково переривають один одного (пат. № DE3345235A1, заявка № WO2013/024201A1; рис. 11).

Розроблено вертикальні кожухотрубні теплообмінники з трубками Фільда, що розташовано в псевдозрідженому шарі (пат. № US4989669A, US5940987A та KR890017517A, заявки № EP0340852A2 та EP08023846). Для інтенсифікації теплообміну псевдозрідженого шару трубки Фільда можуть мати зовнішні

поздовжні ребра (пат. № US3264751A та US3991096A).

У вертикальному циліндричному теплообміннику, поділеному по висоті на дві частини: верхню – випарник і нижню – конденсатор, змонтовано вертикальні теплові труби, нижні кінці яких занурені в псевдозріджений шар (пат. № CN106885482A та CN20673994). Переваги теплообмінника – висока надійність і простота обслуговування.

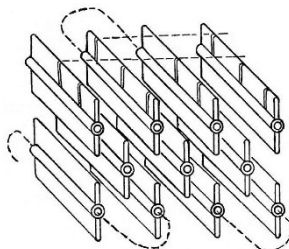


Рис. 11 – Трубчастий теплообмінник згідно з пат. № DE3345235A1 і заявкою № WO2013/024201A1

Вертикальний теплообмінник містить щільну газорозподільну решітку з паралельних труб, що утворюють колектор рідкого теплоносія (пат. № GB1391430A та US3833051A). З колектором сполучено безліч вертикальних U-подібних теплообмінних труб, що забезпечують стабільність температури псевдозрідженого шару.

У теплообміннику з газорозподільною решіткою, складеною з V-подібних перфорованих профілів, горизонтальні теплообмінні труби встановлено в западинах зазначених профілів (пат. № GB1395078A; рис. 12). Переваги конструкції – інтенсивний теплообмін, ефективне самоочищення зовнішньої поверхні теплообмінних труб та відсутність застійних зон.

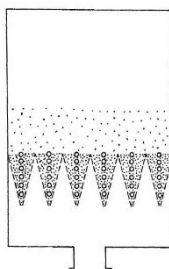


Рис. 12 – Трубчастий теплообмінник згідно з пат. № GB1395078A

У котлі з псевдозрідженим шаром (пат. № JPS59129388A) зовнішня поверхня труб має штучну шорсткість (наприклад, у вигляді привареної спіралі) для фіксації частинок псевдозрідженого шару та зниження абразивного зносу труби (завдяки заміні зовнішнього тертя внутрішнім [20]).

У вертикальному циліндричному теплообміннику встановлено центральний колектор і теплообмінні трубки, що сполучаються з ним, вигнуті у вигляді евольвенти й розташовані на декількох рівнях (пат. № GB1462804A та US4063589A). Між трубками сусідніх рівнів може бути встановлено різні напрямні елементи.

Повітря, що підлягає нагріванню сипким матеріалом, рухається в перевернутих U-подібних трубках, кінці кожної з яких сполучено з колекторами (заявка № WO90/15963A1). Частина повітря з кожної трубки крізь спеціальний ковпачок спрямовується на псевдозрідження. При цьому відпадає потреба в наявності окремої магістралі зріджувального агента. Теплообмінник з аналогічним введенням зріджувального агента описано в пат. № US5141047A.

Розміщені на кожному рівні теплообмінні труби зверху та знизу покрито дротяними сітками, розмір комірок яких перевищує розмір частинок псевдозрідженого шару (пат. № JPH0370992A). У результаті контакту частинок не тільки з трубами, а й сітками ефективність теплообміну зростає.

Теплообмінник для охолодження твердих відходів згорілого палива виконано у вигляді розміщеного в циліндричному корпусі шнека (заявка № WO90/00702A1). Порожнисте осердя шнека охолоджується водою, а корпус – водою чи потоком повітря. Нижню частину стінки корпусу виконано перфорованою для псевдозрідження транспортованих твердих відходів.

У теплообміннику для охолодження відпрацьованого мастила, забрудненого різними включеннями, на розподільній решітці знаходиться нерухомий шар великих частинок фільтрувального шару (пат.

№ JPH05133689A та JPH06281369A). Для регенерації фільтрувального шару швидкість мастила збільшують, у результаті чого забруднення відносяться з мастилом, після чого швидкість мастила знижують до робочої, фільтрувальний шар стає нерухомим, а дрібні частинки, що беруть участь у теплообміні, знову утворюють псевдозріджений шар.

Регенеративний теплообмінник типу «газ–газ» містить дві похилі газорозподільні решітки для низько- та високотемпературного потоків газу (№ JPS61180888A). Безперервна циркуляція потоку сипкого матеріалу забезпечує ефективний теплообмін (рис. 13).

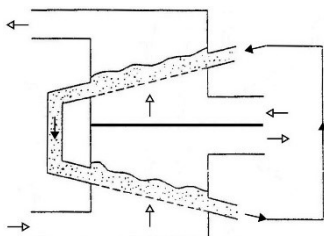


Рис. 13 – Регенеративний теплообмінник згідно з пат. № JPS61180888A

Теплообмінник для генерування пари гарячими газами з використанням псевдозрідженого шару описано в а. с. №SU1032012A1. Для регулювання інтенсивності теплообміну з боку псевдозрідженого шару центральну циркуляційну обичайку виконано телескопічною, що забезпечує можливість зміни її висоти, а отже й кратність циркуляції сипкого матеріалу в апараті.

У теплообміннику з вертикальними трубками та псевдозрідженим шаром у них другий теплоносієм (рідина) у вигляді гравітаційної плівки стікає по зовнішній поверхні (пат. № US4616698A та JPS5812988A, заявка № EP0063834A1).

Вертикальний теплообмінник із встановленими над газорозподільною решіткою на кількох рівнях теплообмінними трубками, між якими змонтовано радіальні механічні перемішувальні та розпушувальні пристрої, що активують псевдозріджений шар (пат. № CN101634530A).

Теплообмінник з розташованими в псевдозрідженому шарі парами вертикальних теплообмінних трубок, що контактують між собою по довжині й сполучаються одна з одною в їхніх нижніх частинах різними способами (пат. № DE3233959A1).

У заявках № KR20150052155A та US2014/054011A1 описано багатоступінчастий теплообмінник для охолодження одержуваного в результаті газифікації вугілля синтез-газу у псевдозрідженому шарі інертного сипкого матеріалу. Зазначений теплообмінник дає змогу ефективно охолоджувати гарячий синтез-газ з речовинами, які забруднюють та роз'їдають теплообмінні поверхні традиційних охолоджувачів.

Теплообмінник для охолодження гарячих теплоносіїв потоком зважених у воді зернистих частинок описано в заявці № KR20170014080A.

Апарат контактного теплообміну із зануреними в псевдозріджений шар теплообмінними трубками з рідиною, що нагрівається або охолоджується, розглянуто в пат. № CN472647A та GB1194484. Особливістю апарата є можливість організації в його робочій камері кількох окремих зон, що характеризуються різними тепловими режимами.

У теплообміннику над газорозподільною решіткою у вертикальній площині встановлено горизонтальні колектори з приєднаними до них вертикальними теплообмінними трубками (пат. № JPS55165493A). Зовнішню поверхню нижнього колектора покрито шаром зносостійкого матеріалу, що запобігає зношуванню теплообмінних трубок частинками псевдозрідженого шару.

За наявністю додаткових теплообмінних пристроїв у теплообміннику розрізняють апарати з додатковими пристроями і без них.

Охолоджувач високотемпературних запиленних газів із змійовиками, зануреними в киплячий шар частинок інертного матеріалу (паї № DE3023667A1 і SU1205786A3). Для попереднього охолодження газів додатковий плоский змійовик встановлено безпосередньо на газорозподільній решітці.

За наявністю рухомих конструктивних елементів розрізняють теплообмінники з нерухомими та рухомими конструктивними елементами.

Регенеративний теплообмінник безперервної дії з обертовим циліндричним блоком перфорованих секторних комірок, заповнених сипким матеріалом (пат. № GB829411A, DE3225838A1 і FR1154551A; рис. 14). До блоку під'єднано магістралі гарячого та холодного газів. Під час обертання блока сипкий матеріал

псевдозріджується, при цьому матеріал, що перебуває в певній комірці, спочатку нагрівається від потоку гарячого газу, а потім віддає теплову енергію потоку холодного газу.

Подібні апарати запропоновано також у пат. № JPS54139160A, JPS55123989A, JPS55143386A та JPS58182099A, а також заявках № GB2085566A та GB2103329A. При цьому в пат. № US4310046A та US4361182A розглянуто роторні регенеративні теплообмінники аналогічного принципу дії, але з горизонтальною віссю обертання блока секторних комірок.

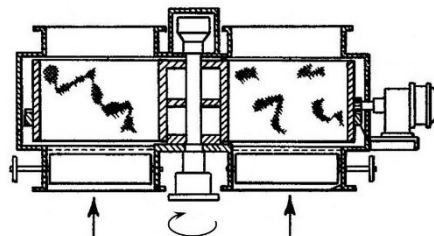


Рис. 14 – Регенеративний комірчастий теплообмінник згідно з пат. № FR1154551A

У теплообміннику у вигляді короба встановлено обертовий барабан для безперервного комбінованого (контактного й конвективного) термооброблення сипких матеріалів (пат. № GB1397184A). Барабан занурено в шар псевдозрідженого матеріалу та виконано у вигляді циліндра (у тому числі з поздовжніми гофрами) або правильної багатогранної призми як з гладкою внутрішньою поверхнею, так і з поверхнею, оснащеною насадкою різного типу (за аналогією з барабаними конвективними сушарками [21]).

Для своєчасного видалення з поверхні труб аналогічного теплообмінника крапель води, що конденсується з газу, а також твердих відкладень між трубами по їх довжині встановлюють вільнообертові крильчатки, що забезпечують рух частинок псевдозрідженого шару в напрямку всієї зовнішньої поверхні труб (пат. № JPS63183379A; рис. 15).

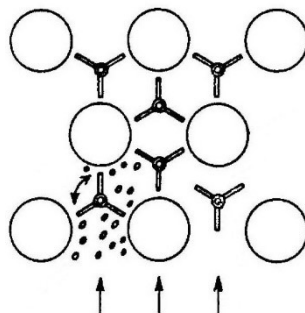


Рис. 15 – Теплообмінник згідно з пат. № JPS63183379A

Під центральною циркуляційною трубою теплообмінника (пат. № US3868993A) розташовано обертову тарілку з лопатями, яка рівномірно розподіляє зворотний потік сипкого матеріалу по поперечному перерізу апарата перед його поверненням у псевдозріджений шар.

Теплообмінник містить частково заповнену сипким матеріалом обертову трубчатку з перфорованим циліндричним корпусом, розміщену в кожусі у вигляді паралелепіпеда (пат. № JPH02133794A). Повітря, що подається в кожух, проходить крізь перфорації корпусу трубчатки, зріджує сипкий матеріал, що перебуває в міжтрубному просторі, контактує із зовнішньою поверхнею теплообмінних труб і далі крізь перфорацію корпусу трубчатки видаляється з кожуха. Недолік конструкції – складність ущільнення патрубків трубного простору обертової трубчатки.

Теплообмінник з обертовим циліндричним змійовиком, зануреним у псевдозріджений шар інертної насадки, призначено для підігріву води (а. с. № SU1323844A1). Зріджувальним агентом є повітря, а джерелом теплоти – частинки твердого палива, що спалюються в псевдозрідженому шарі інертної насадки.

Теплообмінник із зануреним у псевдозріджений шар кінцевим змійовиком, меншою основою закріпленим на обертовій газорозподільній решітці (а. с. № SU914923A1). Недоліки теплообмінника – інтенсивне абразивне зношування зовнішньої поверхні кінцевого змійовика і складність конструкції

обертової газорозподільної решітки зі змійовиком. Аналогічну, але ще складнішу у виготовленні та експлуатації конструкцію, наведено в а. с. № SU1011995A2.

За типом сипучого матеріалу киплячого шару розрізняють апарати з сипким матеріалом зі скла, кераміки, металу, оксидів, солей і полімерів.

Скляні кульки діаметром 2–3 мм як проміжний теплоносіє запропоновано в пат. № RU109838U1, а частинки піску (діоксиду кремнію) – в а. с. № SU1085517A3, пат. № RU2060433C1, заявці № EP0036177A1.

Також використовуються алюмінієві кульки діаметром 2–5 мм (пат. № UA113073U), керамічні сфери або циліндри еквівалентним діаметром 5–10 мм (пат. № GB1244048A), а також оксид алюмінію, силікат алюмінію, алюмосилікат, вогнетривкий шамот, плавиковий шпат, порошок залізо (пат. № GB975513A). Широкі можливості для виготовлення частинок сипкого матеріалу надають полімерні композиційні матеріали [22, 23].

Псевдозріджений шар, що формується між теплообмінними трубами, з частинками різних трибоелектричних типів, що у результаті тертя набувають заряди протилежних знаків (заявка № WO90/04453A1). Труби під'єднано до джерела електричного змінного поля. У разі зіткнення заряджених частинок із протилежно зарядженими трубами зазначені частинки передають теплову енергію трубам з рідиною, що проходить по них.

Частинки псевдозрідженого шару компактного теплообмінника виконано з матеріалу з певною величиною питомого електричного опору, що перешкоджає злипанню частинок між собою та забезпечує стійкий псевдозріджений шар (пат. № JPS60138393A).

Як елементи псевдозрідженого шару регенеративного теплообмінника, що акумулюють теплову енергію, може бути використано спеціальну насадку у вигляді сфер або порожнистих багатогранників, частково заповнених теплоакмулювальною рідиною (пат. № US4361182A). Також запропоновано елементи псевдозрідженого шару регенеративного теплообмінника у вигляді сідел Берля [3, 17, 18], виконаних з композиційного матеріалу (пат. № US4509584A).

Крім теплообмінників з киплячим шаром для теплового оброблення сипких матеріалів також застосовують менш ефективні апарати з рухом зазначених матеріалів у щільному шарі (а. с. № SU111520A1, SU512342A1, SU669070A1, SU775527A1 і SU1508084A1, пат. № CN1087028A, заявки № WO91/17391A1, WO01/49639A1, WO01/54806A1, WO2019/010338A1, EP0898115A1, DE102004019801A1 і DE102011078944A1 та ін.).

Висновки. Аналіз конструкцій теплообмінних апаратів з псевдозрідженим шаром сипкого матеріалу свідчить про їх значну різноманітність, проте найбільш затребуваними промисловістю залишаються найбільш прості у виготовленні та експлуатації надійні апарати з нерухомими конструктивними елементами та одним псевдозрідженим шаром.

При цьому найбільш перспективним напрямом вдосконалення теплообмінників з псевдозрідженим шаром є розроблення спеціалізованих (для оброблення певного сипкого матеріалу або текучого теплоносія) конструкцій апаратів.

Запропонована розгорнута класифікація теплообмінників із псевдозрідженим шаром може стати у пригоді розробникам нової техніки для створення високоєфективного технологічного обладнання хімічної технології. При цьому завдяки широким можливостям числового моделювання процес створення нових конструкцій може бути істотно спрощений.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати конструкції теплообмінних апаратів інших типів, а також шляхи підвищення їх ефективності.

Список використаної літератури

1. Ignatowitz E. Chemietechnik. Naan-Gruiten : Verlag Europa-Lehrmittel. 2011. 608 s.
2. Fluidization / ed. by J. F. Davidson, D. Harrison. London, New York : Academic Press. 1971. 847 p.
3. Мікульонюк І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 340 с. – URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>
4. Davidson J. F., Harrison D. Fluidized Particles. New York : Cambridge University Press, 1963. 155 p.
5. Kalman H., Rabinovich E. Analyzing threshold velocities for fluidization and pneumatic conveying // Chemical Engineering Science. 2008. Vol. 63, N 13. P. 3466–3473. DOI: 10.1016/j.ces.2008.04.004
6. Davidson J. F., Clift R., Harrison D. Fluidization. 2th ed. London : Academic Press, Inc. 1985. 733 p.
7. Кунии Д., Левеншиль О. Промышленное псевдоожигение. Москва : Химия, 1976. 448 с.

8. Formisani B., Girimonte R., Longo T. The fluidization process of binary mixtures of solids: Development of the approach based on the fluidization velocity interval // *Powder Technology*. 2008. Vol. 185, N 2. P. 97–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.10.003>
9. Shah R. K., Subbarao E. C., Mashelkar R. A. *Heat Transfer Equipment Design*. Washington D.C. : Hemisphere, 1988. 804 p.
10. Molerus O., Wirth K.-E. *Heat Transfer in Fluidized Beds*. Cham: Springer; Dordrech, 1997. 187 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5842-8>
11. Kunii D., Levenspiel O. Circulating fluidized-bed reactors / *Chemical Engineering Science*. 1997, Vol. 52, N 15. P. 2471–2482. DOI: [10.1016/s0009-2509\(97\)00066-3](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(97)00066-3)
12. Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed / E. N. Panov, A. Ya. Karvatskii, T. B. Shilovich, T. V. Lazarev, A. S. Moroz // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014. Vol. 50, N 5–6. P. 312–322. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9900-3>
13. Розвиток технології термічної обробки дисперсних матеріалів / К. П. Костогриз, Ю. І. Хвастухін, В. М. Орлик, В. В. Собченко, О. Б. Максимук // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2019. № 3. С. 47–59. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.05>
14. Mikulionok I. O. Plate-Type Gas Distribution Grids for Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57, N 1–2. P. 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00911-2>
15. Mikulionok I. O. Classification of Gas-Distribution Grids of Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57, N 3–4. P. 346–353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00927-8>
16. Mikulionok I. O. Heat Exchange Apparatuses with Fluidized Bed (Survey of Patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2021. Vol. 57, N 1–2. P. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00898-w>
17. 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](https://doi.org/10.1134/S107042721109031X)
18. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов интенсификации в них процессов теплообмена / А. С. Пушнов, И. О. Микулёнок, А. С. Севрюков, М. Г. Беренгартен // *Химическая технология*. 2014. № 4. С. 244–250.
19. Mikulionok I. O. Designs of bubble caps of the contact plates of mass-exchange columns (review of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2018. Vol. 54, N 5–6. P. 410–417. DOI: [10.1007/s10556-018-0495-y](https://doi.org/10.1007/s10556-018-0495-y)
20. Мікульонюк І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 419 с. – URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061>
21. Mikulionok I. O. Classification of convective drum dryers (survey of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 56, N 7–8. P. 588–596. DOI: [10.1007/s10556-020-00814-8](https://doi.org/10.1007/s10556-020-00814-8)
22. 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
23. Микулёнок И. О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // *Пластические массы*. 2012. № 9. С. 29–38.

Mikulionok I. O., Karvatskii A. Ya., Ivanenko O. I., Leleka S. V.

HEAT EXCHANGERS WITH FLUIDIZATION OF BULK MATERIAL (Design review)

A classification of heat exchangers with fluidization of bulk material for use in enterprises of the chemical, mining, construction, food, metallurgical and processing industries has been developed. A critical review of the most characteristic designs of heat exchangers with a fluidized bed, proposed by scientists, designers and inventors of the leading countries of the world, has been carried out. The designs of heat exchangers are analyzed depending on the method of fluidization, the role of bulk material in the heat exchange process, the nature of the heat exchange process over time, the nature of fluidization (in continuous heat exchangers), the mechanism of heat exchange of bulk material, the number of fluidized beds, the presence of additional heat exchange devices in the heat exchanger, the presence of movable structural elements, as well as the type of bulk material of the fluidized bed.

An analysis of the designs of heat exchangers with a fluidized bed indicates their considerable diversity, however, the most simple to manufacture and operate reliable devices with fixed structural elements and one fluidized bed remain in demand by the industry. The most promising direction for improving fluidized bed heat exchangers is the development of specialized (for processing bulk material or fluid coolant) designs of apparatuses.

In the future, it is planned to analyze the designs of other types of heat exchangers, as well as ways to improve their efficiency.

Keywords: *heat exchanger, bulk material, fluidized bed, classification, design.*

References

1. Ignatowitz, E. (2011). *Chemietechnik*. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten.
2. Fluidization (1971) / ed. by J. F. Davidson, D. Harrison. Academic Press, London, New York.
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. Davidson, J. F., Harrison, D. (1963). *Fluidized Particles*. Cambridge University Press, New York.
5. Kalman, H., Rabinovich, E. (2008). Analyzing threshold velocities for fluidization and pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no 13 pp. 3466–3473. doi: 10.1016/j.ces.2008.04.004
6. Davidson, J. F., Clift, R., Harrison, D. (1985). *Fluidization*. 2th ed. Academic Press, Inc., London.
7. Kunii, D., Levenshpil, O. *Promyshlennoye psevdoozhizheniye* [Industrial fluidization]. Khimiya, Moscow, URSS. (Rus.)
8. Formisani, B., Girimonte, R., Longo, T. (2008). The fluidization process of binary mixtures of solids: Development of the approach based on the fluidization velocity interval. *Powder Technology*, vol. 185, no 2, pp. 97–108. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.10.003>
9. Shah, R. K., Subbarao, E. C., Mashelkar, R. A. (1988). *Heat Transfer Equipment Design*. Hemisphere. Washington D.C.
10. Molerus, O., Wirth, K.-E. (1997). *Heat Transfer in Fluidized Beds*. Springer; Dordrech, Cham. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-5842-8>
11. Kunii, D., Levenspiel, O. (1997). Circulating fluidized-bed reactors. *Chemical Engineering Science*, vol. 52, no 15. pp. 2471–2482. doi: 10.1016/s0009-2509(97)00066-3
12. Panov, E. N., Karvatskii, A. Ya., Shilovich, T. B., Lazarev, T. V., Moroz, A. S. (2014). Mathematical Model of Solid-Fuel Gasification in a Fluidized Bed. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 50, no 5–6, pp. 312–322. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-014-9900-3>
13. Kostohryz, K. P., Hvastuhin, Yu. I., Orlyk, V. M., Sobchenko, V. V., Maksymuk, O. B. (2019). Rozvytok tekhnologii termichnoi obrobky dyspersnykh materialiv [Development of Thermal Technology for Dispersed Materials Processing]. *Energotekhnologii i resursoberezhenniye*, no 3, pp. 47–59. doi: <https://doi.org/10.33070/etars.3.2019.05> (Ukr.)
14. Mikulionok, I. O. (2021). Plate-Type Gas Distribution Grids for Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no 1–2, pp. 168–175. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00911-2>
15. Mikulionok, I. O. (2021). Classification of Gas-Distribution Grids of Fluidized Bed Apparatuses (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no 3–4, pp. 346–353. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00927-8>
16. Mikulionok, I. O. (2021). Heat Exchange Apparatuses with Fluidized Bed (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 57, no 1–2, pp. 79–86. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00898-w>
17. 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
18. Pushnov, A. S., Mikulionok, I. O., Sevryukov, A. S., Berengarten, M. G. (2014). Klassifikatsiya konstruktsiy nasadok kolonnykh apparatov i metodov intensivatsii v nikh protsessov teplomassoobmena [Classification of designs of packings of column apparatuses and methods of intensification of heat and mass transfer processes in them]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, no 4, pp. 244–250.
19. Mikulionok, I. O. (2018). Designs of bubble caps of the contact plates of mass-exchange columns (review of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 54, no 5–6, pp. 410–417. doi: 10.1007/s10556-018-0495-y
20. Mikulionok, I. O. (2012). Vygotovlennia, montazh ta ekspluatatsiia obladnannia khimichnykh vyrobnystv [Manufacture, installation and operation of chemical equipment]. NYUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061>
21. Mikulionok, I. O. (2020). Classification of convective drum dryers (survey of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 56, no 7–8, pp. 588–596. doi: 10.1007/s10556-020-00814-8
22. 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
23. 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.