

УДК [62-225+62-408.8]:536.24-043.78(048.83)

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

## **ЗОВНІШНІ ЗНІМНІ ЕЛЕМЕНТИ ТРУБ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ (Огляд конструкцій)**

*Предмет дослідження – зовнішні знімні засоби теплообмінних труб для інтенсифікації процесу теплообміну в технологічному обладнанні та трубопроводах різних галузей економіки.*

*Дослідження стану питання й тенденцій розвитку конструктивно-технологічного оформлення зовнішніх знімних елементів труб для інтенсифікації теплообміну ґрунтуються на критичному аналізі науково-технічних джерел інформації й передусім – патентної інформації провідних країн світу, оскільки саме в патентній документації наводяться відомості про інноваційні розробки у відповідній галузі техніки й технології.*

*За допомогою методів аналізу й синтезу систематизовано зовнішні знімні елементи труб для інтенсифікації теплообміну обладнання та трубопроводів хімічної і споріднених галузей технології. Для кожного виду елементів розроблено ґрунтовну класифікацію, на основі якої докладно розглянуто найбільш цікаві конструкції, запропоновані науковцями, конструкторами й винахідниками провідних країн світу. Надано критичну оцінку більшості наведених конструкцій, обговорено їхні переваги й недоліки. Перевагу надано джерелам інформації кінця другого й початку третього тисячоліття.*

*Конструкції зазначених елементів проаналізовано залежно від режиму руху текучого теплоносія, наявності зміни агрегатного стану теплоносія, характеру дії на потік у часі, характеру зміни гідродинаміки потоку, ступеня зміни гідродинаміки потоку, відносної довжини, орієнтації труб у просторі, ступеня кривизни каналу, матеріалу, ступеня складання, ступеня рухливості складових частин, кількості охоплених елементами труб, а також типу заготовки. Показано, що, незважаючи на значну різноманітність конструкцій зовнішніх знімних елементів труб для інтенсифікації теплообміну, найбільш затребуваними промисловістю залишаються апробовані у виготовленні та експлуатації металеві пластинчасті елементи. Проте завдяки успіхам матеріалознавства та комп'ютерного моделювання пошуку нових конструкцій елементів труб для інтенсифікації теплообміну тривають.*

**Ключові слова:** теплообмінні труби, зовнішня поверхня, інтенсифікація теплообміну, класифікація, конструкція.

**DOI:** 10.20535/2617-9741.3.2023.288246

\*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 17 October 2022; Accepted 09 November 2022

**Постановка проблеми.** Теплообмінні труби, оснащені засобами для інтенсифікації теплообміну з боку зовнішньої поверхні, широко поширені в техніці [1–8]. Такі труби застосовують насамперед для компенсації меншого, порівняно в каналах труб [9–12], коефіцієнта тепловіддачі, наприклад, у повітряних теплообмінниках і холодильниках. Їх використовують для підвищення ефективності теплообміну в хімічній, харчовій, мікробіологічній, нафтохімічній, нафтопереробній, теплоенергетичній та інших галузях промисловості.

У багатьох випадках використовують труби з різноманітними типами поздовжніх і поперечних ребер, які отримують литтям, приварюванням, припаюванням, їхньою щільною посадкою на тіло труби або пластичним деформуванням її стінок (видавлюванням, накатуванням) [13–15]. З точки зору технології часто раціональнішим є використання пристроїв, що встановлюються на зовнішній поверхні традиційних гладкостінних труб. У разі встановлення знімних пристроїв їх можна легко демонтувати, що значно полегшує експлуатацію відповідних теплообмінних пристроїв. Однак знімні пристрої, які зазвичай виготовляються з алюмінію та його сплавів, використовують до температур не вище 100 °С, оскільки за більш високих температур їх фіксація на трубах послаблюється внаслідок різного термічного розширення елементів конструкцій [14, 15].

Зазначене питання вже було порушене авторами [16], проте далі наведено більш ґрунтовний аналіз

розроблених конструкцій зовнішніх знімних елементів труб для інтенсифікації теплообміну.

**Метою статті** є розроблення розгорнутої класифікації зовнішніх знімних елементів труб для інтенсифікації теплообміну, використовуваних у конструкціях технологічного обладнання, а також трубопроводах хімічної, нафтохімічної, нафтопереробної, харчової та енергетичної галузей промисловості.

**Аналіз попередніх досліджень.** Аналіз конструктивного виконання засобів для інтенсифікації теплообміну із зовнішнього боку труб дає змогу запропонувати їхню класифікацію, наведену на рис. 1.

*За режимом руху текучого теплоносія* розрізняють засоби до роботи за умов вільної й вимушеної конвекції.

Часто для цього використовують різного типу ребра, які досить ефективні як в умовах вільної, так і вимушеної конвекції. Проте розроблено пристрої, призначені переважно для роботи в умовах певного режиму руху теплоносія.

Наприклад, у пат. № UA42828U запропоновано трубу з нанесеними на її зовнішній поверхні кільцевими та поздовжніми канавками, що утворюють своєрідну «сітку». Зазначені канавки сприяють вихороутворенню та інтенсифікації теплообміну як за поздовжнього, так і поперечного обтікання труби теплоносієм.

Подібну вертикальну круглу або еліптичну трубу з гвинтовими канавками описано в пат. № GB2037974A. У пат. № CN2630783Y запропоновано круглу трубу з утвореними на зовнішній поверхні западинами, розміщеними по сторонах послідовно розташованих квадратів, причому одну з діагоналей кожного квадрата розташовано вздовж поздовжньої осі труби.

*За наявністю зміни агрегатного стану теплоносія* розрізняють засоби для роботи за умов незмінного агрегатного стану теплоносія (конвективного теплообміну), а також в умовах кипіння чи конденсації.

У заявці № DE102009053843A1 розглянуто горизонтальну трубу з поперечними пластинчастими ребрами, простір між якими заповнено пористим матеріалом (зокрема сплутаним металевим дротом). Зазначену трубу призначено для випаровування рідкого теплоносія, що перебуває з боку зовнішньої поверхні.

Також для кипіння з боку зовнішньої поверхні труби призначено конструкцію, описану в пат. № JP2012002374A. Незважаючи на досить складну структуру поверхневого шару стінки труби, що має розгалужену сукупність пазів, які розширюються до центру труби, за твердженням розробників така труба є технологічною у виготовленні. Також цю трубу може бути оснащено ребрами трикутного поперечного перерізу.

Аналогічну поверхню труби для кипіння описано й в пат. № JP2015500456A.

У пат. № CN105486144A розглянуто трубу для випаровування рідкого теплоносія, зовнішню поверхню якої оснащено ребрами з розвиненою поверхнею теплообміну (рис. 2).

Призначену для конденсації на зовнішній поверхні парів теплоносія вертикальну трубу оснащено кільцевими жолобами або спіральними ребрами з вирізом по вертикалі (пат. № UA25419U). Утворюваний конденсат по жолобах або ребрах спрямовується в бік їхніх вирізів, утворюючи єдиний потік конденсату. Недоліком пристрою є низька ефективність за значних витрат теплоносія, що може призвести до «захлинування» жолобів або ребер і зниження ефективності процесу конденсації.

У пат. № UA97468U описано вертикальну трубу для конденсації на її зовнішній поверхні парів теплоносія. Зовні трубу покрито сіткою з ліофобного (зокрема, гідрофобного) по відношенню до теплоносія матеріалу, що сприяє своєчасному видаленню утворюваного конденсату із зовнішньої поверхні труби. Сітку може бути виконано з квадратними, прямокутними або ромбічними комірками.

У пат. № UA116108U розглянуто горизонтальну трубу краплеподібної форми (у вертикальному поперечному перерізі) для покращення стікання конденсату по її зовнішній поверхні.

*За характером дії на потік у часі* розрізняють засоби одноразового й безперервного впливу.

До пристроїв одноразової дії можна віднести конструктивні елементи, довжина яких набагато менша за довжину труби й сумірна з її діаметром, а до пристроїв безперервної дії – елементи, що встановлюються по всій довжині труби або більшій її частині. При цьому серед пристроїв безперервної дії можна виділити пристрої рівномірного (плавного) впливу на потік, наприклад, гладкі поздовжні ребра, а також пристрої пульсуючої (ступінчастої) дії, наприклад, поздовжні ребра з поперечними гофрами або пелюстками.

У пат. № UA80967U запропоновано пристрій у вигляді коротких пластинок, закріплених на трубі під прямим кутом до зовнішньої поверхні й розташованих уздовж поздовжньої осі труби або під гострим кутом до неї.

У патентах № CN105758245A і CN205580277U описано круглу трубу з короткими клиноподібними радіальними пластинками, розташованими вздовж осі труби та згрупованими по її довжині в окремі секції.

У пат. № UA91782U розглянуто круглу трубу з виконаними на зовнішній поверхні радіальними голками, в пат. № UA107890U – пірамідами, а в пат. № UA115348U – круглими перфорованими дисками.

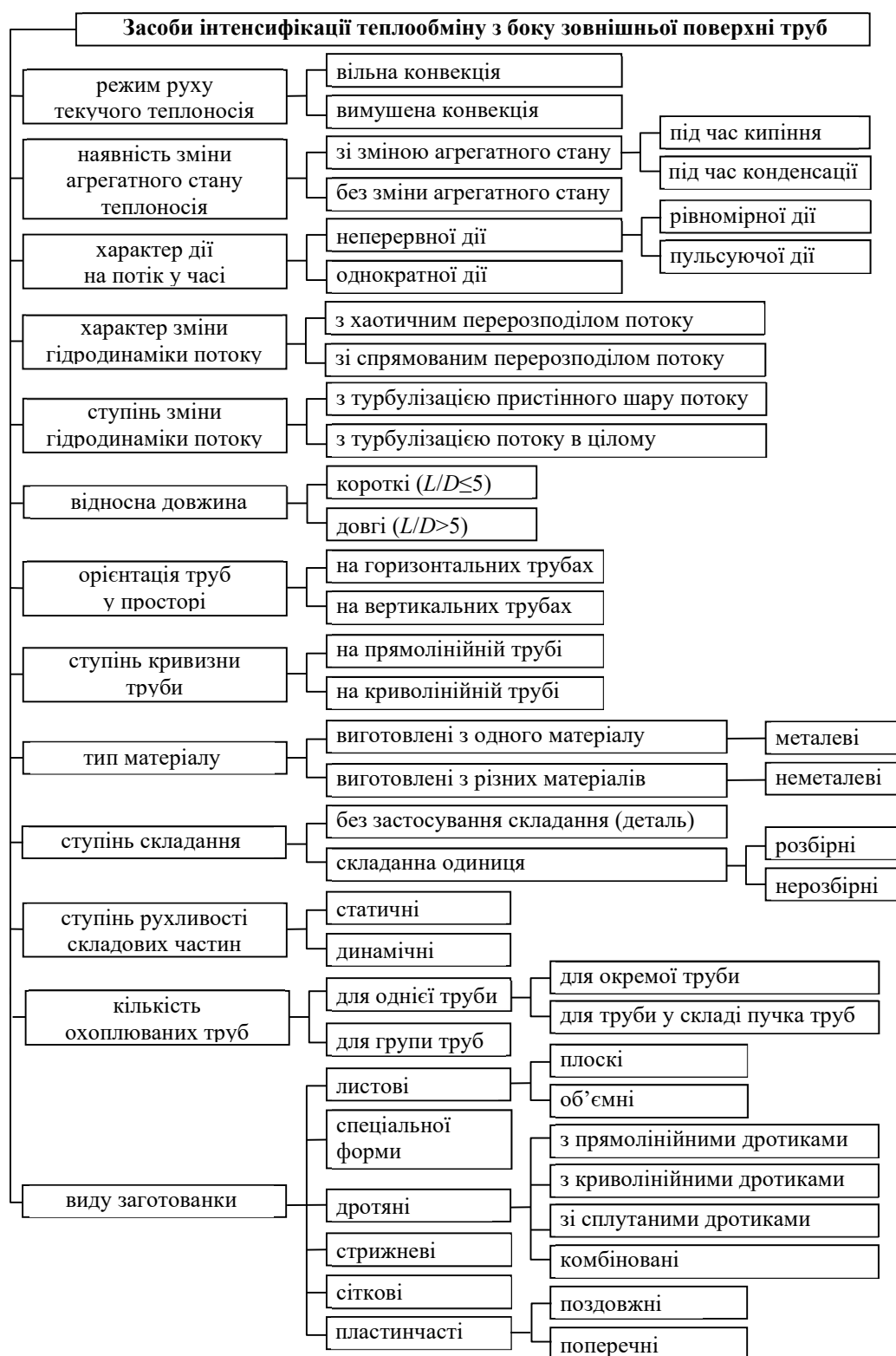
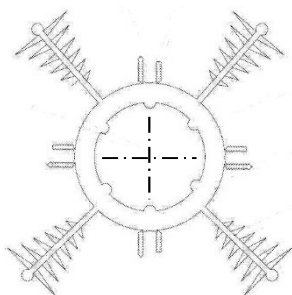
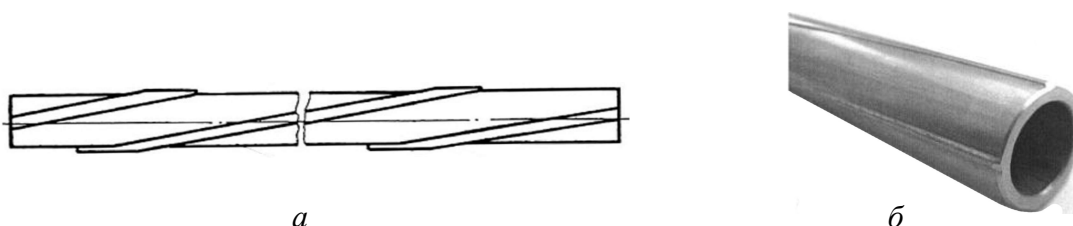


Рис. 1 – Класифікація засобів інтенсифікації теплообміну з боку зовнішньої поверхні труб



**Рис. 2 – Теплообмінна труба згідно з пат. № CN105486144A**

У пат. № UA105614C2 і UA86482U описано круглу трубу з виконаними на її зовнішній поверхні за одне ціле з її стінками безперервними низькими ребрами, які розташовано під невеликим кутом до поздовжньої осі труби і в поперечному перерізі мають трапецієдальну форму із закругленими кутами (рис. 3).



**Рис. 3 – Схема (а) і фотознімок (б) теплообмінної труби згідно з пат. № UA86482U та UA105614C2**

У пат. № KR20090016623A аналогічні низькі ребра виконано привареними по їх довжині, в пат. № JP213113475A прямолінійні низькі ребра виконано за одне ціле з тілом труби, а в пат. № CN204854386U запропоновано трубу з низькими поздовжніми гвинтовими ребрами, вершини яких виконано зубчастими.

У пат. № CN206420362U розглянуто круглу трубу із встановленою на її зовнішній поверхні спіральною стрічкою.

У пат. № RU80967U описано круглу трубу з однією або декількома гвинтовими канавками на її зовнішній поверхні, в яких зафіксовано дріт, що утворює своєрідні ребра. Недоліком цієї труби є зниження її міцності, зумовлене наявністю вказаних канавок.

У пат. № GB2201764A розглянуто трубу з навитим на ній багатожильним дротом, що також утворює своєрідні ребра. Переплетені між собою жили зазначеного дроту інтенсивно руйнують прилеглий ламінарний шар потоку теплоносія, що набігає на трубу.

У пат. № KR20140085109A розглянуто аналогічну трубу, проте пази на її зовнішній поверхні утворено пластичним деформуванням металу, що майже не знижує механічну міцність труби.

У пат. № RU2591376C1 описано круглу трубу з виконаними на її зовнішній поверхні западинами, кожна з яких має форму дуги кола й розташована в діаметральному перерізі труби. Зазначені западини розташовано в коридорному порядку зі зміщенням на півкроку розташування западин у сусідніх рядах.

У заявці № EP3276290A1 описано трубу з послідовними ділянками у вигляді еліпсів, при цьому сусідні еліптичні ділянки розташовано під прямим кутом.

У пат. № UA52081U описано круглу трубу з привареними на її зовнішній поверхні вигнутими ребрами, що утворюють своєрідну крильчатку. Недоліком цього пристрою є його підвищена матеріаломісткість. У пат. № CN364566A розглянуто круглу трубу з розташованими декількома рядами лопатками, при цьому в сусідніх рядах лопатки повернуто під протилежними кутами. А в пат. № CN428958A описано трубу з круглим каналом і шестигранною зовнішньою поверхнею з аналогічними лопатками (рис. 4).

У пат. № UA52798U описано круглу трубу з одними з найпоширеніших періодично розташованих поперечних ребер – колових кілець.

В а. с. № SU1259967A3 аналогічні ребра мають радіальні гофри, розмір яких зменшується від периферії до центру ребер.

Аналогічну конструкцію, але складнішої конфігурації, описано також у пат. № KR20090019457A (рис. 5).

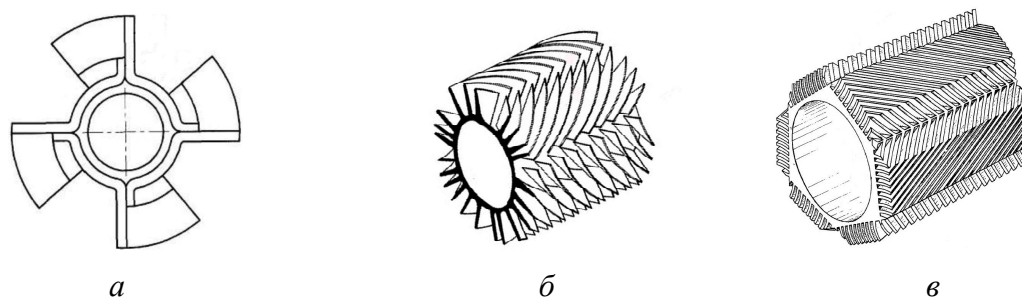


Рис. 4 – Теплообмінна труба згідно з пат. № UA52081U (а), СН364566А (б) і СН428958А (в)

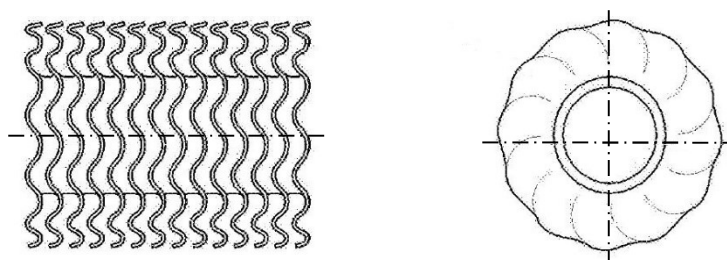


Рис. 5 – Теплообмінна труба згідно з пат. № KR20090019457A

У пат. № UA67459U описано круглу горизонтальну трубу з періодично змонтованими у верхній частині її зовнішньої поверхні лопатками, що спрямовують потік теплоносія до поверхні труби. Недоліком конструкції є великий крок розташування труб за умови їх паралельної установки, що знижує питому поверхню відповідного теплообмінного пристрою.

У пат. № RU2105260C1 описано круглу горизонтальну трубу з виконаними на її зовнішній поверхні лунками та відповідними виступами сферичної форми на внутрішній поверхні. Зазначені лунки розташовуються в порядку, що поєднує шахове й паралельне розташування, забезпечуючи переваги розташування обох типів. А в пат. № CN205403565U подібні лунки згруповано поздовжніми рядами, розташованими по пологій гвинтовій лінії.

Аналогічну трубу описано й у пат. № RU2231007C2 з єдиною відмінністю: зазначені лунки розташовуються в шаховому порядку з певним кроком у кільцевому та осьовому напрямках. А в пат. № CN106062454A розташовані у шаховому порядку лунки сформовано тільки на зовнішній поверхні труби.

Оригінальний пристрій описано в пат. № RU2135921C1, у якому дискретні виступи на зовнішній поверхні труби фіксуються за допомогою сил магнітного поля. Недоліком цього пристрою є можливість використання елементів труби тільки з магнітних матеріалів.

За характером зміни гідродинаміки потоку можна виділити пристрої з хаотичним і спрямованим рухом потоку між його елементами.

До пристроїв з хаотичним рухом теплоносія можна віднести різні конструкції з дротяними турбулізаторами (наприклад, згідно з пат. № CN204739950U та FR1088757A), а до пристроїв зі спрямованим рухом – конструкції з різними напрямними елементами.

За ступенем зміни гідродинаміки потоку розрізняють конструкції з турбулізацією пристінного шару потоку теплоносія, а також потоку в цілому.

До першого типу можна віднести вже розглянуті пристрої згідно з пат. № RU80967U, GB2201764A та KR20140085109A, а до другого – пристрої з турбулізуючими елементами, хоча б два розміри яких можна порівняти з діаметром труби.

За відносною довжиною засобу інтенсифікації бувають короткі й довгі пристрої (за умови відношення довжини елемента до діаметра труби до п'яти включно і більше п'яти, відповідно).

За орієнтацією труб у просторі розрізняють пристрої інтенсифікації теплообміну на горизонтальних та вертикальних трубах.

Якщо для подібних пристроїв, що встановлюються в напірних трубчастих каналах, орієнтація труби в просторі майже не має значення [9, 17, 18], то для пристроїв на зовнішній поверхні труб конструкція цих пристроїв має визначальне значення (особливо в разі зміни агрегатного стану теплоносія).

За ступенем кривизни каналу розрізняють пристрої, що встановлюються на прямолінійних і криволінійних трубах (у вигляді плоских або просторових спіралей або вигнутих відводів прямих труб).

За матеріалом розрізняють пристрої, виготовлені з металів та їхніх сплавів, а також з неметалевих матеріалів.

Так, разом з традиційними металевими пристроями останнім часом набувають поширення пристрої, виготовлені з полімерів і пластмас. Такі пристрої вирізняються легкістю й хімічною стійкістю. Завдяки високим технологічним властивостям полімерних матеріалів з них можна виготовляти пристрої або їхні елементи найрізноманітніших форми й розмірів, наприклад литтям під тиском чи екструзією [19–27]. При цьому виникає можливість введення у відповідний матеріал теплопровідного наповнювача, зокрема металевого або графітового порошку [28–31].

Наприклад, у пат. № RU2044984C1 описано трубу з термопластичного матеріалу з розташованими в її стінці суцільними стрижнями, виконаними у вигляді пучка з'єднаних між собою за допомогою термопластичного зв'язуючого паралельних вуглецевих волокон. Торці зазначених стрижнів розташовано врівень із зовнішньою та внутрішньою поверхнями труби. При цьому теплопередача між теплоносіями всередині та зовні труби здійснюється переважно теплопровідністю крізь зазначені композиційні стрижні.

У пат. № RU2044986C1 описано аналогічну трубу, при цьому теплопередача між теплоносіями по обидва боки труби здійснюється не крізь стрижні, а крізь теплопровідні елементи сітки, що армує виготовлену з термопластичного матеріалу стінку труби.

Також розроблено пристрої, виготовлені з кількох матеріалів. При цьому вони можуть бути виконані у вигляді складаних одиниць або у вигляді окремої деталі з покриттям з іншого матеріалу, наприклад, з вуглецевої сталі з антикорозійним покриттям. Наприклад, у пат. № GB2013721A описано кип'ятильну трубу з ребрами, які мають покриття з дрібнодисперсного графіту (з розміром частинок переважно до 200 мєш, тобто менше 0,127 мм), що забезпечує розвинену поверхню теплообміну й відповідно виникнення численних центрів пароутворення.

Труби з покриттям, що містить вуглецеві нанотрубки з різним орієнтуванням у просторі, описано в заявці № US2017/211899A1. А в пат. № CN204705254U описано трубу з покриттям у вигляді металеві пни.

За ступенем складання розрізняють пристрої як деталей і складаних одиниць. При цьому останні бувають розбірні й нерозбірні (рознімні й нерознімні).

Круглу нерозбірну трубу з поздовжніми прямими ребрами, виконаними за одне з тілом труби, запропоновано в пат. № KR101759835B1. Подібну трубу з поздовжніми прямими та гвинтоподібними ребрами розглянуто також у пат. № CN206019436U. Аналогічну трубу описано в пат. № KR200427060Y1, при цьому бічні поверхні її ребер виконано хвилеподібними.

У пат. № DE202009008498U1 розглянуто нерозбірну конструкцію труби з поздовжніми ребрами, виготовленими у вигляді окремих деталей. Зазначені ребра за допомогою пластичної деформації зафіксовано в пазах, виконаних на зовнішній поверхні пазів труби.

Трубу нерозбірної конструкції описано в пат. № KR20100131260A. Поздовжні прямолінійні ребра даної труби мають L-, T або П-подібну форму і приварені до труби своєю основою. Також трубу із привареними до неї своєю основою або ніжками П-подібними стрижневими ребрами наведено в пат. № CN107167016A.

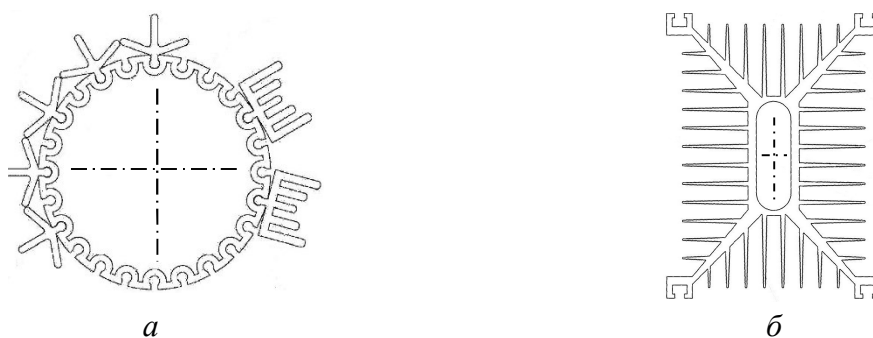
Схожу трубу розглянуто й в пат. № KR20140050227A.

У пат. № CN204963636U запропоновано трубу з розвиненою випромінювальною поверхнею, виконану у вигляді окремої деталі (рис. 6).

За ступенем рухливості складових частин засоби інтенсифікації теплообміну можна поділити на статичні й динамічні.

Статичні пристрої не мають рухомих робочих поверхонь, а турбулізувальний ефект забезпечується насамперед за рахунок багаторазового розподілу потоку теплоносія на окремі струмені з подальшим злиттям (як з перебудовою, так і без перебудови їх між собою) [9, 17, 18]. Основна перевага статичних пристроїв – відсутність рухомих елементів і досить проста експлуатація.

Найчастіше більш ефективними (але й більш складнішими) є динамічні засоби, виконувані з одним чи кількома рухливими елементами. При цьому динамічні засоби з боку зовнішньої поверхні труби використовуються набагато рідше, ніж у каналах труб [9].



**Рис. 6 – Теплообмінна труба згідно з пат. № KR20140050227A (а) і CN204963636U (б)**

У пат. № UA43707U з боку зовнішньої поверхні труби запропоновано встановлювати крильчатку, закріплену на довгій втулці, що контактує з трубою. Під дією рухомого теплоносія крильчатка обертається, турбулізуючи його потік. На думку авторів розробки, це сприяє інтенсифікації теплообміну. Однак досягти надійного обертання втулки та одночасного її контакту з трубою по всій довжині втулки надзвичайно складно. Це не тільки збільшує вартість труби, а й знижує ефективність теплообміну.

У пат. № UA49900U та UA50070U розглянуто динамічні пристрої, які виконані у вигляді гвинтової пружини, що охоплює трубу із зазором та закріплені на ній одним зі своїх кінців. Під впливом потоку теплоносія пружина періодично стискається й розтягується, турбулізуючи потік теплоносія.

У пат. № UA75423C2 розглянуто пристрій у вигляді сукупності втулок, оснащених лопатками, встановлених на трубі та з'єднаних між собою гвинтовою пружиною, що охоплює трубу. Під час набігання на трубу поперечного потоку теплоносія втулки з пружиною починають обертатися, інтенсивно руйнуючи пристінний примежовий шар теплоносія. Недоліком пристрою є його низька надійність, а також необхідність встановлення паралельно розташованих труб з великим кроком для забезпечення можливості вільного обертання втулок з лопатками.

У пат. № UA103755U описано пристрій у вигляді пружини із закріпленими на ній поперечними лопатками. При цьому пружину своїми кінцями зафіксовано на трубі. Під час набігання на трубу поздовжнього потоку теплоносія він діє на лопатки та змушує вібрувати пружину в осьовому напрямку.

Перевагою конструкцій з вільною пружиною є не тільки активний вплив на оброблюваний потік, але й очищення стінок каналу від можливих відкладень. Основний недолік таких конструкцій – додаткові витрати енергії потоку на рух рухливих елементів.

За кількістю охоплюваних труб розрізняють пристрої для однієї труби і для групи труб. У свою чергу пристрої для однієї труби можна поділити на пристрої для окремої труби та труби у складі пучка труб.

Усі раніше розглянуті пристрої для інтенсифікації теплообміну стосувалися переважно окремих труб.

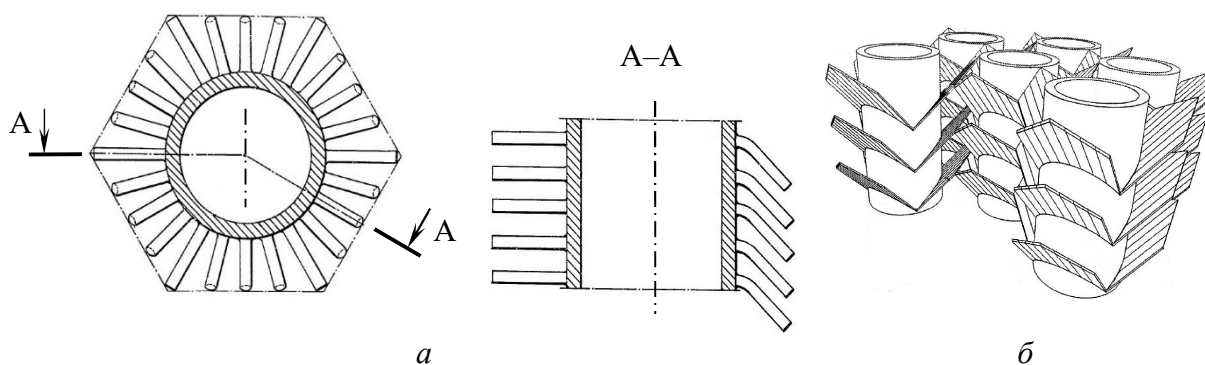
Подібні пристрої однієї труби у складі пучка труб можуть дещо відрізнитися. Це спричинено насамперед необхідністю попередження негативного впливу відповідного пристрою певної труби на сусідні труби, а також потребою забезпечення ефективної гідродинаміки теплоносія, що омиває пучок труб.

Як приклад таких пристроїв можна навести ребра окремих труб у трубному пучку кожухотрубного теплообмінника згідно з пат. № GB1326978A. Оребрення труб, розташованих у кожусі апарата по вершинах правильних трикутників, виконано у вигляді радіальних стрижнів. При цьому для унеможливлення взаємного контакту стрижнів сусідніх труб більшість зі стрижнів вигнуто з утворенням правильних шестикутників у діаметральному перерізі труби (рис. 7, а).

Пристрій аналогічного призначення наведено у заявці № US2015/083382A1. Відповідне оребрення кожної труби виконано у вигляді штампованих багатокутних листів з відігнутими зовнішніми ділянками для запобігання контакту ребер сусідніх труб між собою (рис. 7, б).

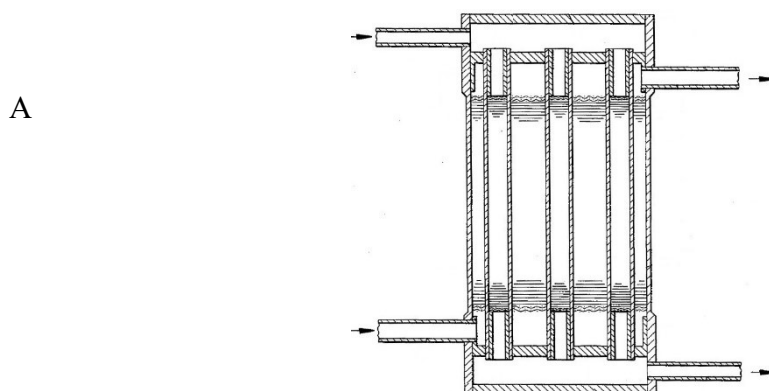
У заявці № US2016/341481A1 наведено конструкцію теплообмінника з пучком паралельних горизонтальних труб, на кожній з яких закріплено по два паралельні поздовжні ребра, розташованих під деяким кутом до радіуса. За певного взаємного орієнтування ребер сусідніх труб забезпечується спрямований рух поперечного потоку теплоносія.

Ще одне аналогічне рішення описано в пат. № KR100916997B1. У разі розміщення пропонованих труб з похилими низькими ребрами в пучку та контакту сусідніх труб одна з одною відповідним вибором напрямку навивок ребер досягається ефективний теплообмін теплоносія з трубним пучком.



**Рис. 7 – Теплообмінна труба згідно з пат. № GB1326978A (a) та заявкою № US2015/083382A1 (б)**

Групове оребрення пучка вертикальних паралельних труб запропоновано у вертикальному кожухотрубному теплообміннику (пат. № US4815533A; рис. 8).



**Рис. 8 – Групове оребрення трубного пучка кожухотрубного теплообмінника (пат. № US4815533A)**

І, нарешті, групове оребрення часто використовується для пучка паралельних труб повітряних теплообмінників (заявки № US2014/262188A1, US2015/000880A1, US2015/075760A1, US2015/211807A1, US2015/219405A1, US2015/308756A1, US2016/209125A1, US2017/198984A1 и US2018/003450A1).

Також до цього типу пристроїв можна віднести технічне рішення згідно з пат. № GB1413913A, в якому описано кожухотрубний теплообмінник, міжтрубний простір якого заповнено металевими тілами (кулями). Зазначені кулі турбулізують потік теплоносія та сприяють теплообміну між ним та трубами за рахунок теплопровідності.

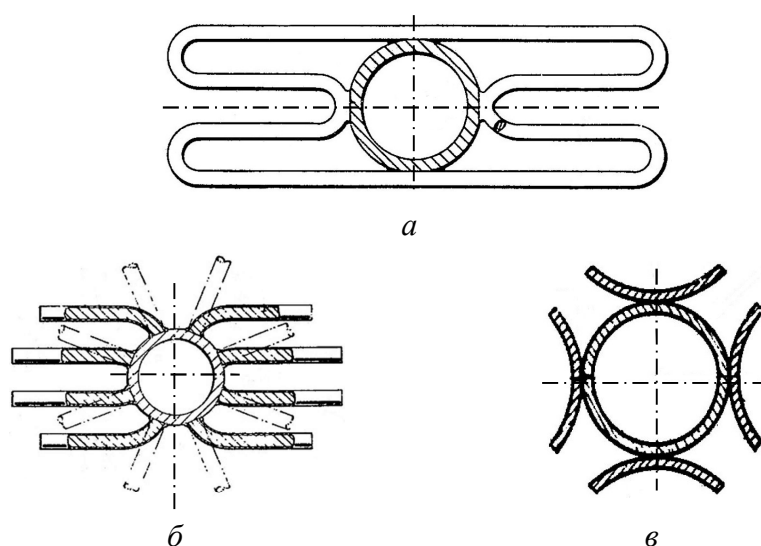
За видом заготовки розрізняють конструкції, виготовлені на основі листового, пластинчастого, стрижневого, дротяного або сіткового матеріалу, а також матеріалу спеціальної форми (зазвичай об'ємної, отримуваної литтям або обробленням на металорізальних верстатах).

Найбільш технологічними є «дротяні» та «листові» пристрої, основним елементом яких є сукупність прямих, вигнутих чи перекручених між собою дротів, а також елементів листових заготовок.

Наприклад, у пат. № UA27809U описано пристрій, що представляє собою навитий на круглу трубу дріт з кроком, що становить від 7 до 10 діаметрів дроту (при цьому обґрунтування величини обраного кроку в описі патенту не наведено).

У пат. № CN300388A розглянуто круглу трубу з горизонтальними поперечними Н-подібними ребрами, кожне з яких контактує із зовнішньою поверхнею труби в чотирьох точках. У пат. № CN313660A описано круглу горизонтальну трубу з поздовжніми радіальними або вертикальними ребрами (у пат. № CN106705731A описано трубу з аналогічно розташованими стрижневими елементами), а в пат. № CN354526A – з чотирма поздовжніми увігнутими ребрами (рис. 9).

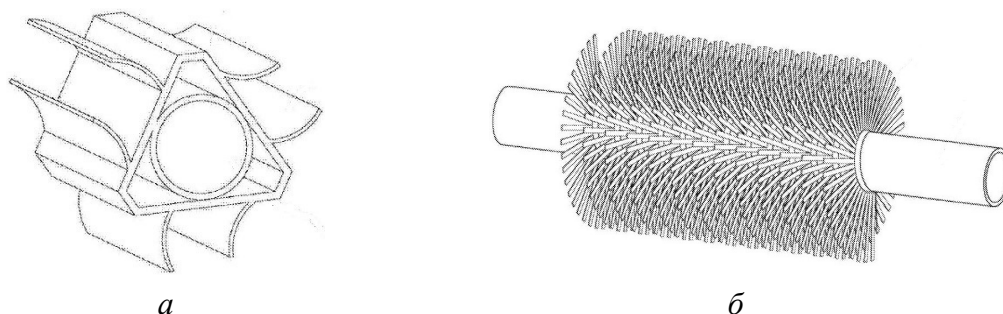




**Рис. 9 – Теплообмінні труби згідно з пат. № СН300388А (а), СН313660А (б) і СН354526А (в)**

За аналогією з останньою конструкцією також розроблено квадратну трубу (пат. № CN105806120A). Ще більш складне оребрення запропоновано в пат. № CN105806123A (рис. 10, а).

У заявці № DE102008030423A1 розглянуто круглу трубу з радіально закріпленими на зовнішній поверхні циліндричними стрижнями, розташованими в коридорному порядку або вздовж гвинтової лінії. Трубу з циліндричними радіальними стрижнями, розташованими вздовж гвинтової лінії, описано й в пат. № CN204739950U (рис. 10, б).



**Рис. 10 – Теплообмінні труби згідно з пат. № CN105806123A (а) і CN204739950U (б)**

Аналогічну трубу із короткими стрижнями (штифтами) розглянуто в пат. № KR20140127861A та заявці № WO2013/121965. А в пат. № CN205300343U для збільшення поверхні теплообміну кожен стрижень виконано нарізним.

У патентах № СН375031А та FR1161254А запропоновано кілька конструкцій круглих труб з поздовжнім та спіральним оребренням, виконаним у вигляді гвинтової пружини або пластини. При цьому крок та/або висота ребра плавно або стрибкоподібно змінюється вздовж труби, що має компенсувати зміну температури теплоносія під час його руху вздовж труби.

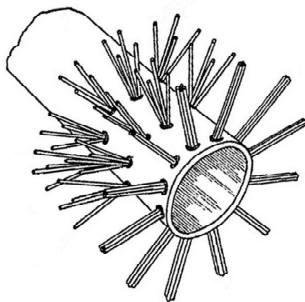
У пат. № GB1376451A розташовані в шаховому порядку радіальні стрижні в поперечному перерізі виконано витягнутими (прямокутними або еліптичними), при цьому сусідні стрижні повернуто вздовж осей на 90°. А в пат. № GB1589183A описано трубу з аналогічними стрижнями, але орієнтованими довгою стороною поперечного перерізу в одному напрямку (вздовж або поперек труби, а також під кутом до поздовжньої осі).

У пат. № RU2023227C1 запропоновано круглу трубу з розташованими на її зовнішній поверхні

поздовжніми дротяними спіралями із взаємно проникаючими витками. При цьому кожна із зазначених спіралей зафіксовано відносно сусідніх спіралей за допомогою поздовжніх стрижнів.

У пат. № CN107702579A описано горизонтальну трубу з радіальними стрижнями та циліндричною кришкою у її верхній частині, розташованою над стрижнями. Завдяки кришці забезпечується рівномірний теплообмін по всій поверхні труби.

У пат. № FR1088757A розглянуто трубу із закріпленими на її зовнішній поверхні пучками з чотирьох стрижнів, вільні кінці яких відігнуто під невеликим кутом один відносно одного (рис. 11).



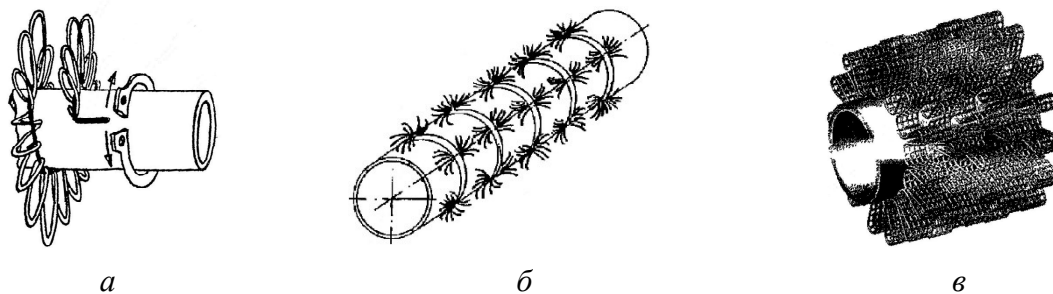
**Рис. 11 – Теплообмінна труба згідно з пат. № FR1088757A**

У пат. № GB2049147A описано конструкцію труби з навитими на неї стрічками, на яких перпендикулярно до однієї з їх поверхонь закріплено відрізки дротів. У результаті утворюється теплообмінна труба з радіально розташованими на її зовнішній поверхні відрізками дротів, що утворюють своєрідний йоржик, що значно збільшує зовнішню поверхню теплообміну труби.

На зовнішній поверхні подібної труби по гвинтовій лінії навито дріт, пропущений крізь витки гвинтової пружини, при цьому кінець дроту зафіксовано на трубі за допомогою хомута (пат. № GB2103518A).

Ще одну аналогічну конструкцію описано в пат. № UA56815A. Зазначена конструкція є сукупністю кільцевих або спіральних фіксаторів, що утримують на зовнішній поверхні труби пучки гнучких дротів, при цьому зазначені пучки розташовуються у коридорному або шаховому порядку.

Пристрій на основі металевої сітки описано в пат. № UA60124U. Вказану круглу рукавну сітку виконано з поздовжніми гофрами, внутрішні частини яких зафіксовано на зовнішній поверхні круглої труби (рис. 12).



**Рис. 12 – Теплообмінні труби згідно з пат. № GB2103518A (а), UA56815U (б) і UA60124U (в)**

Пристрій на основі просторової металевої сітки з комірками у вигляді витягнутих уздовж осі труби шестигранників запропоновано в а. с. № SU1275200A1. Також ребра у вигляді просторової металевої сітки запропоновано в пат. № CN635420A5 і № FR1026192A.

У пат. № UA13047C1 описано трубу, виконану зі спіральних елементів з різним радіусом навивки, при цьому зазначені елементи жорстко з'єднані між собою та чергуються по довжині утворюваного ними каналу із зовнішніми та внутрішніми спіральними ребрами. Недоліком цієї труби є не лише її низька технологічність, а й невисока ефективність, оскільки вона схильна до утворення застійних зон у її каналі.

У пат. № RU2314463C2 розглянуто трубу з пакетом пластинчастих ребер, змонтованих на ній з певним кроком за допомогою розташованих між ними дистанційних алюмінієвих шайб. Аналогічну конструкцію представлено і в пат. № GB974302A.

Вертикальну трубу з плоскими кільцевими або конічними ребрами (в останньому випадку периферію кожного ребра розташовано нижче за його центральну частину) з центральною відбортовкою для фіксації на трубі розглянуто в пат. № KR20110121078A.

Достатньо технологічною є труба за заявкою № DE102009030824A1, в якій поперечні ребра квадратної форми виконано штампуванням з листової заготовки з одночасним формуванням центрального отвору з відбортуванням. При цьому відбортовка не тільки забезпечує щільну посадку ребра на трубу, але й виконує роль дистанційного елемента для сусіднього ребра. Аналогічне рішення, але для круглих ребер, запропоновано в пат. № GB2265000A. Набагато менш технологічною є лита труба з виконаними за одне ціле з її стінкою поздовжніми зовнішніми та внутрішніми ребрами (пат. № DE202009011597U1; рис. 13).

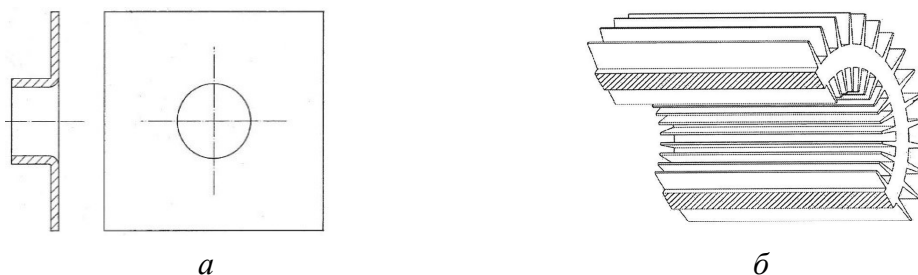


Рис. 13 – Теплообмінні труби згідно із заявкою № DE102009030824A1 (а)  
і пат. № DE202009011597U1 (б)

Трубу за заявкою № US2015/122471A1 також виконано з поперечними ребрами прямокутної форми, одержаними штампуванням з листової заготовки з одночасним формуванням центрального отвору з відбортовкою. Особливістю зазначеного ребра є наявність на відбортовці ребер радіальних надрізів, що полегшують монтаж і фіксацію ребер на трубі.

Трубу з поперечними кільцевими ребрами описано в пат. № FR1467264A. Особливістю запропонованих ребер є надрізані вікна з відігнутими пелюстками, що дають змогу перерозподіляти потік теплоносія між каналами по обидва боки від кожного ребра. А в пат. № CN202041114U на поперечних кільцевих ребрах виконано розташовані в радіальному напрямку V-подібні вирізи або виступи.

У пат. № KR101343089B1 розглянуто трубу з поперечними спіральними ребрами з вирізаними з боку периферії радіальними пазами, а в пат. № GB944108A – трубу з радіально закріпленими на ній квадратними ребрами.

Згідно із заявкою № US2017/089647A1 оребрення отримують штампуванням з листової заготовки. У результаті подальшого деформування формують оребрення, яке може бути встановлене на трубах найрізноманітнішої форми (рис. 14).

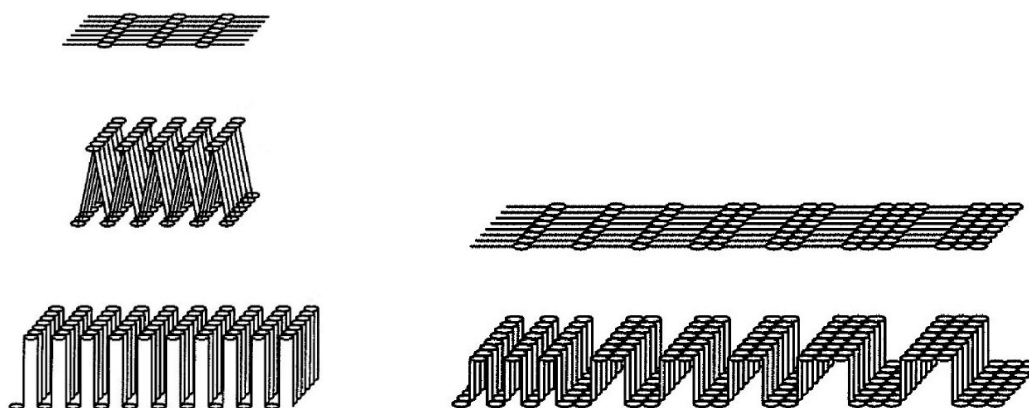
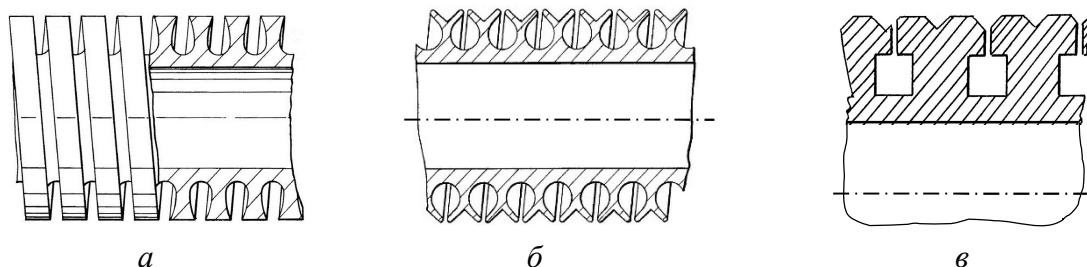


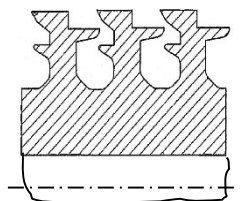
Рис. 14 – Оребрення труб згідно із заявкою № US2017/089647A1

Кип'ятильну трубу зі спіральними ребрами розглянуто і в пат. № GB2011601A, при цьому ребра в поперечному перерізі мають Т-або Y-подібну форму з «ніжкою» біля поверхні труби. Структура її зовнішньої поверхні формується пластичним деформуванням кільцевих чи спіральних ребер прямокутного перерізу. Аналогічну конструкцію, тільки з ребрами Y-подібної форми, описано в пат. № GB2011602A. Подібні конструкції запропоновано і в пат. № GB2013324A, GB2013325A та GB2160450A (рис. 15).



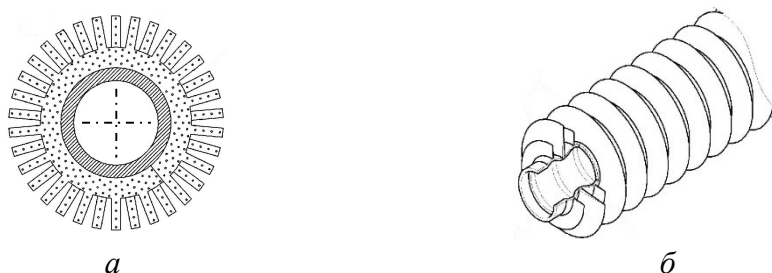
**Рис. 15 – Теплообмінні труби згідно з пат. № GB2011601A (a), GB2011602A (б) і GB2160450A (в)**

Кип'ятильну трубу з ще більш розвиненою зовнішньою поверхнею запропоновано в заявці № US2017/146301A1 (рис. 16).



**Рис. 16 – Структура зовнішньої поверхні кип'ятильної труби згідно із заявкою № US2017/146301A1**

Гофровану трубу з кільцевими ребрами двох розмірів – меншими на виступах гофрів та більшими на западинах – запропоновано в пат. № KR20100021215A. Недоліком цієї труби є загальний недолік всіх горизонтальних труб з кільцевими гофрами – можливість утворення залишку рідкого теплоносія в гофрах нижньої частини труби після його зливу з труби (рис. 17).



**Рис. 17 – Теплообмінні труби згідно з пат. № KR101343089B1 (a) і KR20100021215A (б)**

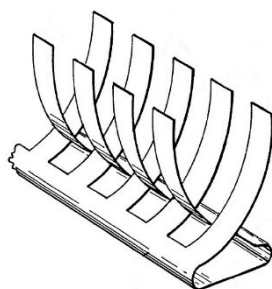
Горизонтальну трубу з поперечними кільцевими ребрами описано в пат. № KR20110004738A, при цьому кожне ребро виконано з двома відгинами – верхнім і нижнім (в один чи протилежні боки; рис. 18).

Оребрення, одержане штампуванням з металевої стрічки, описано в пат. № GB2223301A (рис. 19).

Пластинчасті ребра поділяють на поздовжні та поперечні, які зазвичай виконують у вигляді гвинтової спіралі. За кута підйому гвинтової лінії пластинчастих ребер до  $45^\circ$  їх можна вважати поперечними (пат. № CN272190A), а за більшого кута – поздовжніми.



**Рис. 18 – Теплообмінна труба згідно з пат. № KR20110004738A**



**Рис. 19 – Оребрення теплообмінної труби згідно з пат. № GB2223301A**

До пристроїв комбінованого типу можна віднести рішення згідно з пат. № UA66238U, в якому на круглу трубу навито стрічкову спіраль, між витками якої розміщено гвинтову пружину, що контактує як із сусідніми виступами стрічкової навивки, так і зовнішньою поверхнею труби. Недоліком цього пристрою є його висока матеріалоемність і схильність до забруднення.

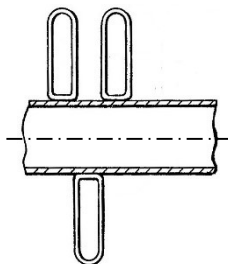
Подібний пристрій розглянуто і в пат. № СН690793А5, в якому між витками спіральних ребер укладено сферичні гранули. При цьому для фіксації гранул ребра зовні покрито сіткою.

У пат. № JP2010169391A наведено опис теплообмінника з горизонтальними круглими трубами з виконаними на зовнішній поверхні сферичними лунками та групами радіальних штифтів, розташованих з інтервалом вздовж труби.

Трубу з розташованими в коридорному порядку сферичними лунками на зовнішній поверхні описано в пат. № CN106705735A.

А в пат. № KR100948396B1 описано трубу з поперечними кільцевими ребрами, для збільшення міцності й жорсткості з'єднаними між собою вздовж труби трьома поздовжніми гофрованими пластинами.

Незвичайну трубу описано в пат. № GB2106630A. На зовнішній поверхні цієї труби по гвинтовій лінії навито порожнє ребро, всередину якого може подаватися теплоносій (рис. 20).



**Рис. 20 – Теплообмінна труба згідно з пат. № GB2106630A**

Найбільш складними та дорогими, але часто й більш ефективними є пристрої спеціальної форми.

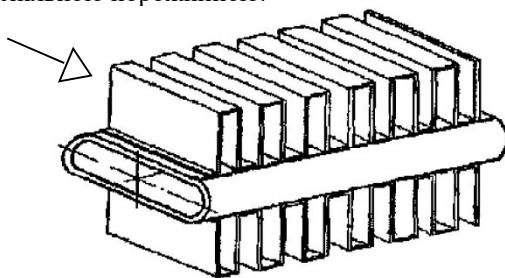
І, нарешті, проєктувальниками пропонуються *конструкції труб із поперечним перерізом, відмінним від круглого*.

У пат. № UA4871U розглянуто трубу плоскоовального поперечного перерізу із зовнішнім оребренням у вигляді гофрованого листа з прямокутними гофрами, при цьому ребра виконано на плоских сторонах труби. Недоліком такого ребра є можливість утворення застійних зон теплоносія в гофрах, відкритих з боку труби, що знижує ефективність теплообміну (рис. 21).

Наприклад, у пат. № UA25025U та UA117554U запропоновано трубу плоскоовального поперечного перерізу із зовнішніми поперечними прямокутними ребрами, ширина яких перевищує ширину плоских поверхонь труби. А в пат. № UA120682U зазначені ребра із зовнішнього боку мають прямолінійні надрізи, які чергуються між собою й забезпечують зменшення величини прилежового ламінарного шару. Недоліком таких пристроїв є їхня висока матеріаломісткість.

У пат. № UA60124U розглянуто трубу плоскоовального поперечного перерізу із зовнішнім надрізним спірально-стрічковим оребренням.

У пат. № UA112465U запропоновано трубу з Y-подібним поперечним перерізом, виконану у вигляді трьох порожнистих ребер із спільною порожниною.

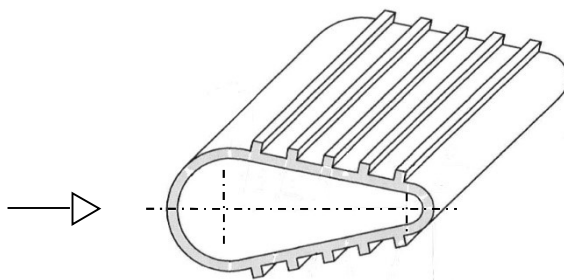


**Рис. 21 – Теплообмінна труба згідно з пат. № UA4871U**

У пат. № RU171747U1 запропоновано трубу зі спіральними гофрами, що утворюють розташовані по черзі виступи та западини як на зовнішній, так і на внутрішній поверхні. Недолік цієї труби – можливість утворення всередині неї застійних зон рідкого теплоносія в разі горизонтального розташування труби.

Також запропоновано трубу, переважно для підігрівача високов'язких рідин, з поперечним перерізом у вигляді овала зі звуженою середньою частиною на її окремих ділянках по довжині, розділених циліндричними ділянками. При цьому сусідні овали повернено один до одного з утворенням спіральної поверхні (пат. № RU2189554C1).

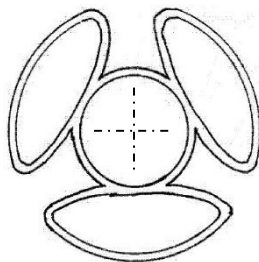
У пат. № UA87032U описано трубу краплеподібного поперечного перерізу із зовнішніми поздовжніми ребрами (рис. 22). Збільшення аеродинамічного опору труби (внаслідок наявності на трубі ребер) компенсується її спеціальною формою.



**Рис. 22 – Теплообмінна труба згідно пат. № UA87032U**

У пат. № CN104833257A наведено опис труби зі стінкою, виконаною у вигляді сукупності поздовжніх гофрів, на обох поверхнях якої можуть бути сформовано короткі дискретні виступи. А в пат. № CN205138267U розглянуто спіральну трубу з циліндричними ділянками, що чергуються по довжині, і сферичними розширеннями.

Багатоканальну трубу з великою зовнішньою питомою поверхнею описано в пат. № CN202836302U (рис. 23).



**Рис. 23 – Багатоканальна теплообмінна труба згідно з пат. № CN202836302U**

Нарешті, в а. с. № SU1719873A1 описано гвинтоподібну трубу подовженого фасонного профілю. Аналогічну трубу фасонного профілю розглянуто в пат. № FR1199648A.

Загальним недоліком труб з поперечним перерізом, відмінним від круглого, є їхня нижча технологічність.

Крім очевидних переваг, що забезпечуються зазначеними засобами інтенсифікації теплообміну, їм притаманні й певні недоліки. Так, у багатьох випадках суттєво зростає матеріалоемність трубчастих каналів. Також у разі вимушеного руху теплоносія збільшується гідравлічний опір, а за наявності в таких засобів рухливих елементів останні можуть призвести до підвищеного шуму й вібрації, що створює складності обслуговуючому персоналу, а також знижує надійність апаратури та трубопроводів.

**Висновки.** Аналіз конструкцій зовнішніх знімних елементів труб для інтенсифікації теплообміну технологічного обладнання та трубопроводів хімічної, харчової, енергетичної та споріднених галузей технології свідчить про їх значну різноманітність, проте найбільш затребуваними промисловістю залишаються апробовані впродовж тривалого часу достатньо прості у виготовленні та експлуатації, а також надійні металеві пластинчасті елементи.

Розроблена розгорнута класифікація зазначених елементів може стати у пригоді розробникам нової техніки для створення високоефективного технологічного обладнання різних галузей промисловості. При цьому досягнення сучасного матеріалознавства та комп'ютерного моделювання можуть істотно спростити розробку як удосконалених, так і принципово нових конструкцій зовнішніх знімних елементів труб для інтенсифікації теплообміну технологічного й допоміжного обладнання, а також трубопроводів.

**Перспективи подальших досліджень.** Надалі передбачено проаналізувати конструкції інших засобів для інтенсифікації теплообміну трубчастих елементів обладнання хімічної та споріднених галузей технології, а також шляхи підвищення їх ефективності.

#### **Список використаної літератури**

1. Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers / Eds. S. Kakaç, A. E. Bergles, F. Mayinger, H. Yüncü. Dordrecht : Springer Science, Business Media Dordrecht. 1999. 676 p. DOI: 10.1007/978-94-015-9159-1
2. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л., АНІПКО О. Б., КАПУСТЕНКО П. А. Теплопередача в апаратах хімічної технології. Харків : НТУ «ХП», 2002. 150 с.
3. Врагов А. П. Теплообмінні процеси та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв. Суми : Університетська книга, 2006. 260 с.
4. Ignatowitz E. Chemietechnik. Naan-Gruiten : Verlag Europa-Lehrmittel. 2011. 608 s.
5. Машини та апарати у хімічних, харчових і переробних виробництвах / Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, В. П. ШАПОРЕВ, В. Ф. МОІСЕЄВ та ін. Харків : Колегіум, 2011. 606 с.
6. Процеси та обладнання хімічної технології / Я. М. Корнієнко, Ю. Ю. Лукач, І. О. Мікульонюк та ін. Київ : НТУУ «КП», 2011. – [Ч. 1. – 300 с.; Ч. 2. – 416 с.].
7. Мікульонюк І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ : НТУУ «КП», 2014. 340 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169>
8. Zohuri B. Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation. New York : Springer Nature. 2017. 559 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1>

9. Mikulionok I. O. Removable Vortex Generators of Pressurized Tubular Channels with Round Cross-Section (Classification and Survey of Patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019. Vol. 54, N 11–12. P. 842–848. DOI: 10.1007/s10556-019-00560-6
10. Мікульонюк І. О. Використання полімерів та пластмас у теплообмінному обладнанні (Огляд) // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2020. № 1. С. 59–71. DOI: 10.33070/etars.1.2020.08
11. Мікульонюк І. О. Конструктивне оформлення теплообмінників «труба в трубі» (Огляд) // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2020. № 4. С. 63–73. DOI: 10.33070/etars.4.2020.07
12. Теплообмінники з псевдозрідженням сипкого матеріалу (Огляд конструкцій) / І. О. Мікульонюк, А. Я. Карвацький, О. І. Іваненко, С. В. Лелека // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»* : сер. «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2022. № 3(21). С. 23–38. DOI: 10.20535/2617-9741.3.2022.265359
13. Kuppan T. *Heat Exchanger Design Handbook*. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton : Taylor & Francis Group, 2013. 1260 p.
14. Мікульонюк І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 419 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061>
15. Мікульонюк І. О. Виготовлення обладнання хімічних виробництв. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 236 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358>
16. Mikulionok I. O. Classification of Means of Enhancement of Heat Transfer from the Outer Surface of Pipes (Survey of Patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019. Vol. 55, N 5–6. P. 491–499. DOI: 10.1007/s10556-019-00651-4
17. Mikulionok I. O. Screw extruder mixing and dispersing units // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 49, N 1–2. P. 103–109. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9711-y>
18. Мікульонюк І. О. Інноваційні змішувачі хімічної технології. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 132 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49568>
19. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>
20. Mikulionok I. O. Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, N 1–2. P. 14–19. DOI: 10.1007/s10556-015-9990-6
21. Rosato D. V., Rosato Donald V., Rosato M. G. *Plastics Design Handbook*. New York : Springer Science, 2001. 680 p.
22. Tadmor Z., Gogos C. G. *Principles of polymer processing*. 2<sup>nd</sup> ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 961 p. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento/material/Tadmor-Gogos.pdf>
23. Rauwendaal C. *Understanding extrusion*. Munich : Hanser Publishers, 2010. 231 p.
24. Mikulyonok I. O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 48, N 11–12. P. 658–661. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9676-x>
25. Rauwendaal C. *Polymer extrusion*. 5<sup>th</sup> ed. Munich : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
26. 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](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf)
27. *Handbook of fillers for plastics* / Eds H. S. Katz, J. V. Milewski, New York : Van Nostrand Reinhold, 1987. 467 p.
28. *Handbook of fillers and reinforcements for plastics* / Eds H. S. Katz, J. V. Milewski, New York : Van Nostrand Reinhold, 1978, 652 p.
29. Мікульонюк І. О. Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі. Класифікація та загальні відомості // *Хімічна промисловість України*. 2005. № 5. С. 30–39.
30. 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](https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications)
31. Микульёнок И. О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // *Пластические массы*. 2012. № 9. С. 29–38.



**Ihor Mikulionok, Anton Karvatskii, Olena Ivanenko, Serhii Leleka**

## **EXTERNAL REMOVABLE ELEMENTS OF PIPES FOR HEAT TRANSFER ENHANCEMENT (Design overview)**

*The subject of the study is the external removable means of heat exchange pipes for intensifying the heat exchange process in technological equipment and pipelines of various sectors of the economy.*

*Studies of the state of art and prospects of constructive and technological design of external removable elements of pipes for heat transfer intensification are based on a critical analysis of scientific and technical sources of information and, above all, patent information from the leading countries of the world, since it is in the patent documentation that information is provided on innovative developments in the relevant field of technology and technology.*

*With the help of methods of analysis and synthesis, external removable elements of pipes for the intensification of heat transfer of equipment and pipelines in the chemical and related branches of technology are systematized. For each type of elements, a detailed classification has been developed, on the basis of which the most interesting designs proposed by scientists, designers and inventors of the leading countries of the world are considered. A critical assessment is given to most of the elements, an analysis of their advantages and disadvantages is made. Preference is given to sources of information from the end of the second and beginning of the third millennium.*

*The designs of these elements are analyzed depending on the regime of the fluid coolant, the presence of a change in the state of aggregation of the coolant, the nature of the effect on the flow over time, the nature of the change in the flow hydrodynamics, the degree of change in the flow hydrodynamics, the relative length, the orientation of the pipes in space, the degree of the channel curvature, the material, the degree of assembly, the degree of mobility of the components, the number of covered pipes, as well as the type of blank. It is shown that, despite a significant variety of designs of external removable elements of pipes for heat transfer intensification, metal plate elements tested in manufacture and operation remain the most in demand by the industry. However, due to the advances in materials science and computer modeling, the search for new designs of pipe elements to intensify heat transfer continues.*

**Keywords:** *heat exchange pipes, outer surface, heat transfer enhancement, classification, design.*

### **References**

1. Heat Transfer Enhancement of Heat Exchangers / Eds. S. Kakaç, A. E. Bergles, F. Mayinger, H. Yüncü. Dordrecht: Springer Science, Business Media Dordrecht. 1999. 676 p. doi: 10.1007/978-94-015-9159-1
2. Tovazhnianskyi, L. L., Anipko, O. B., Kapustenko, P. A. (2002). Teploperedacha v aparatakh khimichnoi tekhnologii [Heat transfer in chemical technology apparatus]. NTU "KhPI", Kharkiv. (Ukr.)
3. Vragov, A. P. (2006). Teploobminni protsesy ta obladnannia khimichnykh i gazonaftopererobnykh vyrobnytstv [Heat exchange processes and equipment of chemical and gas-oil processing industries]. Universytetska knyga. (Ukr.)
4. Ignatowitz, E. (2011). Chemietechnik. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten.
5. Tovazhnianskyi, L. L., Shoporev, V. P., Moiseiev, V. F., Troshin, O. G., Manoilo, Ye. V., Manoilo, Yu. O., Pitak, I. V., Ponomarova, N. G., Vasiliev, M. I. (2011). Mashyny ta aparaty u khimichnykh, jharchovykh i pererobnykh vyrobnytstvakh [Machines and apparatus in chemical, food and processing industries]. Kolegium, Kharkiv. (Ukr.)
6. Korniyenko, Ya. M., Lukach, Yu. Yu., Mikulionok, I. O., Rakytskyi, V. L., Riabtsev, G. L. (2011). Protsey ta obladnannia khimichnoi tekhnologii [Processes and equipment of chemical technology]. NTUU "KPI", Kyiv. [Part 1. – 300 p.; Part 2. – 416 p.].
7. 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.)
8. Zohuri, B. (2017). Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation. Springer Nature, New York. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29835-1>
9. Mikulionok, I. O. (2019). Removable Vortex Generators of Pressurized Tubular Channels with Round Cross-Section (Classification and Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 54, no 11–12, pp. 842–848. doi: 10.1007/s10556-019-00560-6
10. Mikulionok, I. O. (2020). Vykorystannia polimeriv ta plastmas u teploobminnomu obladnanni (Ogliad) [Polymers and Plastic Use for the Heat-exchange Equipment (Review)]. *Energotekhnologii i resursosberezheniye*, no 1, pp. 59–71. doi: 10.33070/etars.1.2020.08

11. Mikulionok, I. O. (2020). Konstruktyvne oarmlennia teploobminnykiv «truba v trubi » (Ogliad) [Constructive Design of Heat Exchangers "Tube-in-Tube" (Review)]. *Energotekhnologii i resursoberezhniye*, no 4, pp. 63–73. doi: 10.33070/etars.4.2020.07
12. Mikulionok, I. O., Karvatskii, A. Ya., Ivanenko, O. I., Leleka, S. V. (2022). Teploobminnyky z psevdozridzhenniam sypkogo materialu (Ogliad konstruktzii) [Heat Exchangers with Fluidization of Bulk Material (Design review)]. *Visnyk NTUU "KPI im. Igoria Sikorskogo". Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*, no 3(21), pp. 23–38. doi: 10.20535/2617-9741.3.2022.265359
13. Kuppam, T. (2013). Heat Exchanger Design Handbook. 2<sup>nd</sup> ed. Taylor & Francis Group, Boca Raton.
14. Mikulionok, I. O. (2012). Vygotovlennia, montazh ta ekspluatatsiia obladnannia khimichnykh vyrobnytstv [Manufacture, installation and operation of chemical equipment]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061> (Ukr.)
15. Mikulionok, I. O. (2022). Vygotovlennia obladnannia khimichnykh vyrobnytstv [Manufacture of chemical equipment]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50358> (Ukr.)
16. Mikulionok, I. O. (2019). Classification of Means of Enhancement of Heat Transfer from the Outer Surface of Pipes (Survey of Patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 55, no 5–6, pp. 491–499. doi: 10.1007/s10556-019-00651-4
17. Mikulionok, I. O. (2013). Screw extruder mixing and dispersing units. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 49, no 1–2, pp. 103–109. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9711-y>
18. Mikulionok, I. O. (2022). Innovatsiini zmishuvachi khimichnoi tekhnologii [Innovative mixers of chemical technology]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/49568> (Ukr.)
19. Mikulionok, I. O. (2020). Technologichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv [Technological bases of polymer materials processing]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084> (Ukr.)
20. Mikulionok, I. O. (2015). Classification of Processes and Equipment for Manufacture of Continuous Products from Thermoplastic Materials. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 51, no. 1–2, pp. 14–19. doi: 10.1007/s10556-015-9990-6
21. Rosato, D. V., Rosato, Donald V., Rosato, M. G. (2001). *Plastics Design Handbook*. Springer Science, New York.
22. Tadmor, Z., Gogos, C. G. (2006). *Principles of polymer processing*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Hoboken. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento/material/Tadmor-Gogos.pdf>
23. Rauwendaal, C. (2010). *Understanding extrusion*. Hanser Publishers, Munich.
24. Mikulyonok, I. O. (2013). Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no 11–12, pp. 658–661. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9676-x>
25. Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion*. 5th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
26. 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](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf)
27. *Handbook of fillers for plastics (1987)* / Eds H. S. Katz, J. V. Milewski, Van Nostrand Reinhold, New York.
28. *Handbook of fillers and reinforcements for plastics (1978)* / Eds H. S. Katz, J. V. Milewski, Van Nostrand Reinhold, New York.
29. Mikulionok, I. O. (2005). Termoplastychni kompozytni materialy ta ikh napovniuvachi. Klasyfikatsiia ta zagalni vidomosti [Thermoplastic composite materials and their fillers. Classification and general information]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*, no 5, pp. 30–39. (Ukr.)
30. 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](https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications)
31. Mikulionok, I. O. (2012). Klassifikatsiia termoplasticheskikh kompozitsionnykh materialov i ikh napolniteley [Classification of thermoplastic composite materials and their fillers]. *Plasticheskiye massy*, no 9, pp. 29–38.