

І. О. Мікульонок

ІННОВАЦІЙНІ ЗМІШУВАЧІ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ



І. О. Мікульонок

ІННОВАЦІЙНІ ЗМІШУВАЧІ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Монографія

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

УДК 621.929+66.063(048.83)
М59

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Інституту технічної теплофізики
Національної академії наук України
(Протокол № 11 від 22.07.2022 р.)*

Рецензенти: *К. О. Самойчук*, д-р техн. наук, проф.,
Таврійський державний агротехнологічний університет
імені Дмитра Моторного

О. М. Гавва, д-р техн. наук, проф.,
Національний університет харчових технологій

А. А. Топоров, канд. техн. наук, доц.,
Донецький національний технічний університет

Мікульонок І.О.

М59 Інноваційні змішувачі хімічної технології [Текст] : монографія /
І. О. Мікульонок. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 132 с.: іл. –
Бібліогр.: с. 125–129.

У монографії розглянуто конструкції інноваційного змішувального обладнання хімічної технології та споріднених галузей промисловості, розроблених науковцями й винахідниками провідних країн світу за останні два століття.

Запропоновано розгорнуті класифікації основних видів змішувачів сипких матеріалів і рідких середовищ, які дають змогу розробникам нової техніки й технології окреслити шляхи можливої модернізації існуючих та створення принципово нових змішувачів. Докладно розглянуто конструкції гравітаційних змішувачів сипких матеріалів, проточних статичних кавітаційних змішувачів, роторно-дискових змішувачів, магнітних мішалок, мішалок змінюваної робочої поверхні, дискових мішалок, мішалок у вигляді тіл обертання, теплообмінних пристроїв ємнісних апаратів з роторними мішалками, змішувальних елементів черв'ячних екструдерів, а також роторних змішувачів закритого типу для пластичних мас і гумових сумішей та ущільнень їхніх роторів.

Для фахівців хімічного апарато- та машинобудування і споріднених галузей виробництва, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 621.929+66.063(048.83)

© І. О. Мікульонок, 2022
© КПІ ім. Ігоря Сікорського,
інженерно-хімічний факультет, 2022

ВСТУП

Одними з найбільш відповідальних процесів хімічної технології є перемішування та змішування. Відповідне обладнання для реалізації цих процесів називається змішувачами.

Термін «змішування» зазвичай застосовують до оброблення сипких матеріалів для позначення процесу приготування сумішей цих матеріалів, а термін «перемішування» – до оброблення рідких середовищ для позначення процесу багаторазового відносного пересування макроскопічних елементів об'єму рідкого середовища при введенні в цей об'єм енергії за допомогою перемішувального пристрою, потоку рідини, газу або пари.

Технологічний ефект змішування й перемішування полягає в інтенсифікація теплових, масообмінних і хімічних процесів, а також забезпеченні отримання рівномірного розподілу компонентів в однорідній чи неоднорідній системі (розчини, суспензії, емульсії тощо).

Для змішування сипких матеріалів застосовують механічні, гравітаційні та пневматичні змішувачі як періодичної (циклічної), так і безперервної дії.

Механічне змішування сипких матеріалів виконують у змішувачах з обертовим корпусом, обертовими внутрішніми пристроями, зі струшувальними, хитними й вібраційними елементами, а також у комбінованих змішувачах.

Гравітаційне змішування виконують за допомогою різноманітних механічних пристроїв, які підіймають твердий матеріал на певну висоту, після чого цей матеріал опускається під дією сили тяжіння, рухаючись при цьому по досить складних траєкторіях.

Пневматичне змішування полягає в пропусканні повітря чи іншого газу крізь матеріал та утворенні при цьому псевдозрідженого шару.

Перемішування рідких середовищ виконують як у змішувачах, так і в реакційних апаратах (автоклавах, сульфаторах, нітраторах та ін.), а також у проміжних апаратах, трубопроводах і сховищах.

На практиці використовують такі види перемішування: механічне, циркуляційне, струминне, пульсаційно-струминне, барботажне, газліфтне, електромагнітне, магнітно-вихрове, перемішування під час транспортування в трубопроводах і кавітаційне.

У науково-технічній літературі з порушеного питання наявні відповідні відомості, датовані переважно другою половиною минулого століття, що істотно знижує її актуальність. Тому постає завдання дослідження сучасного стану питання гідромеханічного оброблення текучих середовищ різної природи, їх ґрунтовної класифікації та визначення шляхів вдосконалення.

Дослідження було проведено автором на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

а. с. – авторське свідоцтво СРСР на винахід;
пат. – патент;
ПКМ – полімерний композиційний матеріал;
CA – Канада;
CH – Швейцарія;
CN – Китай;
DE – Німеччина;
EP – Європейське патентне відомство;
FR – Франція;
GB – Велика Британія;
JP – Японія;
KR – Республіка Корея;
PL – Польща;
RU – Російська Федерація;
SU – Союз Радянських Соціалістичних Республік;
UA – Україна;
US – Сполучені Штати Америки;
WO – стосується міжнародної заявки, опублікованої відповідно до Договору про патентну кооперацію (англ. *Patent Cooperation Treaty, PCT*).

1. ПРОБЛЕМАТИКА РОЗРОБЛЕННЯ ЗМІШУВАЛЬНОГО УСТАТКОВАННЯ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

1.1. Дослідження ретроспективи конструктивно-технологічного оформлення змішувального устаткування хімічної технології

Одним з найбільш поширених видів гідромеханічного обладнання хімічної технології є змішувальне устаткування, призначене для оброблення однорідних і неоднорідних сипких, рідких і пластичних систем.

Змішування й перемішування текучих середовищ широко застосовують у процесах хімічної технології всіх типів: механічних, гідромеханічних, теплових, масообмінних і хімічних [1–6].

Поширеність процесів змішування й перемішування, а також відповідного змішувального устаткування пояснюється істотним впливом гідродинаміки потоку текучого середовища на кінетику передусім теплових, масообмінних і хімічних процесів. При цьому процеси та обладнання для приготування та оброблення сипких матеріалів, рідких середовищ помірної в'язкості та високов'язких пастоподібних систем зазвичай принципово відрізняються між собою.

Передусім це стосується такого ефективного змішувального устаткування та його елементів як гравітаційних змішувачів сипких матеріалів, проточних статичних кавітаційних змішувачів, роторно-дискових змішувачів, магнітних мішалок, мішалок змінюваної робочої поверхні, дискових мішалок, мішалок у вигляді тіл обертання, теплообмінних пристроїв ємнісних апаратів з роторними мішалками, змішувальних елементів черв'ячних екструдерів, а також роторних змішувачів закритого типу для пластичних мас і гумових сумішей та ущільнень їхніх роторів [7–11].

Окремі спроби критичного аналізу змішувального устаткування для оброблення сипких, рідких і пастоподібних текучих середовищ у науково-технічній літературі були зроблені передусім у другій половині минулого століття [6, 7], що істотно обмежує її актуальність. При цьому натеper не лише відсутні розширені класифікації змішувального устаткування різного типу, а й їхня систематизація та критичний аналіз.

Така ситуація істотно ускладнює як обґрунтований вибір змішувального устаткування для оброблення певного текучого середовища, так і шляхи подальшого удосконалення вже існуючих і розробки нових видів змішувачів для приготування та оброблення сипких, рідких і пастоподібних систем.

1.2. Методика дослідження конструктивно-технологічного оформлення змішувального устаткування хімічної технології

Дослідження стану питання й тенденцій розвитку конструктивно-технологічного оформлення змішувального устаткування хімічної технології

ґрунтуються передусім на критичному аналізі науково-технічних джерел інформації й передусім – патентної інформації провідних країн світу, оскільки саме в патентній документації – насамперед в описах до заявок на винаходи або до охоронних документів на об'єкти промислової власності – наводяться відомості про інноваційні розробки в тій чи іншій галузі техніки й технології [12, 13].

За допомогою методів аналізу/синтезу систематизовано змішувальне устаткування, призначене для оброблення однорідних і неоднорідних сипких, рідких і пластичних систем. Для кожного виду змішувачів розроблено ґрунтовну класифікацію, на основі кожної з яких докладно розглянуто найбільш цікаві конструкції. Надано критичну оцінку більшості наведених конструкцій, обговорено їхні переваги й недоліки. Перевагу надано джерелам інформації початку третього тисячоліття.

На основі аналітично-синтетичного перероблення класичних і сучасних джерел науково-технічної документації в процесі її аналізу й вилучення потрібної інформації, було здійснено оцінку, співставлення та узагальнення (синтез) і представлення інформації у вигляді, прийнятному для сприйняття її фахівцями для подальшого удосконалення вже існуючих і розробки нових інноваційних змішувачів для використання в хімічній, харчовій і споріднених з ними галузях промисловості.

2. ЗМІШУВАЧІ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Формування класифікаційних ознак змішувачів сипких матеріалів

Одним з найпростіших видів обладнання хімічних, харчових і переробних виробництв, а також обладнання будівельних матеріалів, призначеного для отримання сумішей сипких матеріалів, є гравітаційні змішувачі, в яких змішування здійснюється переважно у процесі руху компонентів під дією сили тяжіння [5–7].

Аналіз існуючих змішувачів сипких матеріалів дає змогу класифікувати їх за такими основними групами показників, які впливають на інтенсивність та ефективність проведення процесу змішування:

- характером процесу змішування в часі;
- формою змішувального елемента;
- можливістю зміни форми, розмірів та/або положення змішувальних елементів;
- наявністю рухливих змішувальних та/або розподільних елементів;
- типом підйомника компонентів суміші під час роботи.

2.2. Особливості конструктивного виконання змішувачів сипких матеріалів

Аналіз конструкцій гравітаційних змішувачів дає змогу запропонувати їхню класифікацію, наведену на рис. 2.1.

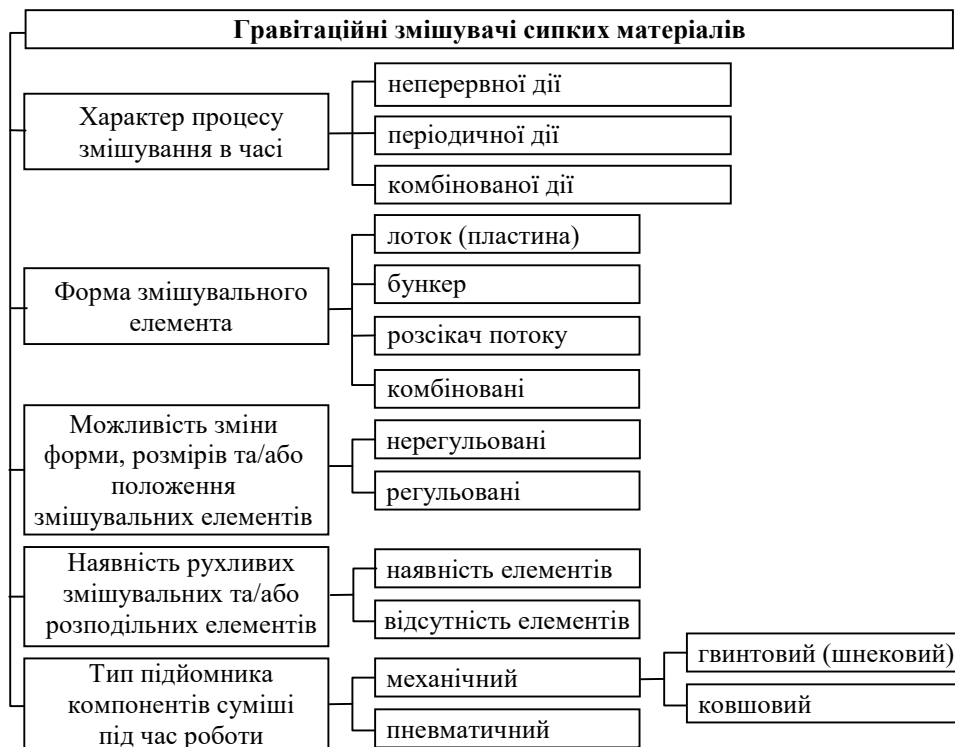


Рис. 2.1. Схема класифікації гравітаційних змішувачів сипких матеріалів [14]

За характером проходження процесу змішування в часі гравітаційні змішувачі можна поділити на змішувачі безперервної, періодичної та комбінованої дії.

Класичні гравітаційні змішувачі належать до прямоточних змішувачів безперервної дії, в яких процес змішування здійснюється переважно під час руху компонентів одержуваної суміші під дією сили тяжкості й відсутності рухомих робочих елементів (вібруючих, обертових, коливальних, таких, що рухаються зворотно-поступально та ін.) та/або потоків текучого середовища, наприклад, повітря або води). При цьому процес змішування здійснюється за допомогою руху змішуваних компонентів зверху вниз по досить складній траєкторії. За характером руху потоків змішуваних компонентів зазначені змішувачі схожі на статичні змішувачі, що використовуються для гомогенізації рідких, у тому числі високов'язких, середовищ [15].

Гравітаційні змішувачі періодичної (циклічної) дії належать до циркуляційних змішувачів, у яких рух змішуваних компонентів організується по замкнутому контуру, а безпосередньо процес змішування – переважно під час руху зазначених компонентів зверху вниз під дією сили тяжіння. При цьому підйом змішуваної композиції на висоту, необхідну для її вільного падіння, здійснюється за допомогою рухомих робочих елементів та/або потоків текучого середовища.

До комбінованих (універсальних) змішувачів належать змішувачі, які можуть працювати як у безперервному, так і періодичному режимах (приклад такого змішувача згідно з пат. UA65324U буде розглянуто далі).

За формою змішувального елемента класичні прямоточні змішувачі безперервної дії можна поділити на змішувачі з елементами у вигляді лотків, бункерів, розділювачів (розсікачів, розпилювачів) потоку, а також їх комбінацій [5–7] (рис. 2.2).

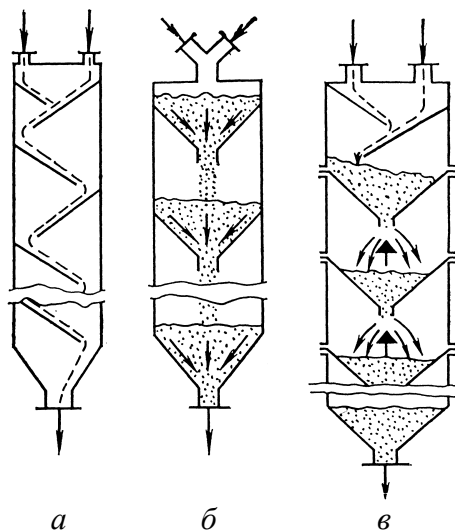


Рис. 2.2. Класичні гравітаційні змішувачі:
а – лотковий; б – бункерний; в – ударно-розпилювальний (комбінований)

На відміну від класичного лоткового гравітаційного змішувача з верхнім завантаженням компонентів і лотками, розташованими під одним кутом до горизонталі (див. рис. 2.2, а), у пат. № RU2526963C1 запропоновано гравітаційний лотковий змішувач з лотками, кут нахилу яких до горизонталі зростає від верхнього до нижнього. Така конструкція змішувача виключає утворення застійних зон на лотках і сприяє підвищенню якості одержуваної суміші. При цьому для додаткової подачі змішуваних компонентів у стінках корпуса над кожним з лотків виконано завантажувальні вікна (прорізи).

В а. с. № SU1755904A1 описано змішувач з корпусом у вигляді двох зрізаних конусів, з'єднаних між собою більшими основами. По осі корпуса розташовано пакет розсікачів потоку, виконаних у вигляді зрізаних конусів, що розширюються донизу. При цьому діаметр меншої основи кожного наступного розсікача менше, ніж попереднього, а конічні поверхні розсікачів виконано з поздовжніми щілинами, що утворюють своєрідні пелюстки (рис. 2.3). У разі потрапляння оброблюваної композиції на менші основи розсікачів вона перерозподіляється в діаметральному напрямку корпуса: частина її просипається всередину розсікачів, а інша частина – крізь їхні поздовжні щілини, перерозподіляючись при цьому в коловому напрямку. Змішувач досить ефективний, але складний у виготовленні та експлуатації, оскільки в його конструкції використано розподільники різних розмірів.

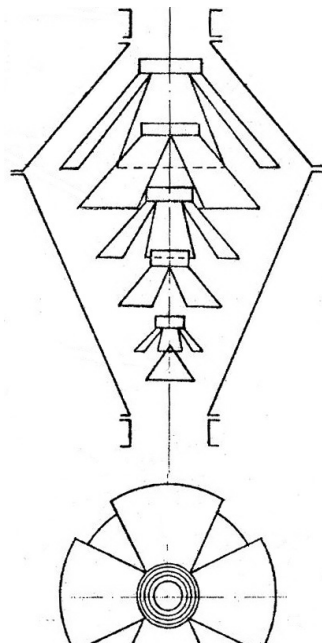


Рис. 2.3. Комбінований змішувач згідно з а. с. № SU1755904A1

Багатоступінчастий бункерний змішувач описано в пат. № UA127950U. Робочими елементами цього змішувача є рознесені по висоті й повернуті один відносно одного під прямим кутом пари прямокутних у плані бункерів (рис. 2.4).

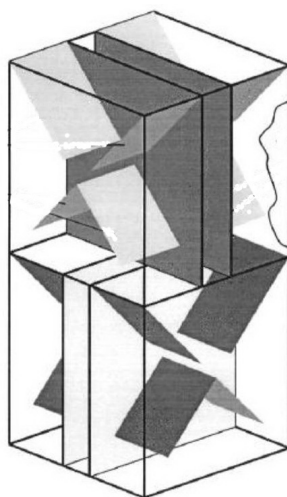


Рис. 2.4. Гравітаційний змішувач згідно з пат. № UA127950U

На відміну від найбільш поширеного лоткового гравітаційного змішувача з полицями, по черзі закріпленими на двох протилежних стінках корпусу прямокутного поперечного перерізу (див. рис. 2.2, а), змішувана композиція пересипається у двох взаємно перпендикулярних площинах з численними поділами й злиттям потоків. Така схема руху сипких компонентів суміші істотно підвищує ефективність процесу змішування.

В а. с. № SU1660719A1 запропоновано ударно-розпилювальний (комбінований) змішувач з верхньою розгінною та нижньою змішувальною частинами. При цьому в змішувальній частині щільність установки по висоті кутових роздільників (розсіювачів) потоку зростає в напрямку руху матеріалу.

В а. с. № SU1627237A1 описано ударно-розпилювальний змішувач з робочими елементами у вигляді послідовно встановлених зворотних зрізаних і прямих конусів, з'єднаних між собою циліндричними обичайками з поздовжніми гвинтовими прорізами. Недоліком цієї конструкції є можливість забивання гвинтових прорізів циліндричних обичайок змішуваними компонентами, а також складність виготовлення та експлуатації значної кількості змішувальних елементів різного типорозміру.

У пат. № RU2621225C1 корпус змішувача розділено на дві частини: верхню з похилими лотками й нижню зі зрізаними конусами, під кожним з яких змонтовано розсікач потоку, що має форму піраміди. При цьому крізь виконані в корпусі над зрізаними конусами вікна подають додаткові порції компонентів одержуваної суміші. Зазначена конструкція призначена для приготування сумішей з відносно великим співвідношенням часток компонентів.

У пат. № CN101703900A розглянуто ударно-розпилювальний змішувач для одержання композиції з двох компонентів. Відмінність цього змішувача від класичного ударно-розпилювального полягає в тому, що між бункерами та роздільниками (розсіювачами) потоку компонентів встановлено напрямні

втулки. При цьому ефективність зазначених втулок не досить аргументована, а їх наявність призводить до збільшення висоти корпусу змішувача.

Описаний у пат. № FR2300610A1 ударно-розпилювальний змішувач містить циліндричний корпус з конічним днищем і коаксіально розташовану в їхніх порожнинах центральну трубу. Один зі змішуваних компонентів подається в центральну трубу, а другий – у простір між зазначеною трубою й корпусом, в якому встановлено конічні перегородки. Розділювач (розсіювач) потоку змонтовано на виході із центральної труби. Недоліками цього змішувача є значні габарити й металоємність.

В а. с. № SU1079273A1 запропоновано змішувач, що містить вертикальний циліндричний корпус з розміщеним у ньому пакетом щілинних решіток з розсікачами, а також змонтованим під кожною з них напрямним елементом із розподільним конусом. При цьому кожна щілинна решітка та встановлений під нею розсікач розташовано під прямим кутом один відносно одного. Аналогічний змішувач, але з корпусом квадратного поперечного перерізу, описано в а. с. № SU1583156A1.

У пат. № CN103100326A описано двохярусний ударно-розпилювальний змішувач, перша секція якого є камерою попереднього змішування й оснащена сукупністю перевернутих V-подібних розділювачів потоку, а друга секція остаточного змішування оснащена бункерами та встановленими під ними роздільниками потоку сипкого матеріалу.

Гравітаційний змішувач з корпусом незвичайної форми описано в пат. № US3963221A (рис. 2.5). Корпус цього змішувача виконаний з секцій, що складаються з двох косих багатогранників прямокутного поперечного перерізу, прямокутні основи кожного з яких повернуто один відносно одного на 90°. Під час руху матеріалу відбувається багаторазовий поділ і злиття двох його потоків, що сприяє якісному перемішуванню. Недоліком конструкції є відносна складність виготовлення секцій корпусу.

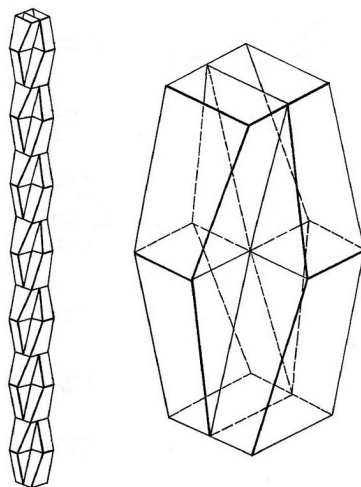


Рис. 2.5. Змішувач згідно з пат. № US3963221A

У пат. № DE3235824A1 розглянуто змішувач, що має циліндро-конічний корпус з розташованою вздовж осі трубою. Зазначену трубу виконано розрізною з декількох секцій, між якими встановлено плоскі кільцеві або конічні роздільники (розсіювачі) потоку компонентів суміші, що подаються у верхню частину труби. У переважному варіанті виконання змішувача всі секції труби змонтовано на загальній підвісці з вібраційним приводом. Недоліком цього пристрою є невисока ефективність змішування в просторі між трубою й корпусом.

За можливістю зміни форми, розмірів та/або положення змішувальних елементів розрізняють змішувачі з нерегульованими й регульованими робочими елементами.

До змішувачів з регульованими робочими елементами належить конструкція, запропонована в пат. № UA124591U. Цей комбінований змішувач з робочими елементами у вигляді похилого лотка зі змінним кутом нахилу та закріплених на ньому набором вертикальних пластин, що утворюють своєрідні бункери та розсікачі потоку (рис. 2.6). Зміною кута нахилу лотка можна регулювати час та інтенсивність змішування.

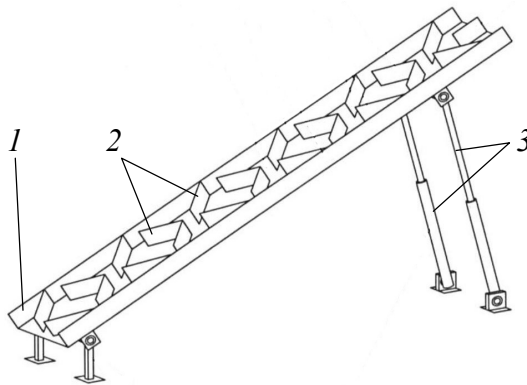


Рис. 2.6. Комбінований змішувач згідно з пат. № UA124591U:
1 – лоток; 2 – пластини; 3 – телескопічні стійки

За наявністю рухомих змішувальних та/або розподільних елементів розрізняють змішувачі з наявністю й відсутністю таких елементів.

До змішувачів з наявністю рухомих змішувальних та/або розподільних елементів можна віднести конструкцію згідно з пат. № RU2650120C1. Запропонований у ньому лотковий змішувач містить виконаний у вигляді паралелепіпеда бункер з попарно закріпленими на його протилежних стінках лотками. При цьому в місці утворення кожною парою лотків розвантажувальної щілини змонтовано вал із закріпленими на ньому криволінійними перфорованими лопатями. Недоліками цього змішувача є витрати енергії на обертання валів з лопатями, а також складність експлуатації.

Лотковий змішувач з вигнутими догори нижніми частинами лотків і розміщеними в них змішувальними елементами у вигляді щіток описано в пат. № RU2586126C1. Кут нахилу лотків до горизонталі зростає від верхнього до нижнього, при цьому в стінках корпуса над кожним з лотків виконано вікна для додаткової подачі компонентів. Запропонований змішувач має ті самі недоліки, що й попередній

За типом підйомника компонентів суміші під час роботи розрізняють гравітаційні змішувачі періодичної дії з механічними та пневматичними підйомниками.

Найбільшого поширення набули змішувачі з механічними підйомниками, а саме гвинтовими (шнековими), а також ковшовими елеваторами.

До змішувачів з гвинтовими елеваторами зокрема належить конструкція згідно з пат. № RU115685U1. Цей змішувач містить конічний корпус з центральною підйомною трубою, в якій розміщено транспортувальний шнек. Внизу труба виконана з вікнами для проходу частинок змішуваної композиції, а в її верхній частині встановлено кільцевий розсіювач потоку (рис. 2.7).

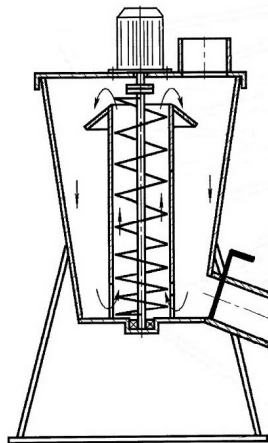


Рис. 2.7. Гравітаційний змішувач згідно з пат. № RU115685U1

Змішувач працює в такий спосіб. Компоненти готової суміші завантажуються в корпус. Після вмикання приводу шнека він безперервно захоплює компоненти, що підлягають змішуванню, і транспортує їх до верхньої частини труби, на виході з якої матеріал потрапляє на розсіювач потоку. Потім під дією сили тяжіння матеріал вільно падає в просторі між трубою та корпусом, після чого він нагромаджується в нижній частині корпуса. Далі цикл змішування повторюється. Після досягнення сумішшю необхідної однорідності вона видаляється із змішувача.

Зазначений змішувач удосконалено в пат. № UA142850U (рис. 2.8), у якому бункер у поперечному перерізі виконано квадратним або прямокутним, а по висоті бункера в його порожнині на його протилежних стінках та

вертикальній трубі парами змонтовано похилі полиці, розташовані з проміжком відносно вертикальної труби та стінок бункера, відповідно, при цьому полиці, змонтовані на стінках бункера й вертикальній трубі, чергуються між собою.

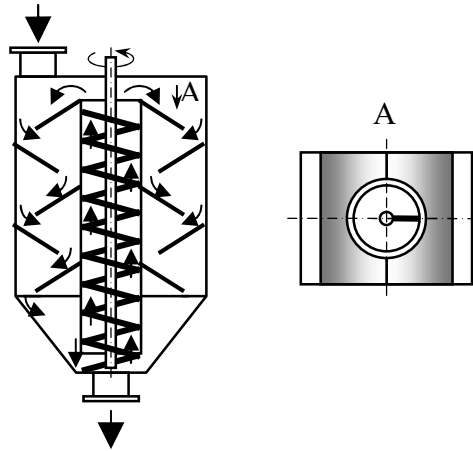


Рис. 2.8. Гравітаційний змішувач згідно з пат. № UA142850U

Змішувач сипкого матеріалу згідно з пат. № UA136863U містить конічний або циліндро-конічний бункер із завантажувальним і розвантажувальним патрубками, розміщену в порожнині бункера вертикальну трубу зі змонтованим у ній обертовим шнеком, порожнину якої з боку її нижнього й верхнього торців сполучено з порожниною бункера, при цьому по висоті бункера в межах його порожнини на його стінках та вертикальній трубі змонтовано оболонки, виконані у вигляді зрізаних конусів, спрямованих більшими основами донизу й розташованих із проміжком відносно вертикальної труби та стінок бункера, відповідно, при цьому оболонки, змонтовані на стінках бункера й вертикальній трубі, чергуються між собою (рис. 2.9).

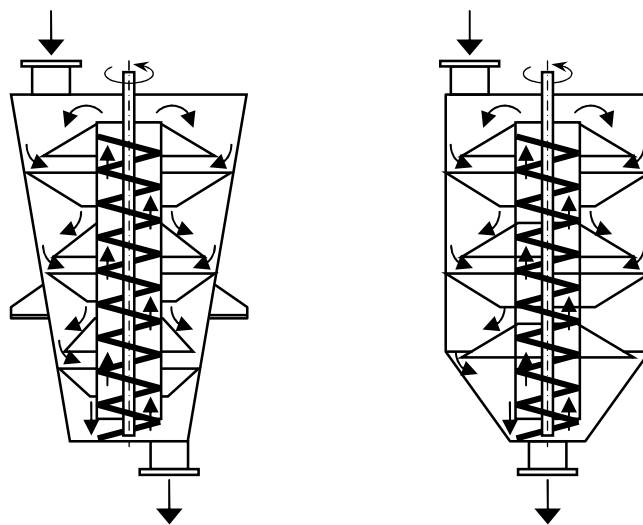


Рис. 2.9. Гравітаційний змішувач згідно з пат. № UA136863U

Аналогічні рішення запропоновано в пат. № US2101490A, GB1326224A, CH475026A, DE3611060A1, RU2217226C1, RU2424046C1, RU2616709C1, RU119641U1, RU144635U1, а. с. № SU856521A1 і заявці № WO92/04114A1.

При цьому в пат. № US2101490A центральну підйомну трубу виконано телескопічною, що дає змогу змінювати її довжину, а отже й величину завантажувального вікна для забезпечення потрібного ступеня циркуляції змішуваної композиції.

У пат. № GB1326224A транспортувальний шнек у місці вивантаження суміші з корпусу забезпечений радіальними перегрібачами для унеможливлення утворення склепіння й полегшення розвантаження змішувача.

У пат. № CH475026A в нижній частині транспортувального шнека закріплено пару криволінійних вертикальних лопатей для полегшення подавання змішуваних компонентів у нижню частину центральної підйомної труби та унеможливлення утворення застійних зон поблизу плоского днища.

У пат. № DE3611060A1 у просторі між центральною підйомною трубою та конічним корпусом встановлено конічну вставку, яка обернена меншою основою донизу та інтенсифікує процес змішування.

У пат. № RU2217226C1 крок навивки транспортувального шнека виконано таким, що збільшується по висоті корпусу в напрямку руху матеріалу, що сприяє додатковому перемішуванню безпосередньо під час руху компонентів суміші в центральній підйомній трубі.

У пат. № RU2424046C1 навколо центральної підйомної труби з можливістю обертання розташовано змішувальний спіральний елемент, нижня частина якого закріплена на валу транспортувального шнека, а верхня – на верхній частині труби за допомогою рухомого з'єднання.

У пат. № RU2616709C1 початкові витки транспортувального шнека виконано зі збільшуваним кутом підйому гвинтової лінії, що полегшує захоплення змішуваних компонентів і подавання їх в центральну підйомну трубу.

У пат. № RU119641U1, RU126624U1 і RU144635U1 розташований на виході з центральної підйомної труби конічний розсіювач потоку виконано у вигляді спіралі Архімеда. Таке конструктивне рішення сприяє розподілу компонентів суміші, які падають, по всьому поперечному перерізу кільцевого простору, утвореного центральною підйомною трубою й корпусом змішувача.

В а. с. № SU856521A1 конічний розсіювач потоку встановлено не на центральній підйомній трубі, а безпосередньо на транспортувальному шнеку (у його верхній частині).

Змішувач, що має вертикальний циліндричний корпус з розташованими в ньому решітками, виконаними з горизонтальних повернутих вершиною догори кутиків, розглянуто в пат. № UA65324U. Кутики сусідніх решіток повернуто один відносно одного на 90°, при цьому вздовж осі корпусу

проходить циркуляційна труба з розташованим у її нижній частині пневматичним соплом. Змішувач може працювати як у безперервному, так і періодичному режимах, тобто з точки зору характеру процесу змішування в часі, зазначений апарат належить до комбінованих (універсальних) змішувачів.

Загальними недоліками більшості гравітаційних змішувачів періодичної дії є їх невисока продуктивність і значні витрати енергії на підйом компонентів одержуваної композиції.

Досить складна конструкція умовно гравітаційного змішувача з внутрішньою переривчастою стрічковою спіраллю, за якою разом зі змішуваними компонентами скочуються змішувальні кульки, що піднімаються у верхню частину спіралі за допомогою ковшового елеватора, запропоновано в пат. № RU2348449C1. Готова суміш просипається крізь отвори еластичного похилого днища змішувачі та видаляється з нього крізь розвантажувальний патрубок (рис. 2.10). Змонтовані на порожнистому вертикальному валу пневматичні форсунки сприяють додатковому перемішуванню сипкого матеріалу.

Також до умовно гравітаційних змішувачів можна віднести конструкцію згідно з пат. № UA117550U з обертовим барабаном та змонтованою в ньому стрічковою спіраллю Архімеда, на якій послідовно встановлено лотки й роздільники потоку, які сходяться за ходом руху суміші та чергуються між собою. Хоча процес змішування в цьому змішувачі здійснюється за відносного руху компонентів суміші й нахилених до горизонту ділянок стрічкової спіралі, він все ж є умовно гравітаційним, оскільки містить не лише обертовий робочий орган (стрічкову спіраль), а й нерухомий корпус.

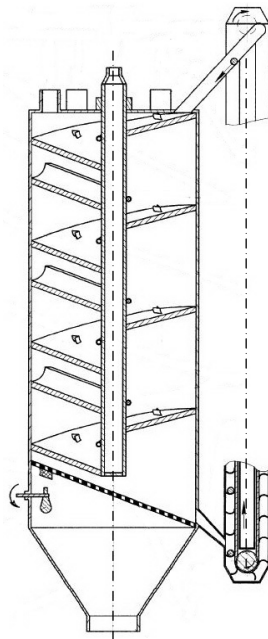


Рис. 2.10. Гравітаційний змішувач згідно з пат. № RU2348449C1

Нами розглянуто конструкції гравітаційних змішувачів сипких матеріалів, що використовуються переважно в обладнанні хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів. При цьому, незважаючи на відносно невисоку продуктивність зазначених змішувачів, завдяки їх очевидним перевагам – простоті конструкції та експлуатації – гравітаційні змішувачі продовжують успішно використовуватися та вдосконалюватися.

3. ЗМІШУВАЧІ РІДКИХ СЕРЕДОВИЩ

3.1. Формування переліку змішувачів рідких матеріалів

Аналіз існуючих інноваційних змішувачів рідких матеріалів помірної в'язкості та їхніх змішувальних елементів дає змогу сформулювати такий їх перелік для подальшого дослідження:

- проточні статичні кавітаційні змішувачі;
- роторно-дискові змішувачі;
- змішувачі з магнітними мішалками;
- мішалки змінюваної робочої поверхні;
- дискові мішалки;
- мішалки у вигляді тіл обертання;
- теплообмінні пристрої змішувачів з роторними мішалками.

3.2. Проточні статичні кавітаційні змішувачі

Одним з найбільш поширених та ефективних видів перемішування рідких середовищ у хімічній технології є механічне перемішування, що реалізується в апаратах з мішалками [8, 9, 16]. Одним з недоліків таких апаратів є наявність у них оснащених приводом рухомих елементів, що істотно ускладнює експлуатацію обладнання [17–19].

Більш простими є позбавлені індивідуального приводу апарати для проточного оброблення рідких середовищ з використанням кавітації – процесу утворення газових та/або парових бульбашок (каверн) у рідкому середовищі з подальшим їх схлопуванням і вивільненням енергії [5, 6].

Аналіз конструктивного оформлення статичних кавітаційних змішувачів дає змогу запропонувати їхню класифікацію (рис. 3.1).

За формою кавітатора у плані розрізняють кавітатори у формі диска, циліндра, кулі, конуса, призми, еліпсоїда, тіла іншої форми, а також сукупності дискретних елементів.

Кавітатор у вигляді встановленого в циліндричному каналі круглого диска з численними каналами (пат. № RU2158627C1).

Кавітатори у вигляді встановленого в циліндричному каналі круглого диска з циліндричними (пат. № UA52136A) і конічними (пат. № UA108597U) каналами, у кожному з яких закріплено індивідуальний кавітатор.

Кавітатор у вигляді встановленого в циліндричному каналі круглого диска з конічними дифузорами різного кута конусності (пат. № UA1398C). Пульсуюча і не рівномірна в осьовому й діаметральному напрямках каверна, що утворюється після диска, інтенсифікує процес змішування.

Кавітатор у вигляді встановленого в циліндричній робочій камері пологого циліндра з конічною лобовою частиною (пат. № UA20265A).

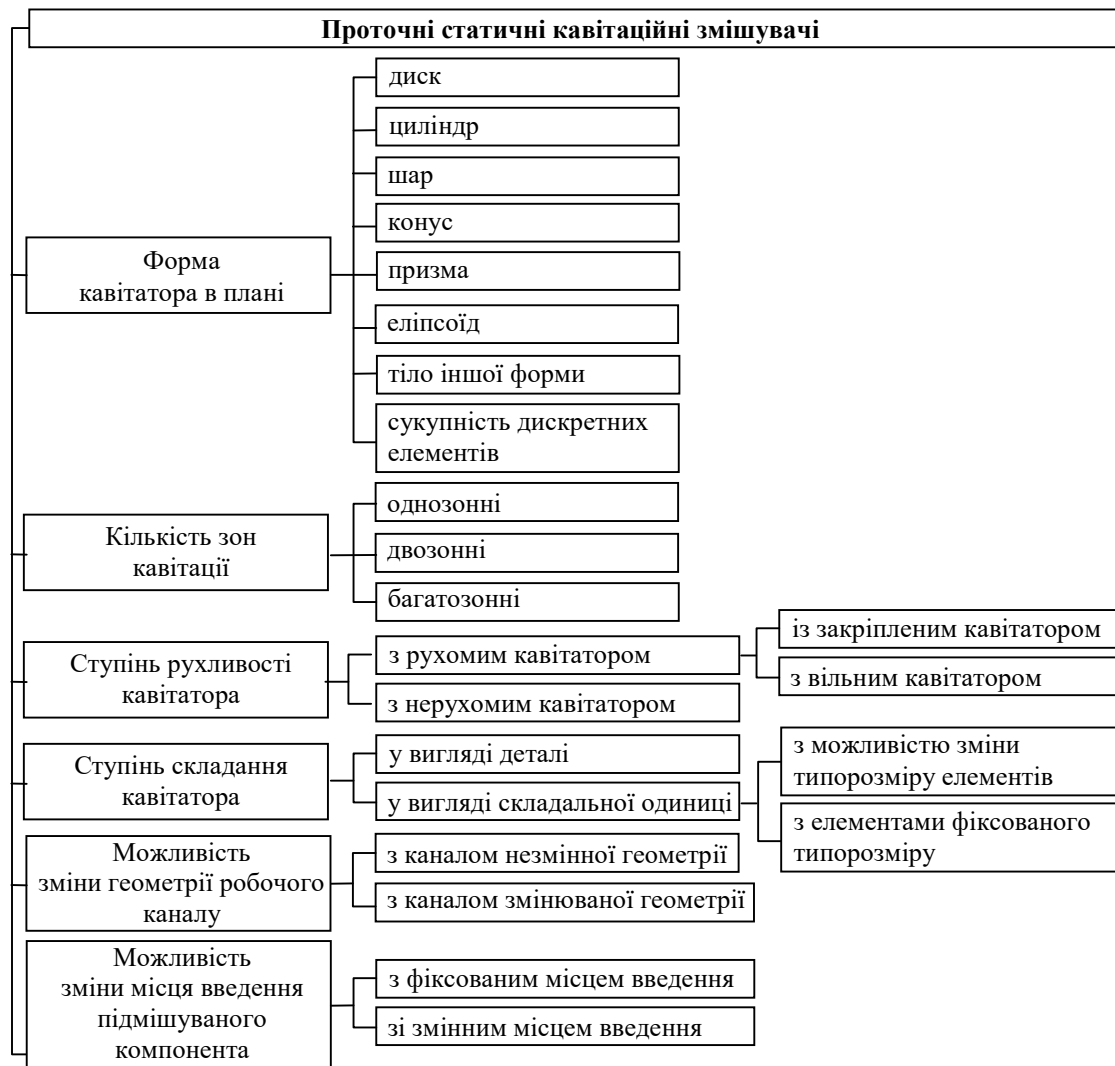


Рис. 3.1. Класифікація проточних статичних кавітаційних змішувачів [20]

Кавітатори у вигляді встановленої в циліндричному каналі кулі (пат. № RU2134611C1, UA90264U та UA94955U).

Кавітатор у вигляді встановленого в циліндричному каналі зрізаного конуса, що розширюється в напрямку потоку (пат. № RU268284C2).

Кавітатори аналогічної форми з численними поздовжніми циліндричними каналами (пат. № UA9648A, UA20323A RU2079350C1, RU2081688C1, RU2081689C1, RU2097408C1 і RU2105042C1).

Змішувач містить встановлений у циліндричному каналі кавітатор у вигляді зрізаного конуса, що розширюється в напрямку потоку, а також розташовану після кавітатора шайбу з конічним каналом, що звужується в напрямку потоку (пат. № UA1017C). Генеровані кавітатором бульбашки потрапляють у порожнину шайби, де внаслідок звуження каналу та збільшення швидкості потоку зростають у розмірах і схлопуються на виході з шайби.

Змішувач містить встановлений у циліндричному каналі кавітатор у вигляді зрізаного конуса, що розширюється в напрямку потоку, а також розташовану після кавітатора шайбу з безліччю наскрізних циліндричних отворів (пат. № SU1790558A3 та UA1035C).

На поверхні конічних кавітаторів виконано пази прямокутного (пат. № UA31086U та UA41126U) і трикутного (пат. № UA52855U) поперечного перерізу, що сходяться нанівець з боку меншої основи відповідного кавітатора і розташовані під гострим кутом відносно його поздовжньої осі. Зазначені пази сприяють утворенню спіралеподібної каверни.

Змішувач містить співвісно встановлену в циліндричному каналі перфоровану циліндричну оболонку з розміщеним у ній кавітатором у вигляді зрізаного конуса, що розширюється в напрямку потоку (пат. № UA1397C). Підсмоктувані крізь перфорацію всередину оболонки мікроструминки потоку взаємодіють з каверною після кавітатора та інтенсифікують процес змішування.

Кавітатор у вигляді правильної зрізаної чотирикутної піраміди з пазами трикутного поперечного перерізу на її бічних гранях, що сходяться нанівець з боку меншої основи піраміди (пат. № UA52856A).

Кавітатор з лобовою еліптичною частиною та плоскою тильною частиною, перпендикулярною поздовжній осі кавітатора (пат. № CN104591315A).

Кавітатор у вигляді обтічного тіла неправильної форми – кількох лопаток суперкавітуючого профілю (а. с. № SU1401667A1).

Кавітатор у вигляді закріплених на поздовжньому стрижні гвинтоподібних лопаток із загостреною передньою крайкою (пат. № UA44179A).

Кавітатор у вигляді закріплених на поздовжньому стрижні гвинтоподібних перфорованих лопаток із зовнішньою зубчастою гранню (пат. № UA52910U).

Кавітатор у вигляді встановленого в циліндричному каналі обтічного тіла з гладкою хвилеподібною твірною (пат. № RU2155633C2).

Кавітатор комбінованої форми у вигляді встановленого в циліндричному каналі порожнистого циліндра з конічною лобовою частиною (пат. № UA20265A).

Кавітатор комбінованої форми у вигляді встановленого в циліндричному каналі циліндра з конічною лобовою частиною та кільцевими проточками на бічній поверхні (пат. № UA51798U).

У циліндричному каналі встановлено конічний кавітатор і кільцевий відбійник, при цьому на бічній поверхні кавітатора та внутрішньої поверхні відбійника виконано проточки у вигляді шарового сегмента (пат. № UA11842U). Зазначені проточки утворюють відкрити з протилежних сторін сферичну порожнину, в якій виникає інтенсивне вихороутворення.

Конічний кавітатор з проточкою у вигляді кульового сегмента встановлений у конічному каналі (пат. № UA11842U). Кавітатор закріплений на порожнистому штоку, крізь який у проточку здійснюється подавання підмішуваного компонента.

Кавітатор у вигляді сукупності коротких штирів круглого поперечного перерізу (сукупності дискретних елементів), спрямованих вздовж радіуса робочої камери й закріплених на її внутрішній поверхні рівномірно по колу в одній або кількох діаметральних площинах (пат. № RU2419745C1).

Кавітатор у вигляді сукупності діаметральних стрижнів круглого поперечного перерізу, рівномірно в коловому напрямку закріплених на внутрішній поверхні робочої камери (пат. № UA1396C). Частину стрижнів виконано порожнистими з перфорованими стінками для подавання підмішуваного компонента.

За кількістю зон кавітації розрізняють одно-, дво- та багатозонні кавітатори.

У двозонному змішувачі першу зону кавітації утворено круглим диском з одним або більше наскрізними отворами, а другу – встановленим за диском конусом (пат. № EP2165745A1). Підмішуваний компонент надходить у першу та/або другу зону кавітації крізь канали в круглому диску та/або конусі.

Двоступінний змішувач містить розташований за ходом потоку суспензії конічний конфузور, ступінчастий канал прямокутного поперечного перерізу, а також конічний дифузور (пат. № KR101052838B1). У ступінчастому каналі послідовно встановлено два кавітатори у вигляді циліндрів, розташованих поперек каналу й повернутих на 90° один відносно одного.

У багатозонному змішувачі в порожнині змінного поперечного перерізу на поздовжньому порожнистому стрижні для підведення компонента одержуваної суміші послідовно встановлено декілька кавітаторів (пат. № EP1749564A2, заявка № US2007/041266A1; рис. 3.2). Кавітатори виконано у вигляді круглих дисків і зрізаних конусів, що утворюють зі стінками порожнини корпуса ділянки каналу у вигляді дифузорів і конфузорів. Недолік змішувача – великий гідравлічний опір, обумовлений наявністю першого кавітатора у вигляді увігнутої назустріч потоку ударної пластини.

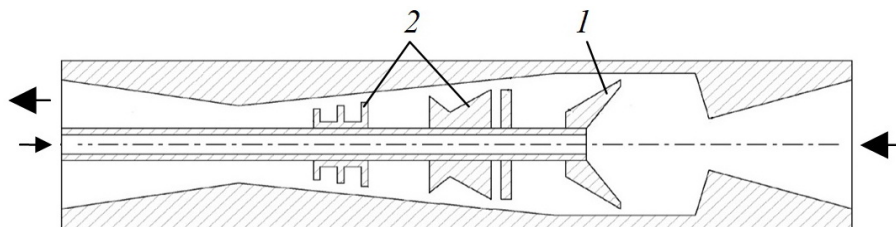


Рис. 3.2. Багатозонний змішувач з увігнутою ударною пластиною 1 і кавітаторами 2 різної форми (пат. № EP1749564A2)

Багатозонний змішувач, що містить розташовані в порожнині корпусу складної форми комплекти вбудованих кавітаторів, характеризується складністю у виготовленні та ремонті (пат. № EP2433706A1; рис. 3.3).

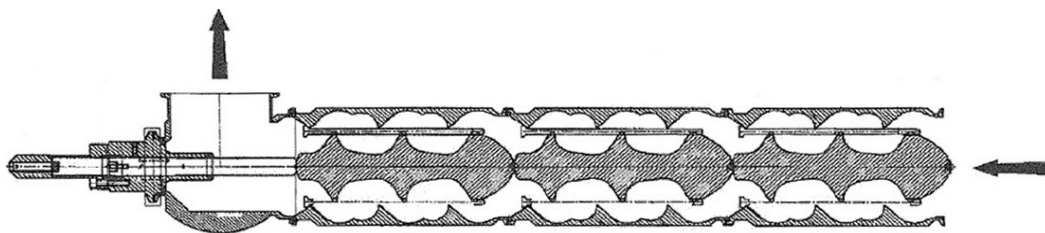


Рис. 3.3. Багатозонний змішувач (пат. № EP2433706A1)

У циліндричному каналі багатозонного змішувача в діаметральній площині закріплено кавітатори, виконані у вигляді зрізаних конусів різного кута конусності та закріплені великими основами на стінці каналу, а меншими – на загальній маточині (пат. № UA1394C і RU2032455C1). Під час обтікання кавітаторів утворюються безліч каверн, що взаємно впливають одна на одну й забезпечують пульсуючий характер змішування потоку.

Багатозонний змішувач містить розміщені в циліндричному каналі на рухомих коаксіальних штоках конічні кавітатори (пат. № UA1399C і RU2032456C1). Відносним переміщенням штоків в осьовому напрямку змінюють відстань між кавітаторами, регулюючи інтенсивність кавітації в кожній із зон. Недолік змішувача – необхідність ретельного ущільнення штоків у місцях їх проходження крізь стінку корпусу змішувача.

Багатозонний змішувач містить розміщені в циліндричному каналі конфузорно-дифузорні вставки, в дифузорній частині кожної з яких співвісно встановлено конічний кавітатор (пат. № UA15403A). Після кожного кавітатора передбачено введення компонента, підмішуваного до основного потоку.

За ступенем рухливості кавітатора в процесі роботи – з нерухомим і рухомих кавітатором (з вільним або закріпленим у робочій камері з можливістю руху).

Змішувач з рухомих кавітатором у вигляді кульки, вільно розміщеної в робочій камері (пат. № EP3725932A1; рис. 3.4). Кулька, що коливається під впливом потоку рідини, утворює канал Вентурі зі стінкою порожнини робочої камери, забезпечуючи інтенсивний змішувально-диспергувальний ефект.

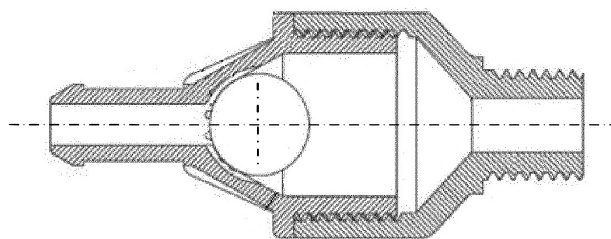


Рис. 3.4. Змішувач з коливнох кулькою (пат. № EP3725932A1)

Змішувач з рухомим кавітатором у вигляді кульки, вільно розміщеної між двома пружинами в циліндричній робочій камері (пат. № GB2348377A). Під впливом потоку кулька хаотично коливається.

Змішувач з рухомим кавітатором у вигляді двох дисків, підтиснутих пружинами на поздовжньому стрижні (пат. № UA70660U). Під впливом потоку диски здійснюють поворотно-поступальні коливання.

Змішувач з пакетом пружних круглих дисків, що утворюють конус, який розширюється в напрямку потоку (заявки № WO96/09112A1 і DE4433744A1; рис. 3.5). У перемішуваному потоці крім гідродинамічної кавітації реалізується також ультразвукова кавітація.

Кавітатори у вигляді круглого диска з розташованим за ним коливним язичком, що сприяє руйнуванню утворюється в потоці рідини каверни (пат. № CN104591315A та CN104591315A), а також у вигляді сфери, встановленої в циліндро-конічному каналі на радіальній осі з можливістю обертання під впливом потоку (пат. № CN107737563A).

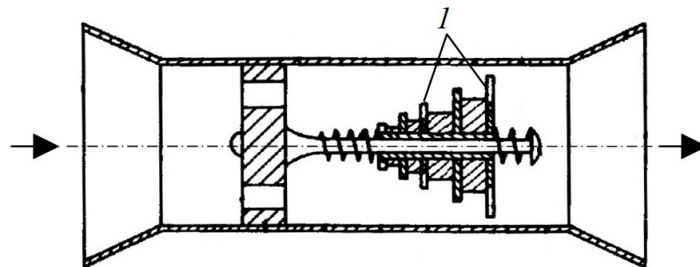


Рис. 3.5. Змішувач з вібруючими дисками I (заявки № WO96/09112A1 і DE4433744A1)

У вдосконаленому змішувачі поряд з обертовою сферою в робочій камері встановлено елементи, що під впливом потоку коливаються та ефективно руйнують каверну (пат. № CN107737563A).

Змішувач містить корпус з циліндричним каналом, а також встановлені в ньому з можливістю обертання в протилежних напрямках під впливом потоку дві крильчатки, при цьому одну з крильчаток змонтовано всередині іншої (а. с. № SU1718419A1).

За ступенем складання кавітатора – змішувачі з кавітатором у вигляді деталі та складальної одиниці.

Найбільш простими є кавітатори у вигляді деталі, що встановлюються переважно в змішувачах для оброблення певних середовищ. Аналогічне призначення мають і змішувачі з кавітаторами у вигляді складальної одиниці, що містить елементи фіксованого типорозміру.

Кавітатор у вигляді розташованого перпендикулярно до осі циліндричного каналу круглого диска з одним або більше наскрізними отворами (пат. № EP2165745A1). Незважаючи на очевидну перевагу – простоту конструкції, цей кавітатор характеризується високим гідравлічним опором.

Більш універсальними є кавітатори у вигляді складальної одиниці, що містить змінні елементи різного типорозміру. До таких конструкцій належить змішувач, що містить розширювану в напрямку руху потоку робочу камеру та встановлений у ній кавітатор (пат. № EP1280598A2, заявки № WO01/62373A1 та US2003/147303A1; рис. 3.6).

Кавітатор змонтовано на порожнистому поздовжньому стрижні для подавання одного з компонентів одержуваної суміші та виконаний у вигляді набору дисків різного діаметра з конічними периферійними частинами, а також розташованим за дисками елементом у вигляді обертового тіла складної форми. Заміною дисків, а також розташованих між ними дистанційних втулок забезпечують потрібну гідродинаміку в робочій камері змішувача. Недолік конструкції – складність виготовлення корпусу змішувача.

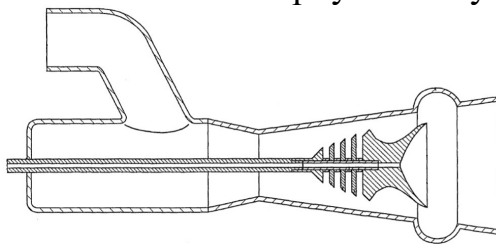


Рис. 3.6. Змішувач зі змінними робочими елементами різного типорозміру (пат. № EP1280598A2, заявки № WO01/62373A1 та US2003/147303A1)

За можливістю зміни геометрії робочого каналу – з каналом постійної та змінної геометрії.

Більшість статичних змішувачів мають канал постійної геометрії. Такі змішувачі характеризуються простотою конструкції та експлуатації, проте вони зазвичай призначені для обробки певних потоків.

Змішувач постійної геометрії містить встановлений уздовж осі циліндричного каналу кавітатор у вигляді порожнистого конуса для введення в основний потік підмішуваного компонента (пат. № RU2009709C1). Після кавітатора в каналі розміщено периферійний кільцевий і центральний дисковий відбивачі, що забезпечують багаторазову зміну руху потоку після кавітатора. Зазначений змішувач характеризується високим гідравлічним опором та інтенсивним зношуванням відбивачів.

Більш універсальними змішувачами, придатними для ефективного оброблення різних рідких систем, є змішувачі з каналом змінної геометрії.

Змішувачі з каналом змінної геометрії містять конус, розміщений на рухомому осьовому штоку в конічному дифузорному каналі (а.с. № SU781240A1, пат. № UA54917U). Осьовим переміщенням штока регулюють величину кільцевого простору між конусом і конічним каналом.

Змішувач містить виконаний з немагнітного матеріалу корпус з конічною порожниною, в якій розташовано кавітатор, виконаний з магнітного матеріалу у вигляді тіла обертання, а також пристрій для переміщення

кавітатора вздовж корпуса, виконаний у вигляді кільцевих електромагнітів, які охоплюють корпус (пат. № UA68821U; рис.2.7).

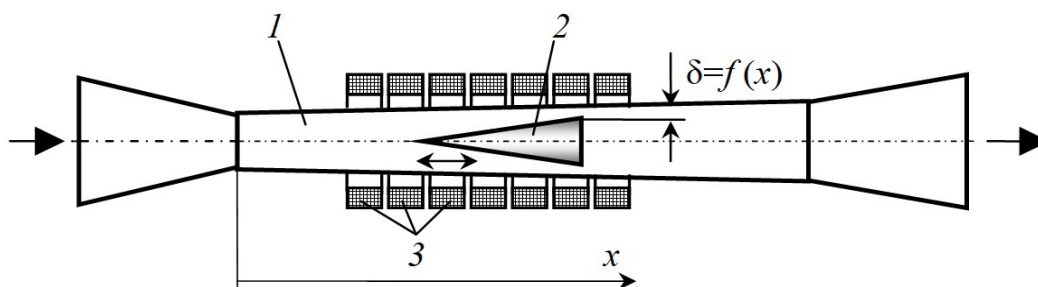


Рис. 3.7. Змішувач зі змінюваним перерізом кільцевого каналу між кавітатором і робочою камерою (пат. № UA68821U): 1 – конічна робоча камера; 2 – кавітатор; 3 – кільцеві електромагніти

Підключенням певних електромагнітів регулюють положення кавітатора по довжині корпуса, а отже й величину кільцевого проміжку між стінкою конічної порожнини й кавітатором. Перевага кавітатора – відсутність пристроїв для фіксації кавітатора, які розташовано в каналі та можуть змінювати гідродинаміку потоку.

У конічному каналі змішувача на поздовжньому штоку встановлено багатоступінчастий кавітатор у вигляді набору круглих дисків, при цьому шток забезпечено приводом осьового переміщення, що забезпечує регулювання кільцевих проміжків між елементами кавітатора й поверхнею робочої камери (заявка № DE102007056).

Корпус змішувача виконано телескопічним із закріпленими всередині кожної його секції кавітаторами (пат. № UA99790U). Під час розсування або зсуву секцій корпуса регулюють відстань між кавітаторами.

Тонкостінну робочу камеру змішувача виконано з кільцевими гофрами (пат. № UA99791U). Регулюючи довжину гофрованої робочої камери за допомогою різьбових стяжок, змінюють відстань між кавітаторами.

Змішувач містить корпус з циліндричною порожниною й розташований у ній кавітатор, при цьому в зазначеній порожнині розташовано рукавну еластичну оболонку, торці якої герметично закріплено на корпусі, а утворену корпусом і оболонкою кільцеву порожнину сполучено з пневмомагістраллю (пат. № UA10651; рис. 3.8). Змінюючи тиск у кільцевій порожнині, регулюють величину поперечного перерізу каналу змішувача.

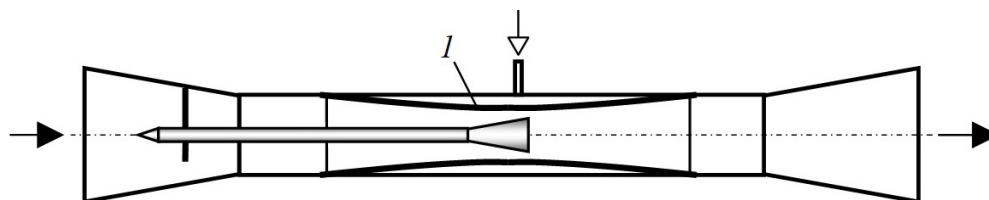


Рис. 3.8. Змішувач зі змінюваним перерізом кільцевого каналу між кавітатором і робочою камерою (пат. № UA106510U): 1 – рукавна еластична оболонка

Кавітатор виконано у вигляді встановлених на загальному стрижні набору круглих дисків, що утворюють спільний конус (пат. № CN105352704A). За взаємного розсування дисків кут конусності кавітатора зменшується, що дає змогу активно впливати на форму й розмір кавітаційної каверни.

Кавітатор у вигляді тіла обтічної форми із закріпленими на ньому лопатками суперкавітуючого профілю, при цьому вздовж осі кавітатора проходить рухомий порожнистий шток для введення в потік рідини підмішуваного компонента, а також закріплену на кінці порожнього штока конічну насадку, розміщену в межах конфузора робочої камери змішувача (а. с. № SU1401667A1). Змішувач забезпечує дві зони кавітації: першу з каналом постійної геометрії та другу – з каналом змінюваної геометрії.

За можливістю зміни місця введення підмішуваного компонента в основний потік – змішувачі з фіксованим і змінним місцем введення підмішуваного компонента.

Змішувач зі змінним місцем введення підмішуваного компонента: назустріч основному потоку або за його ходом (пат. № US7897121B1, заявка № WO2009/021148A1). Компонент вводиться крізь канал, виконаний у тримачі кавітатора, виконаного у вигляді кругового циліндра з конічними основами й розташованого вздовж осі робочої камери.

Незважаючи на значну кількість конструкцій статичних кавітаційних змішувачів, найбільш простими, ефективними й досить універсальними залишаються проточні змішувачі у вигляді відрізків трубопроводу з розміщеним у ньому щонайменше одним кавітатором у вигляді тіла обтічної форми. При цьому завдяки широким можливостям математичного моделювання традиційні проточні кавітатори продовжують активно вдосконалювати.

3.3. Роторно-дисккові змішувачі

У хімічній технології найбільш поширеним є механічне перемішування, за якого рух рідкого середовища в апараті забезпечують впливом на неї рухомого механічного робочого органу – мішалки [5, 6]. При цьому одними з найбільш ефективних механічних змішувачів для оброблення невеликих об'ємів рідини є гідродинамічні змішувачі, робочими органами яких є ротор і статор з перфорованими робочими елементами [18, 21].

Відносно простими й одночасно ефективними гідродинамічними змішувачами є роторно-дисккові змішувачі (РДС), які зазвичай представляють собою циліндричний корпус з розташованими на торцевих кришках впускним і випускним патрубками, а також співвісним з корпусом валом і перфорованими рухомими й нерухомими дисками, що чергуються між собою. Також РДС іноді називають роторно-імпульсними апаратами [22–25].

Основними перевагами РДС є їхня висока змішувальна та диспергувальна здатність, невисока енергоємність та в багатьох випадках можливість регулювання геометричних і швидкісних характеристик, а недоліком – відносна складність конструкції.

Останнім часом запропоновано нові конструкції РДС, деякі з яких за незначної зміни базової конструкції дають змогу істотно поліпшити процес перемішування.

Так, на відміну від більшості РДС з отворами, виконаними перпендикулярно поверхні рухомих і нерухомих дисків, отвори в дисках запропоновано виконувати під кутом відповідно плюс 45° та мінус 45° по відношенню до осі вала (пат. RU59441U, RU64943U, RU64944U та RU66228U). При цьому запропоновано не тільки конструкції змішувачів з одним валом (пат. RU59441U та RU66228U), але й двома співвісними валами, що проходять крізь обидві кришки змішувача (пат. RU64943U та RU64944U; рис. 3.9). Проте незначне підвищення ефективності перемішування в таких РДС забезпечується істотним ускладненням технології дисків.

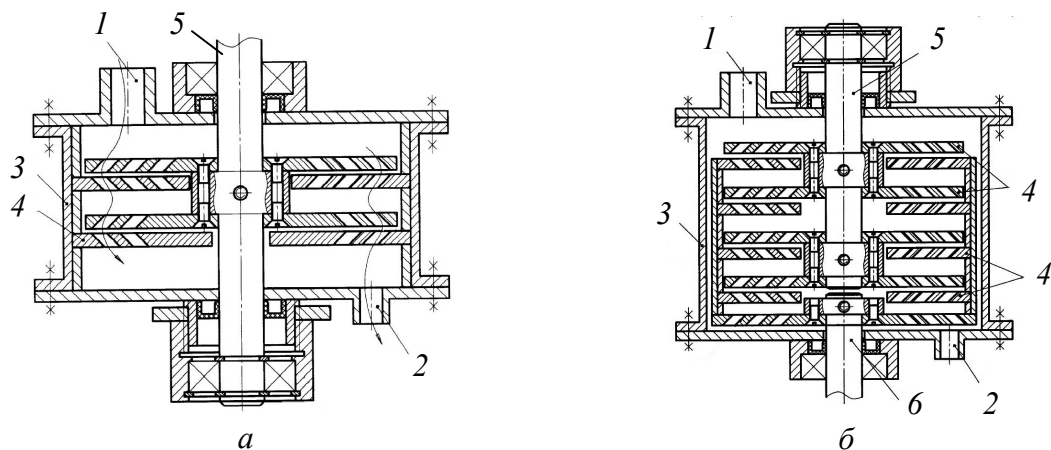


Рис. 3.9. Схема роторно-дисккових змішувачів:

a – пат. № RU59441U; *б* – пат. № RU64943U; 1, 2 – впускний і випускний патрубки;
3 – корпус; 4 – перфоровані диски; 5, 6 – вали з обертовими дисками

У РДС згідно з пат. № RU97060U обертові (роторні) та нерухомі (статорні) диски виконано не плоскими, а у вигляді перфорованих конічних оболонок (рис. 3.10). Таке виконання дисків підвищує інтенсивність перемішування (внаслідок збільшення їхніх робочих поверхонь), але одночасно й істотно ускладнює їх виготовлення.

Аналогічне рішення запропоновано й в пат. № UA31539U, в якому кожен з дисків виконано увігнутим (наприклад, параболічним) з боку кришки з впускним патрубком. Таке конструктивне виконання дисків підвищує швидкість проходження оброблюваної рідини крізь їхню перфорацію, а отже й інтенсифікує процес перемішування.

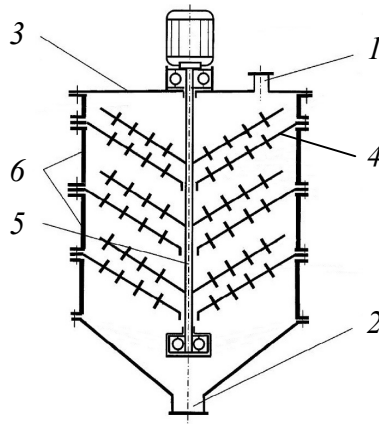


Рис. 3.10. Схема роторно-дискового змішувача (пат. № RU97060U):
1, 2 – впускний і випускний патрубки; 3 – корпус; 4 – перфоровані диски;
5 – вал з обертовими дисками; 6 – секції корпуса

У змішувачі згідно з пат. № RU2414286C1 отвори в рухомих і нерухомих дисках виконують по концентричних колах, при цьому розміри отворів та їх розташування підпорядковуються певним математичним залежностям (рис. 3.11, а). Автори зазначають, що запропоноване виконання отворів значно підвищує змішувальний і подрібнювальний ефект апарата. У той самий час виготовлення таких дисків можливе тільки з використанням широкого набору інструментів, а також складних верстатів та/або пристроїв до них.

Ще більш складна конструкція пропонується в пат. № RU2414287C1, в якому кожен отвір дисків ротора та статора виконано у вигляді сегмента кола, зрізаного двома концентричними колами, причому площа отворів на дисках ротора та їх розташування, як і в попередньому патенті, також підпорядковуються певним математичним залежностям (рис. 3.11, б).

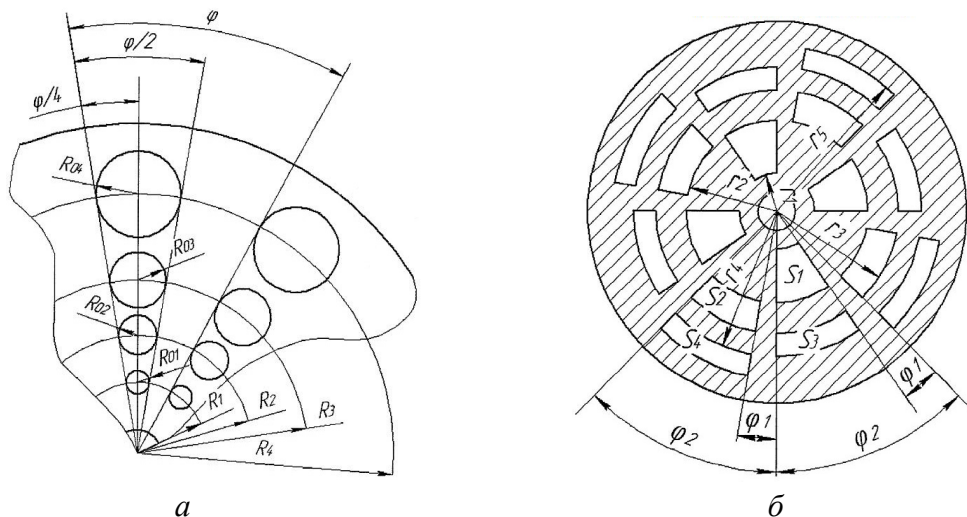


Рис. 3.11. Схема виконання отворів у дисках змішувача згідно з пат. № RU2414286C1 (а) і № RU2414287C1 (б) [18] (φ , r , R , S – геометричні параметри виконання отворів)

У змішувачі згідно з пат. № UA28973U щонайменше один вал виконано складеним із співвісних секцій, змонтованих з можливістю незалежного обертання одна відносно одної, при цьому обертові перфоровані диски розташовано на кожній із зазначених секцій (рис. 3.12). Регулюванням частоти обертання окремих рухомих дисків (або їх груп), а також напрямком їх обертання можна істотно впливати на гідродинаміку оброблюваної рідини.

У змішувачі згідно з пат. № UA29436U корпус виконано гнучким, а кришки з'єднано між собою різьбовими стяжками (рис. 3.13). При цьому корпус може бути виконано у вигляді сільфона, а кожна з різьбових стяжок – складеною із секцій (кількість секцій кожної зі стяжок відповідає кількості нерухомих перфорованих дисків).

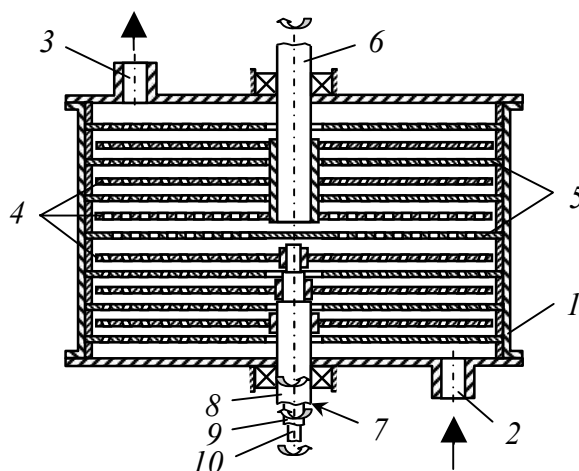


Рис. 3.12. Схема роторно-дискового змішувача згідно з пат. № UA28973U:
1 – корпус; 2, 3 – впускний і випускний патрубки; 4, 5 – перфоровані нерухомі й обертові диски; 6, 7 – вали з обертовими дисками; 8, 9, 10 – секції складеного вала 7

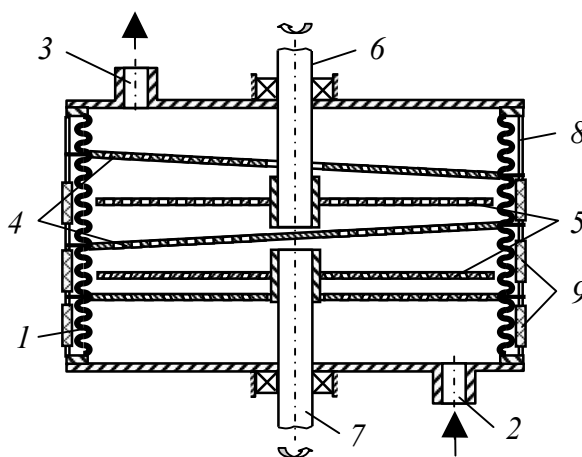


Рис. 3.13. Схема роторно-дискового змішувача згідно з пат. № UA29436U:
1 – гнучкий корпус; 2, 3 – впускний і випускний патрубки; 4, 5 – перфоровані нерухомі й обертові диски; 6, 7 – вали з обертовими дисками;
8 – гвинтова стяжка; 9 – секції гвинтової стяжки

Таке виконання апарата забезпечує можливість регулювання як відстані між нерухомими перфорованими дисками, так і величини кута їх нахилу відносно обертових дисків, при цьому забезпечується можливість незалежної зміни кута нахилу кожного з нерухомих дисків.

У змішувачі згідно з пат. № UA30055U щонайменше один ротор виконано з можливістю зворотно-поступального руху. Для цього зазначений ротор може бути оснащено, наприклад, циліндричним або конічним кулачком, виконаним у вигляді тіла обертання із замкненим пазом, в якому розміщено ролик, змонтований з можливістю обертання навколо нерухомої осі (рис. 3.14). Оброблювана рідина крізь впускний патрубок подається в корпус змішувача, після чого послідовно проходить крізь перфорацію рухомих і нерухомих дисків, піддаючись ефективному обробленню, після чого видаляється зі змішувача крізь випускний патрубок. При цьому залежно від властивостей оброблюваної рідини забезпечуються необхідні кутові швидкості роторів (їхніх секцій), напрями їх обертання, а також амплітуда й рівномірність осевого руху ротора протягом кожного його обороту (за рахунок конструктивного виконання кулачка).

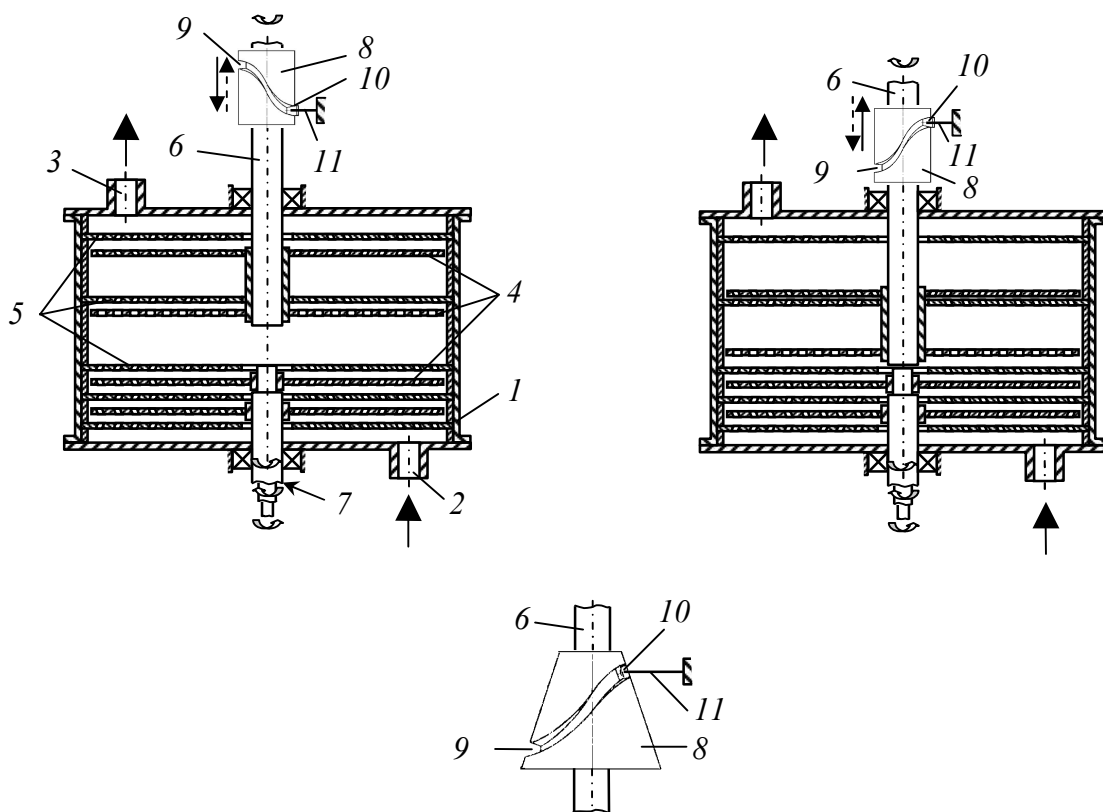


Рис. 3.14. Схема роторно-дискового змішувача згідно з пат. № UA30055U: 1 – корпус; 2, 3 – впускний і випускний патрубки; 4, 5 – перфоровані нерухомі й рухомі диски; 6, 7 – ротори з нерухомими дисками; 8 – кулачок; 9 – замкнений паз; 10 – ролик; 11 – нерухома вісь

Змішувачі згідно з пат. № UA30409U та UA50139U містять циліндричний корпус з кришками, оснащеними впускним і випускним патрубками, а також ротор з рухомими перфорованими дисками, які згруповано в пари, при цьому один диск кожної пари змонтовано на роторі жорстко, а другий – вільно. Змішувачі оснащено зубчастими колесами, кожне з яких змонтовано на закріпленій на корпусі осі, а рухомі перфоровані диски кожної пари – циліндричними (пат. № UA30409U) або еліптичними (пат. № UA50139U) лобовими зубчастими колесами, встановленими з можливістю взаємодії з одним із зубчастих коліс (рис. 3.15). При цьому, у разі виконання лобових коліс циліндричними, щонайменше одне з них може бути закріплене на відповідному диску з ексцентриситетом відносно його осі.

Групування рухомих перфорованих дисків у пари забезпечує обертання відповідних дисків у протилежних напрямках, що збільшує відносну швидкість обертання сусідніх дисків порівняно з традиційними змішувачами вдвічі. Закріплення ж щонайменше одного з циліндричних лобових коліс рухомих дисків на відповідному диску з ексцентриситетом відносно його осі (або виконання одного з лобових коліс еліптичним) забезпечує його нерівномірне обертання протягом кожного обороту вала. Таким чином, зазначені конструкції апаратів істотно розширюють клас перемішуваних рідин.

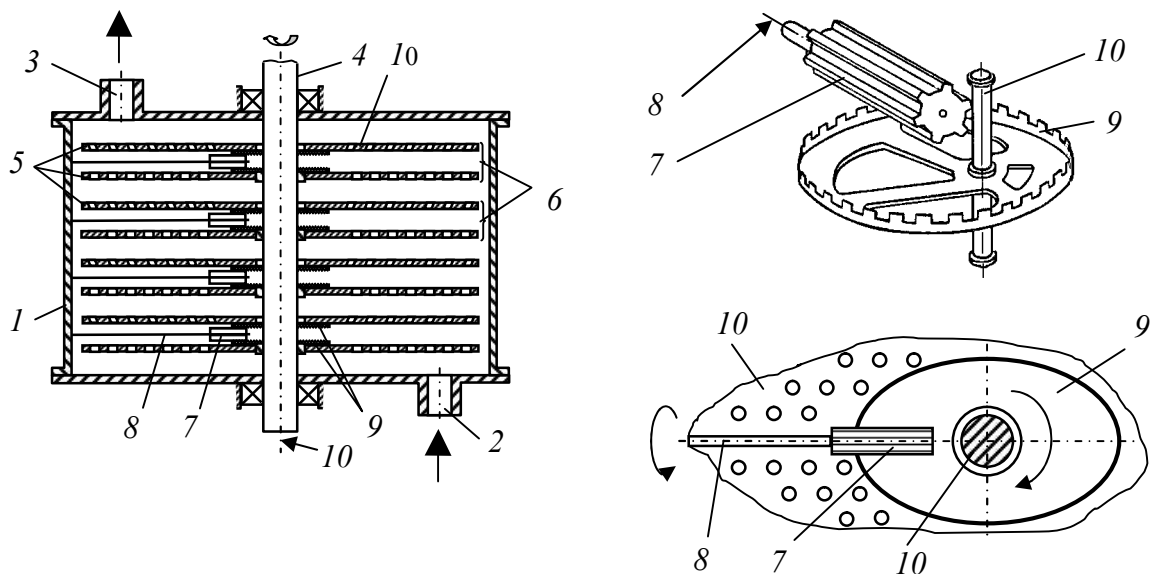


Рис. 3.15. Схеми роторно-дисккових змішувачів згідно з пат. № UA30409U (а) і UA50139U (б):
 1 – корпус; 2, 3 – впускний і випускний патрубки; 4 – ротор; 5 – рухомі перфоровані диски;
 6 – пари дисків; 7 – циліндричні зубчасті колеса; 8 – осі; 9 – лобові зубчасті колеса;
 10 – нерухома вісь

Змішувач згідно з пат. № UA31918U містить циліндричний корпус з двома кришками, оснащеними впускним і випускним патрубками, два ротори з рухомими перфорованими дисками, а також нерухомі перфоровані диски. Рухомі диски встановлено під кутом α до осі відповідного ротора. При цьому

зазначений кут може бути різним для кожного з рухомих перфорованих дисків (рис. 3.16). Недолік цього змішувача – низька динамічна збалансованість ротора за умови його високої частоти обертання.

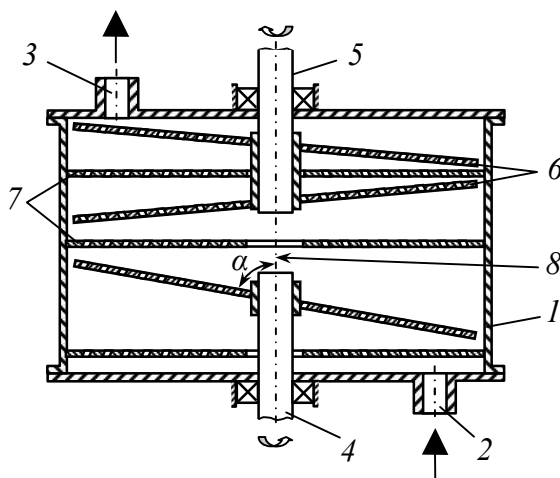


Рис. 3.16. Схема роторно-дискового змішувача згідно з пат. № UA31918U:
1 – корпус; 2, 3 – впускний і випускний патрубки; 4, 5 – ротори з нерухомими дисками;
6, 7 – перфоровані рухомі й нерухомі диски;; 8 – вісь ротора

У змішувачі згідно з пат. № UA53433U отвори перфорації кожного рухомого й сусіднього з ним нерухомого перфорованих дисків зміщено по радіусу на величину не більше радіуса отворів перфорації, а в змішувачі згідно з пат. № UA60844U отвори перфорованих дисків виконано у вигляді надрізів з відігнутими відносно площини диска пелюстками. У першому разі забезпечується ефективне руйнування дисперсних частинок (передусім волокнистих), що містяться в оброблюваній рідині, за рахунок їх плавного різання, а в другому – наявність пелюсток, які діють на рідину в міждискових проміжках, істотно підвищує змішувально-диспергувальну здатність змішувача.

Разом з однороторними змішувачами запропоновано й конструкцію двороторного апарата (пат. № RU2440176C1), що містить виконаний у поперечному перерізі у вигляді вісімки корпус з патрубками, а також два паралельних вала з перфорованими дисками, при цьому диски одного вала входять у міждискові проміжки іншого вала (рис. 3.17). Основні недоліки запропонованого змішувача – складність виготовлення порожнини корпусу та обслуговування апарата (особливо в разі потреби зміни міждискових проміжків).

Аналіз наведених конструкцій роторно-дискових змішувачів показує, що найбільш використовуваними є однороторні апарати з можливістю регулювання частоти обертання рухомих перфорованих дисків, а також можливістю зміни міждискових проміжків. Такий підхід забезпечує досить широкі технологічні можливості зазначених змішувачів за високої якості оброблення рідких середовищ широкої номенклатури.

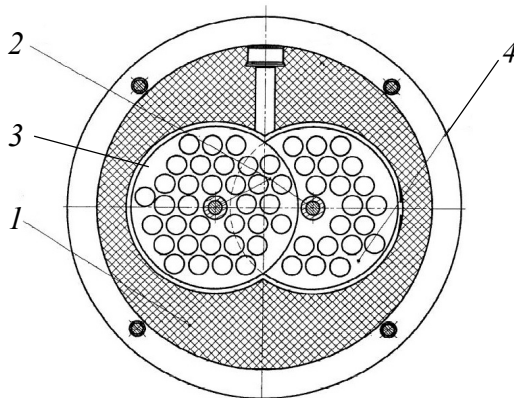


Рис. 3.17. Схема роторно-дискового змішувача згідно з пат. № RU2440176С1:
1 – корпус; 2 – вали; 3, 4 – перфоровані диски

3.4. Змішувачі з магнітними мішалками

Однією з проблем, що виникають під час експлуатації ємнісних апаратів з мішалками, є необхідність забезпечення надійної герметизації робочого простору апарата. Особливого значення ця проблема набуває в разі оброблення токсичних або високочистих середовищ [17].

Існує достатня кількість відповідних технічних рішень, одним з яких є використання апаратів, що містять вертикальний корпус з днищем з немагнітного матеріалу, виконаний з магнітного матеріалу приводний диск, встановлений на днищі та оснащений нижнім центральним опорним стрижнем. Привід диска виконано у вигляді рівномірно розташованих по колу під днищем електромагнітів, які послідовно з'єднують з джерелом живлення та вмикають імпульсно один за одним з певною частотою (а. с. № SU1726508A1; рис. 3.18).

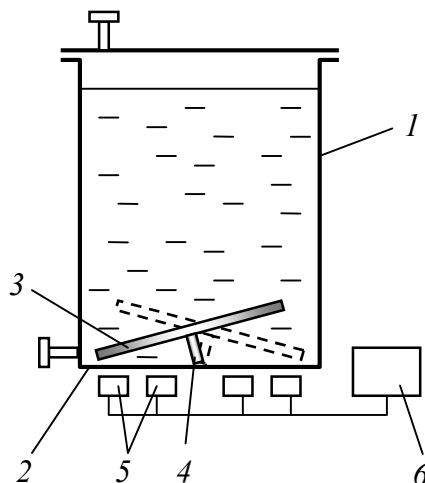


Рис. 3.18. Схема змішувача згідно з а. с. № SU1726508A1: 1 – корпус; 2 – днище; 3 – диск;
4 – центральний опорний стрижень; 5 – електромагніти; 6 – джерело живлення

Під час роботи цього апарата завдяки послідовному підключенню електромагнітів до джерела живлення диск безперервно обкочує днище навколо центрального опорного стрижня. Під час наближення певної ділянки диска до днища рідина, що перебуває між цією ділянкою та днищем, витискується з-під диска, забезпечуючи безперервне перемішування рідини в апараті.

Зазначений змішувач було неодноразово модернізовано. Зокрема було запропоновано диск виконувати перфорованим (пат. UA48207U). У цьому разі під час роботи змішувача рідина, що витискується з-під диска, у вигляді численних струменів частково проходить крізь отвори перфорації диска. При цьому, якщо при наближенні однієї з ділянок диска до днища рідина, що перебуває між цією ділянкою і днищем, частково проходить крізь отвори перфорації диска з простору під диском у простір над ним, то на діаметрально протилежній ділянці диска рідина проходить крізь відповідні отвори в протилежному напрямку, що додатково інтенсифікує процес перемішування.

У пат. № UA12120U зазначену базову конструкцію змішувача також удосконалено: диск змішувача оснащений не тільки центральним опорним стрижнем, але й протилежно розташованим йому центральним змішувальним стрижнем (рис. 3.19).

У пат. № UA45145U замість центрального змішувального стрижня із зазором відносно диска встановлено центральну циркуляційну трубу (рис. 3.20). Під час руху диска рідина, що перебуває в зазначеній трубі, під дією відцентрової сили викидається з її вершини, і таким чином рідина додатково перемішується за рахунок її безперервного висхідного руху крізь зазначену трубу.

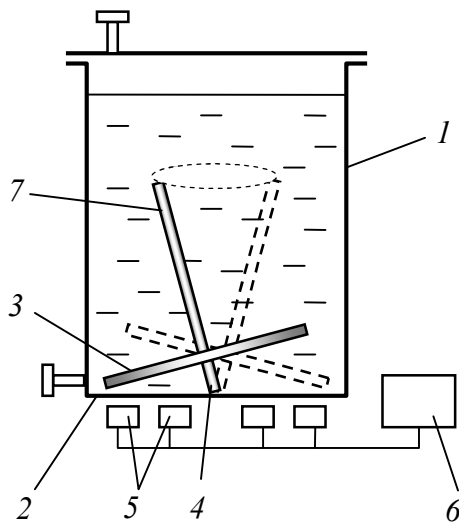


Рис. 3.19. Схема змішувача згідно з пат. № UA12120U: 1 – корпус; 2 – днище; 3 – диск; 4 – центральний опорний стрижень; 5 – електромагніти; 6 – джерело живлення; 7 – центральний змішувальний стрижень

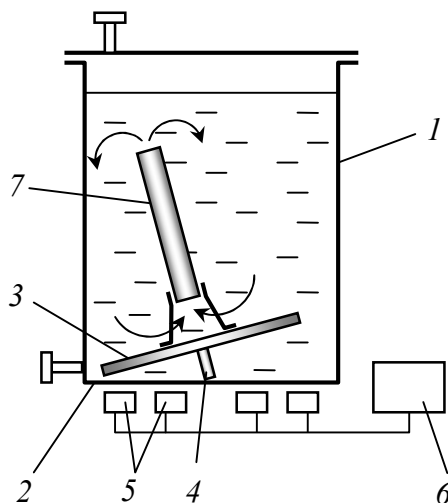


Рис. 3.20. Схема змішувача згідно з пат. № UA45145U: 1 – корпус; 2 – днище; 3 – диск; 4 – центральний опорний стрижень; 5 – електромагніти; 6 – джерело живлення; 7 – центральна циркуляційна труба

Також запропоновано змішувач, на центральному змішувальному стрижні якого розміщено щонайменше один додатковий диск з діаметром менше за діаметр основного диска. Додатковий диск сприяє перемішуванню рідини в її верхніх шарах (пат. № UA48209U; рис. 3.21).

У пат. № UA18912U описано змішувач з нижнім і верхнім центральними стрижнями регульованої довжини, зокрема телескопічними (рис. 3.22, а). Конструкція дає змогу змінювати амплітуду хитання диска зі змішувальним стрижнем (за рахунок регулювання довжини нижнього стрижня), а також об'єм рідини, на який впливає змішувальний стрижень (за рахунок регулювання його довжини).

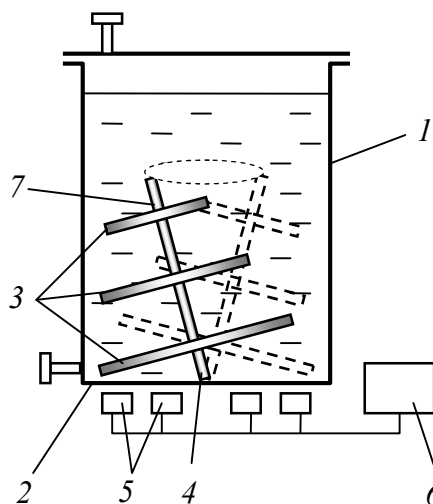


Рис. 3.21. Схема змішувача згідно з пат. № UA48209U: 1 – корпус; 2 – днище; 3 – диски; 4 – центральний опорний стрижень; 5 – електромагніти; 6 – джерело живлення; 7 – центральний змішувальний стрижень

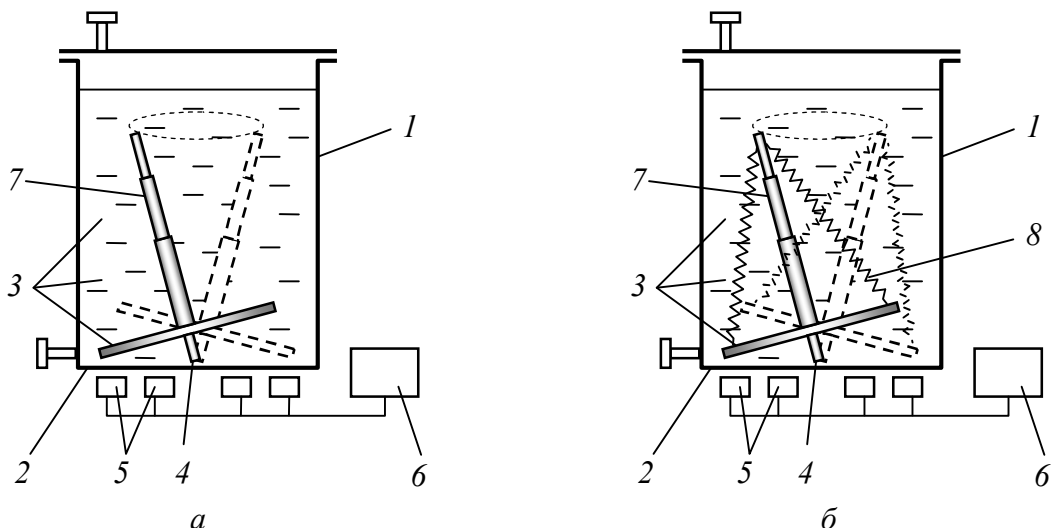


Рис. 3.22. Схема змішувачів згідно з пат. № UA18912U (а) та UA48552U (б):
 1 – корпус; 2 – днище; 3 – диск; 4 – центральний опорний стрижень; 5 – електромагніти;
 6 – джерело живлення; 7 – центральний змішувальний стрижень;
 8 – подовжені пружні елементи (пружини)

А в пат. № UA48552U запропоновано телескопічний змішувальний стрижень оснащувати декількома подовженими пружними елементами, один кінець кожного з яких закріплено на диску, а інший – на верхній ділянці змішувального стрижня (рис. 3.22, б). При цьому подовжені пружні елементи можуть бути виконано як пружини розтягування. Використання запропонованого апарата забезпечує вплив на рідину як диска й верхнього центрального стрижня, так і зазначених пружних елементів. При цьому зміна довжини верхнього центрального стрижня автоматично приводить і до відповідної зміни довжини пружних елементів, що спрощує обслуговування змішувача в цілому.

В апараті згідно з пат. № UA29483U разом з центральним змішувальним стрижнем по периферії диска рівномірно по колу встановлено додаткові стрижні, спрямовані в бік вершини центрального змішувального стрижня (рис. 3.23). Недолік цієї конструкції – відсутність регулювання довжини й кута нахилу додаткових стрижнів, що звужує технологічні можливості апарата.

У змішувачі згідно з пат. № UA29485U замість центрального змішувального стрижня на диску встановлено прямокутну або трапецієподібну пластину, яка інтенсифікує процес перемішування, оскільки значно збільшує площу змішувального елемента, який діє на рідину (рис. 3.24). Проте таке виконання змішувача впродовж кожного обороту диска призводить до значної нерівномірності навантаження, що діє на рухомий елемент (диск з пластиною), що може призвести до виникнення вібрацій, зміщення рухомого елемента та його контакту зі стінкою корпуса змішувача.

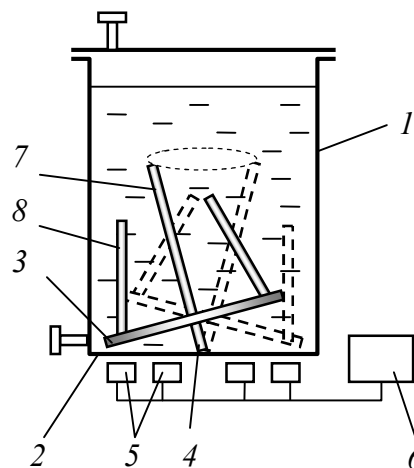


Рис. 3.23. Схема змішувача згідно з пат. № UA29483U: 1 – корпус; 2 – днище; 3 – диск; 4 – центральний опорний стрижень; 5 – електромагніти; 6 – джерело живлення; 7 – центральний змішувальний стрижень; 8 – периферійний змішувальний стрижень

Одним з основних недоліків зазначених змішувачів є можливість потрапляння перемішуваного середовища в проміжок між п'ятою нижнього центрального стрижня та днищем корпуса, що може призвести до механічної деструкції компонентів цього середовища. Тому було запропоновано апарати з верхнім підвісом стрижня з розміщеним на ньому диском, виконаним з магнітного матеріалу, причому електромагніти рівномірно розміщено по колу над кришкою, виготовленою з немагнітного матеріалу (пат. № UA40833U та UA60175U). При цьому в другому змішувачі (пат. № UA60175U; рис. 3.25) диск на стрижні закріплено за допомогою різьби, що дає змогу регулювати довжину верхньої ділянки стрижня, а отже й амплітуду хитання диска з центральним змішувальним стрижнем.

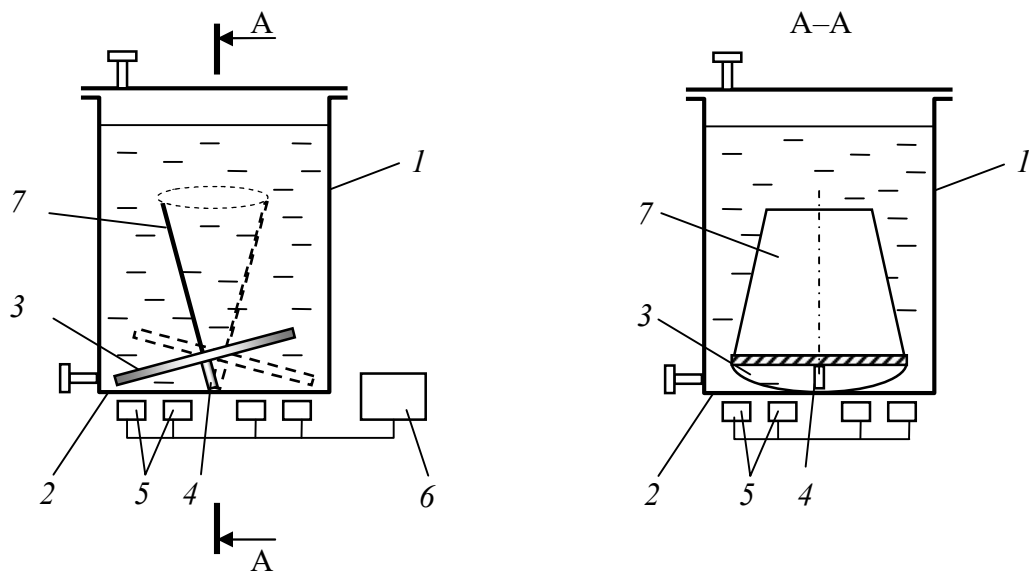
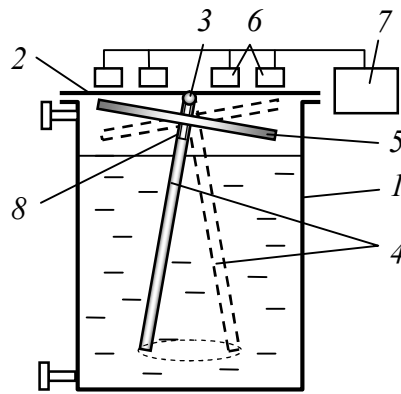
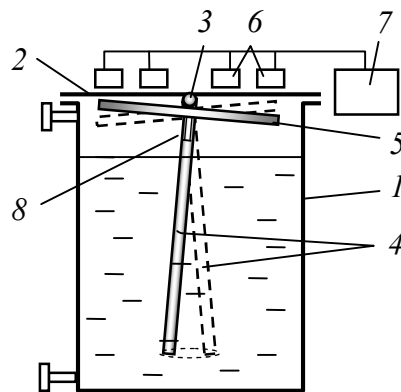


Рис. 3.24. Схема змішувача згідно з пат. № UA29485U: 1 – корпус; 2 – днище; 3 – диски; 4 – центральний опорний стрижень; 5 – електромагніти; 6 – джерело живлення; 7 – змішувальна пластина



a



б

Рис. 3.25. Схема змішувача згідно з пат. № UA60175U з регульованою амплітудою коливань диска (а, б): 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – шарнір; 4 – центральний стрижень; 5 – диск; 6 – електромагніти; 7 – джерело живлення; 8 – різьба

Розглянуті конструкції доводять, що за потреби для перемішування рідин можна відмовитися від традиційних роторних мішалок і використовувати конструкції змішувачів, в яких відсутній вал, що проходить крізь кришку їхнього корпуса (а отже й відповідне ущільнення вала).

3.5. Мішалки змінюваної робочої поверхні

Одним з найбільш поширених видів перемішування рідких середовищ у хімічній технології є механічне перемішування, що реалізується в оснащеному мішалками технологічному й допоміжному обладнанні [5, 6, 8, 9].

Незважаючи на значну різноманітність мішалок різних типів, найбільш затребуваними промисловістю є роторні мішалки. При цьому в більшості випадків зміна інтенсивності та ефективності процесу перемішування за допомогою роторних мішалок досягається регулюванням їхньої частоти обертання (у тому числі змінної й періодично повторюваної, як, наприклад, у пат. № UA30409U та UA50139U). Це характерно передусім для мішалок незмінної форми та/або розмірів. Однак також розроблено конструкції

роторних мішалок змінної форми та/або розмірів, що характеризуються більш широкими технологічними можливостями.

Аналіз конструктивного виконання роторних мішалок обладнання хімічних виробництв змінної форми та/або розмірів дає змогу запропонувати їх класифікацію за такими ознаками (рис. 3.26):

- можливістю зміни розмірів мішалки;
- можливістю зміни форми мішалки;
- ступенем рухливості робочих елементів під час роботи;
- ступенем жорсткості робочих елементів;
- можливістю зміни живого перерізу робочих елементів;
- наявністю додаткових функцій.



Рис. 3.26. Класифікація роторних мішалок змінної форми та/або розмірів [19]

За можливістю зміни розмірів розрізняють мішалки незмінних і змінних розмірів.

У пат. № UA60259U розглянуто мішалку, виконану у вигляді закріплених на валу двох дисків, які мають отвори для проходу оброблюваного середовища і з'єднані між собою жорсткими поздовжніми елементами, при цьому між зазначеними дисками з отворами на валу встановлено суцільний диск (рис. 3.27). Зміною положення суцільного диска на валу можна регулювати інтенсивність циркуляції середовища у верхній і нижній частинах апарата.

У пат. № UA60260U описано ще одну мішалку, виконану у вигляді закріплених на валу двох обойм (у вигляді дисків або лопатей), з'єднаних між собою поздовжніми елементами, при цьому одну з обойм встановлено на валу з можливістю зміни її положення по його довжині, а поздовжні елементи виконано телескопічними. Регулюванням відстані між обоймами можна змінювати об'єм оброблюваного середовища, на який активно діють поздовжні елементи мішалки.

У пат. № UA60780U розглянуто конструкцію апарата для перемішування рідин, що містить корпус, вертикальний вал з гребінчастою мішалкою, а також закріплений на корпусі нерухомий гребінець, при цьому пластини гребінчастої мішалки розміщено з можливістю проходження крізь проміжки, утворені пластинами нерухомого гребеня, кожену пластину якого встановлено з можливістю повороту навколо її подовжньої осі (рис. 3.28). Індивідуальним поворотом кожної пластини нерухомого гребеня досягається бажана гідродинаміка рідини в апараті.

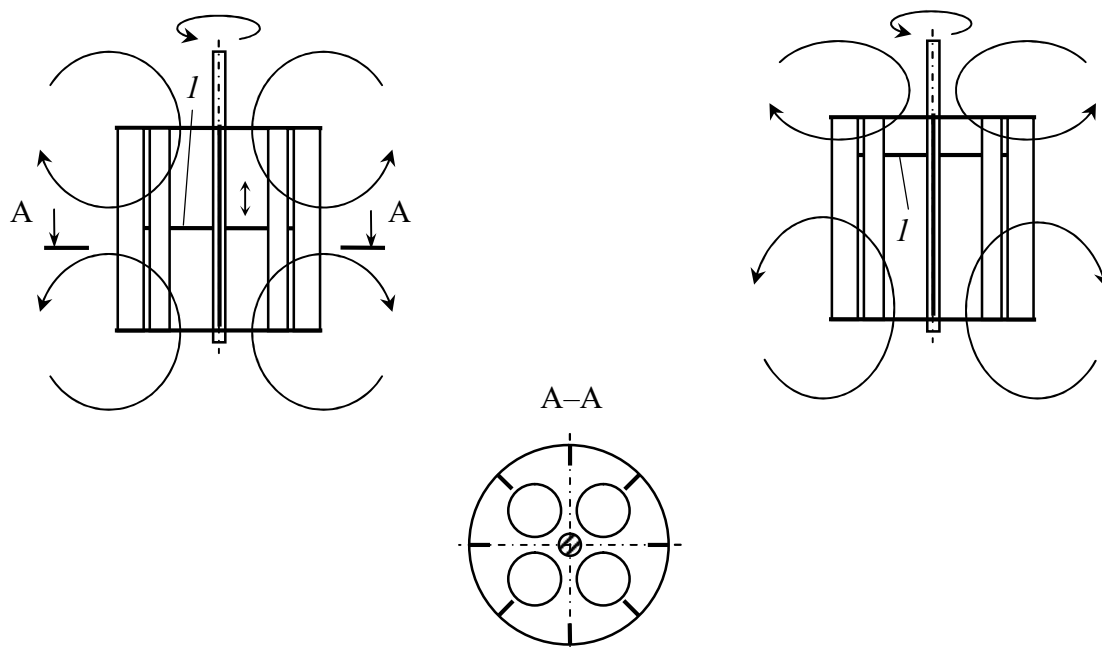


Рис. 3.27. Схема роботи мішалки згідно з пат. № UA60259U за різного положення суцільного середнього диска I

У пат. № UA61281U описано листову мішалку, що містить вертикальний вал із встановленими на ньому в одній площині двома листовими лопатями. Кожну з лопатей по товщині виконано з двох частин, встановлених з можливістю відносного переміщення вздовж вертикального вала та фіксації в потрібному положенні (рис. 3.29). За відносного зсуву частин кожної з лопатей змінюється об'єм рідини, на який активно діє мішалка.

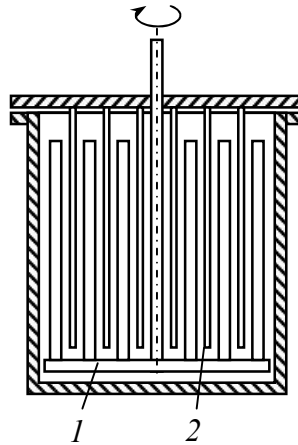


Рис. 3.28. Апарат з мішалкою згідно з пат. № UA60780U:
1 – гребінчаста мішалка; 2 – нерухомий гребінь

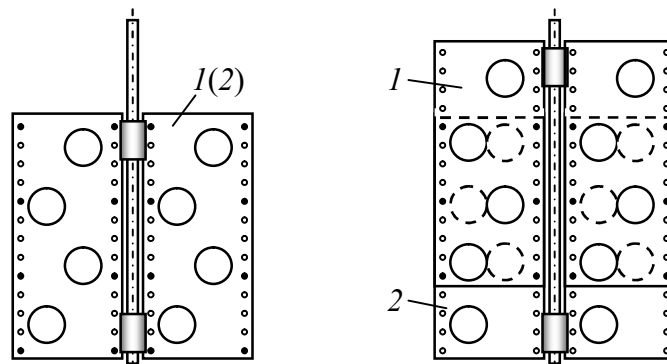


Рис. 3.29. Апарат з мішалкою згідно з пат. № UA61281U:
1, 2 – частини лопаті

У пат. № UA65292U описано листову мішалку, що містить вертикальний вал зі змонтованими на ньому в одній площині двома лопатями у вигляді листів з отворами, при цьому кожна лопать по товщині виконано з двох частин, встановлених з проміжком одна відносно одної. При зміні величини й форми проміжків між частинами відповідної лопаті досягають бажаної гідродинаміки рідини, що перемішується в апараті (рис. 3.30).

У пат. № UA68866U описано змішувальний пристрій, що містить вертикальний вал зі змонтованою в його нижній частині стаціонарною мішалкою, а також закріплену на втулці мішалку з позитивною плавучістю. Зазначену втулку розміщено на валу з можливістю вільного переміщення вздовж нього та спільного обертання разом з валом (рис. 3.31). Під час роботи пристрою мішалка з позитивною плавучістю розташовується лише на рівні вільної поверхні рідини незалежно від її об'єму в апараті. При цьому крутний момент від вала через втулку передається на мішалку з позитивною плавучістю, яка ефективно перемішує шари рідини поблизу її вільної поверхні. Таким чином, забезпечується ефективне оброблення всього об'єму рідини в апараті.

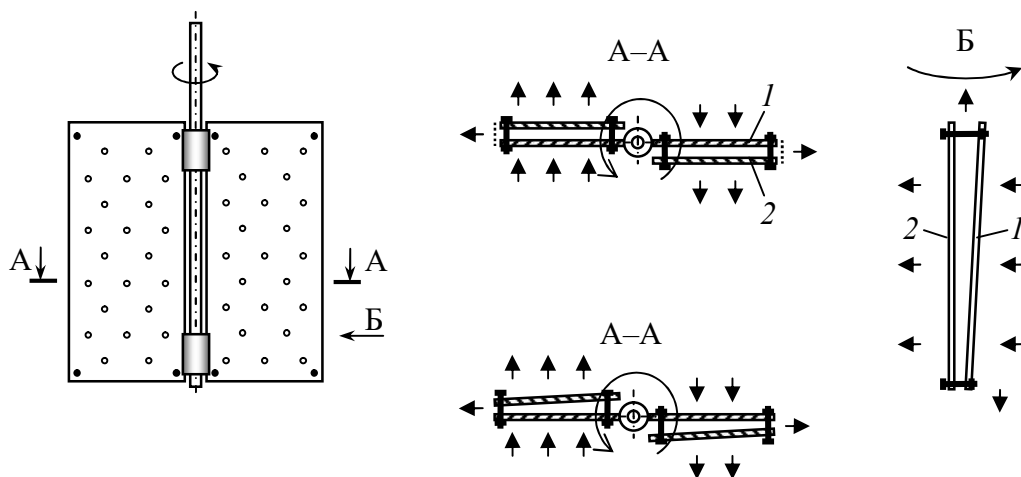


Рис. 3.30. Апарат з мішалкою згідно з пат. № UA65292U: 1, 2 – частини лопаті

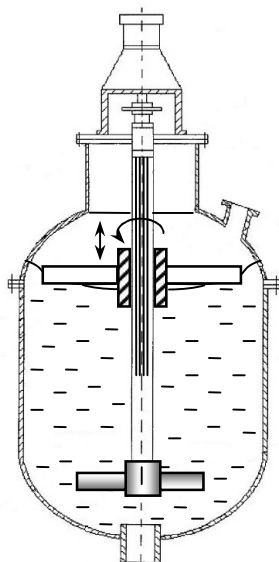


Рис. 3.31. Апарат з мішалкою згідно з пат. № UA68866U

У пат. № UA78566U запропоновано конструкцію листової мішалки, що містить вертикальний вал із встановленими на ньому двома втулками з горизонтальними тримачами. При цьому одну з втулок встановлено з можливістю повороту навколо валу й фіксацією в потрібному положенні, а на тримачах закріплено листові лопаті, виготовлені з еластичного матеріалу, наприклад, з гуми на основі силіконового каучуку, що характеризується високою міцністю, а також хімічною, механічною та термічною стійкістю (рис. 3.32). Залежно від потрібного насосного ефекту в апараті тримачі повертають один відносно одного на кут α . У результаті відносного повороту втулок обидві листові лопаті завдяки їхній еластичності з вертикальних перетворюються на гвинтові, внаслідок чого під час обертання валу встановлюється рух рідини не тільки в радіальному, але й у вертикальному напрямку.

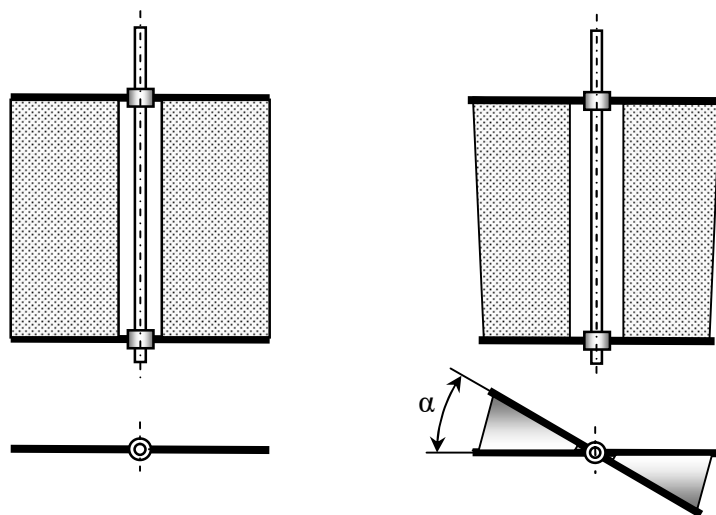


Рис. 3.32. Апарат з мішалкою згідно з пат. № UA78566U

У заявці № US2018/110372A1 описано мішалку, виконану у вигляді закріпленої на вертикальному валу гофрованої поперечної стрічки, яка може змінювати свою довжину (і відповідно висоту гофрів) залежно від частоти обертання вала, відстані до стінок і днища апарата, а також властивостей перемішуваної рідини.

За можливістю зміни форми розрізняють мішалки незмінної та змінюваної форми.

У пат. № UA75524U описано апарат для перемішування рідин, що містить корпус з патрубками, вертикальний вал з мішалкою у вигляді трубок, з'єднаних з вертикальним валом за допомогою стрижнів і встановлених з можливістю регулювання їхнього нахилу відносно вертикального вала (рис. 3.33).

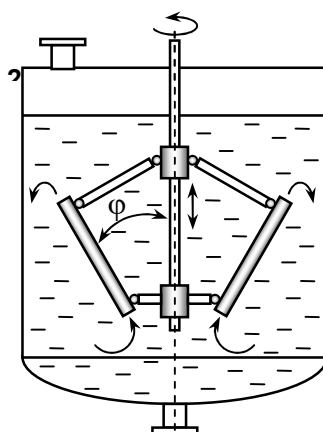


Рис. 3.33. Апарат з мішалкою згідно з пат. № UA75524U

Під час обертання вертикального вала завдяки нахилу трубок рідина, що перебуває в трубках, під дією відцентрової сили викидається з віддалених від вала їхніх кінців. Одночасно завдяки нерозривності потоку рідини її нова порція крізь наближені до вала кінці трубок всмоктується в них. Таким чином,

здійснюється циркуляція рідини в корпусі апарата, інтенсивність якої зростає зі збільшенням кута нахилу φ трубок до вертикального вала.

У пат. № UA78540U описано мішалку, що містить вертикальний вал із сукупністю розміщених на ньому попарно горизонтальних плоских лопатей, при цьому кожну пару зазначених лопатей закріплено на окремій втулці з можливістю контакту з сусідніми лопатями. Кожну лопать встановлено з можливістю повороту відносно її поздовжньої осі, а кожну втулку – з можливістю повороту навколо вала з фіксацією в потрібному положенні (рис. 3.34). Залежно від властивостей перемішуваної рідини за рахунок взаємного розташування лопатей і втулок забезпечують необхідний тип мішалки: листову, багатолопатевою або гвинтовою. Також поворотом сусідніх (вздовж вала) лопатей на кут α відносно вертикалі можна не тільки забезпечувати потрібний насосний ефект мішалки, але й утворювати між ними щілини для ефективного диспергування компонентів перемішуваної рідини.

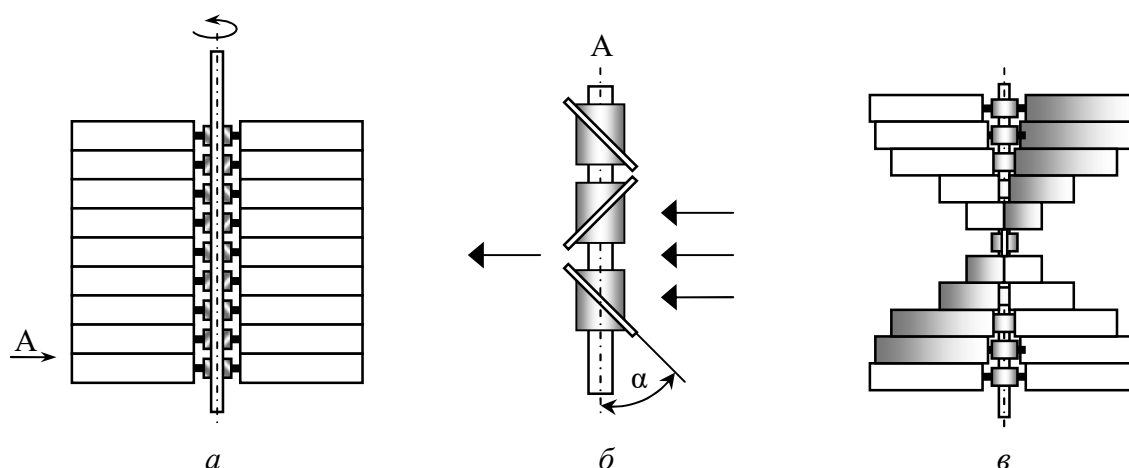


Рис. 3.34. Апарат з мішалкою згідно з пат. № UA78540U:
а – листовою; б – багатолопатевою; в – гвинтовою

Мішалку змінних розмірів та форми описано в пат. № UA93188U. Ця мішалка містить вертикальний вал з шарнірно закріпленими на ньому на двох рівнях поперечними лопатями, кінці яких шарнірно з'єднано поздовжніми лопатями, причому поперечні лопаті встановлено з можливістю їх фіксації в потрібному положенні. При цьому поздовжні й поперечні лопаті виконано регульованої довжини, наприклад телескопічними (рис. 3.35). Залежно від властивостей перемішуваної рідини й необхідного гідродинамічного режиму в апараті зміною кута повороту поперечних лопатей, а також зміною довжини поздовжніх та/або поперечних лопатей надають мішалці потрібні розміри й форму, після чого вмикають привод вала мішалки та здійснюють перемішування рідини в апараті.

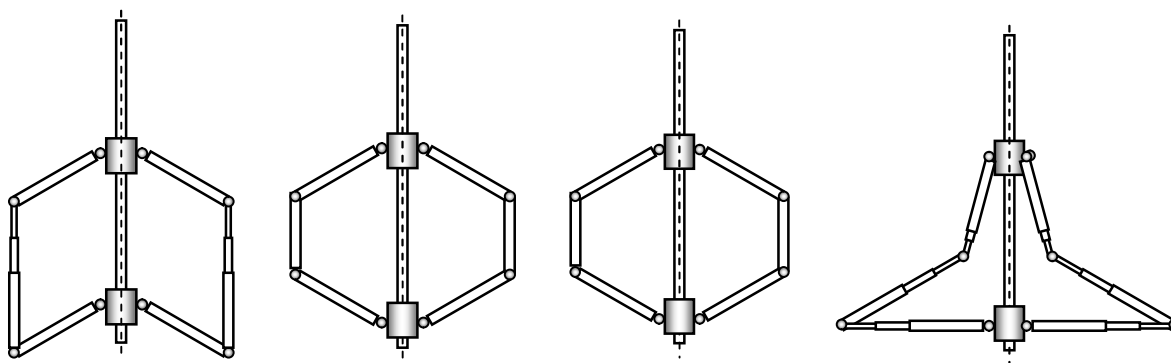


Рис. 3.35. Варіанти мішалки згідно з пат. № UA93188U

Ще одну мішалку змінних розмірів та форми запропоновано в пат. № UA105210U. Ця мішалка містить сукупність стрижнів, закріплених своїми кінцями на вертикальному валу за допомогою шарнірів, причому нижні та/або верхні кінці стрижнів закріплено на втулці, змонтованій на валу з можливістю переміщення вздовж нього й фіксації в потрібному положенні. Нижні та верхні кінці стрижнів розташовано рівномірно з утворенням літер W із замкненими кінцями, при цьому зазначені букви W повернуто одна до одної своїми основами (рис. 3.36). Залежно від діаметра апарата та властивостей оброблюваної в ньому рідини втулки встановлюють на валу на потрібній відстані одна від одної й фіксують їх. При цьому стрижні вигинаються на відповідну величину, формуючи мішалку відповідного діаметра. Завдяки розташуванню нижніх і верхніх кінців стрижнів рівномірно з утворенням літер W із замкненими кінцями мішалкою перекривається весь простір між стрижнями та валом, що підвищує ефективність перемішування рідини.

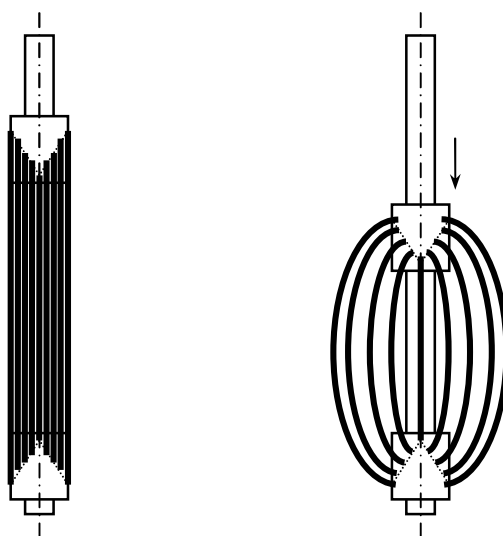


Рис. 3.36. Варіанти мішалки згідно з пат. № UA93188U

Мішалка змінних розмірів і форми, описана в пат. № UA132161U, містить вал із закріпленими на ньому лопатями, щонайменше на одній з яких

шарнірно з можливістю повороту в її площині й фіксації в потрібному положенні закріплено щонайменше одну додаткову лопать (рис. 3.37).

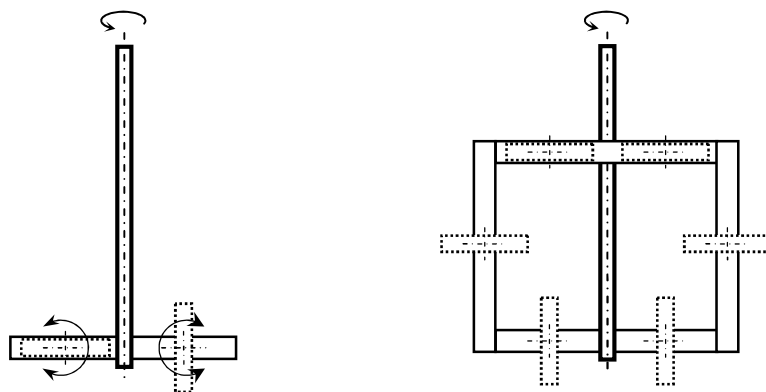


Рис. 3.37. Варіанти мішалки згідно з пат. № UA132161U

У пат. № UA132177U запропоновано конструкцію мішалки, що містить сукупність розміщених попарно горизонтальних і вертикальних плоских лопатей, при цьому між сусідніми лопатями встановлено листовий елемент з можливістю повороту його відносно горизонтальної та/або вертикальної осі та фіксації в потрібному положенні (рис. 3.38).

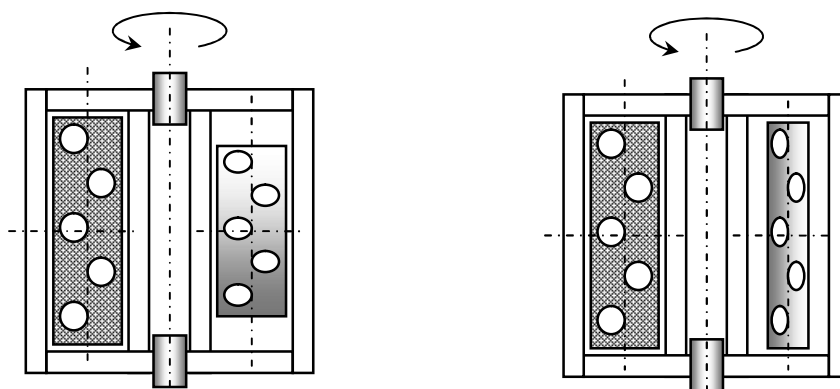


Рис. 3.38. Варіанти мішалки згідно з пат. № UA132177U

Конструкція відповідно до пат. № UA47081U також дає змогу змінювати геометрію лопатевої мішалки навіть під час її роботи. Робочі елементи цієї мішалки виконано у вигляді Х-подібних лопатей, один з кінців кожної з яких шарнірно закріплено на валу, а інший – на повзуні. Також зазначену мішалку може бути оснащено додатковими парами Х-подібних лопатей, на кінцях кожної з яких встановлено вертикальну лопать з отвором і щілиною в місцях розташування шарнірів (рис. 3.39).

У заявці № DE102016114735A1 запропоновано пристрій, що містить вертикальний вал зі змонтованою в його нижній частині втулкою з гніздами, в яких закріплено вигнуті стрижні зі змішувальними елементами на кінцях (рис. 3.40). Кожен із вигнутих стрижнів може бути повернуто навколо

подовжньої осі відповідного гнізда втулки й зафіксований в потрібному положенні. Таким чином, можна змінювати положення змішувальних елементів у просторі й забезпечувати ефективне оброблення рідини залежно від її властивостей.

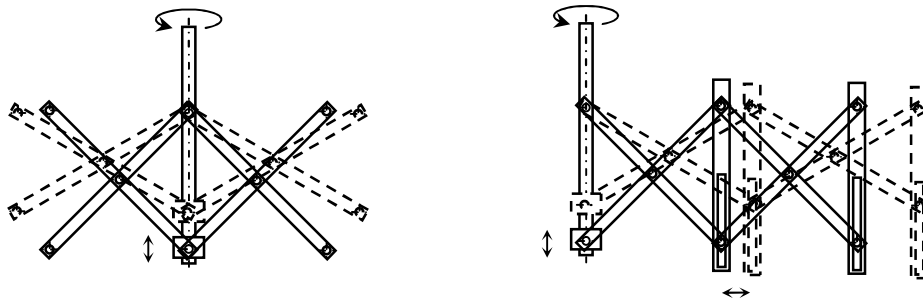


Рис. 3.39. Лопатева мішалка згідно з пат. № UA47081U

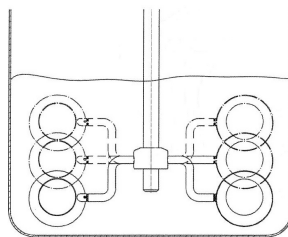


Рис. 3.40. Апарат з мішалкою згідно із заявкою № DE102016114735A1

За ступенем рухливості робочих елементів під час роботи розрізняють мішалки з нерухомими та рухомими елементами (відносно інших елементів мішалки).

Мішалки з нерухомими під час її роботи елементами вирізняються не тільки широкими технологічними можливостями, а й високою надійністю.

Наприклад, в а. с. № SU386652A1 описано рамну мішалку, поперечні лопаті якої шарнірно закріплено на вертикальному валу з можливістю повороту у вертикальній площині й складання догори (рис. 3.41). Така конструкція значно полегшує розміщення мішалки в апараті, а також її вилучення з нього (у складеному стані крізь верхній люк апарата). Після розміщення мішалки в апараті під дією сили тяжіння її поперечні лопаті повертаються донизу, і мішалка набуває своєї робочої форми у вигляді двох ромбів або паралелограмів, загальна ширина яких більша за діаметр верхнього монтажного люка апарата.

У той самий час мішалки з рухомими під час її роботи елементами часто використовують для зниження пускових навантажень і зниження енергоємності перемішувального пристрою. Такі мішалки в нерухомому стані часто характеризуються малим моментом опору, що поступово зростає зі збільшенням частоти обертання вала мішалки.

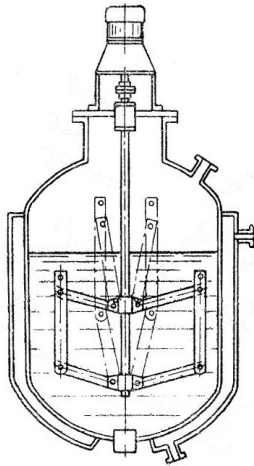


Рис. 3.41. Лопатева мішалка згідно з пат. № UA102233U

До таких мішалок можна віднести конструкції з робочими елементами, що повертаються (зазвичай поворотно-підйомними) під дією відцентрової сили у вертикальній площині, а також розсуваються в радіальному напрямку.

Мішалку з поворотно-підйомними лопатями, що забезпечує знижене пускове навантаження на приводний електродвигун, запропоновано в пат. № US3455540A (рис. 3.42). При обертанні валу лопаті поступово займають горизонтальне положення, забезпечуючи ефективне перемішування рідини.

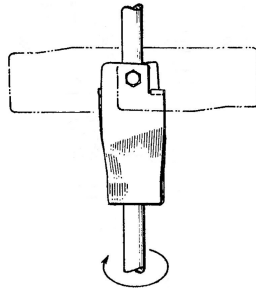


Рис. 3.42. Мішалка згідно з пат. № US3455540A

Мішалку аналогічного принципу дії описано у пат. № UA102233U. Зазначену мішалку виконано у вигляді двох паралельно закріплених на вертикальному валу горизонтальних лопатей, між якими на рознесених по радіусу та висоті осях підвішено поворотні лопаті (рис. 3.43). Під час обертання вала лопаті поступово займають горизонтальне положення, ефективно впливаючи на оброблювану рідину.

Ще одну подібну мішалку розглянуто в пат. № UA34301U. Відмінність зазначеної мішалки від попередньої конструкції полягає в тому, що поворотні елементи (стрижні) рівномірно по колу закріплені на диску (рис. 3.44). При цьому стрижні додатково з'єднано з валом за допомогою пружин розтягування, що дають змогу регулювати ступінь відхилення стрижнів від вертикалі не тільки за рахунок частоти обертання вала, але й жорсткості пружин.

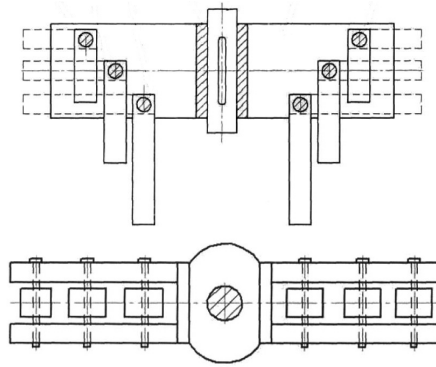


Рис. 3.43. Лопатева мішалка згідно з пат. № UA102233U

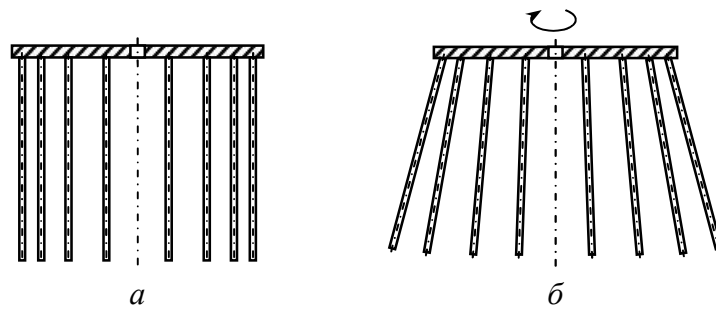


Рис. 3.44. Лопатева мішалка згідно з пат. № UA34301U: *а* – вихідне положення стрижнів; *б* – положення стрижнів під час роботи мішалки

Більш складну конструкцію з поворотними у вертикальній площині робочими елементами описано в а. с. № SU1535611A1.

В а. с. № SU381375A1 описано ще одну мішалку зі зниженим пусковим навантаженням на привід. Нижню пару лопатей цієї мішалки шарнірно закріплено на валу й за допомогою тяг з'єднано з вищерозташованою парою горизонтальних лопатей, встановлених на рухомій вздовж вала втулці-поплавку (втулці з позитивною плавучістю) (рис. 3.45).

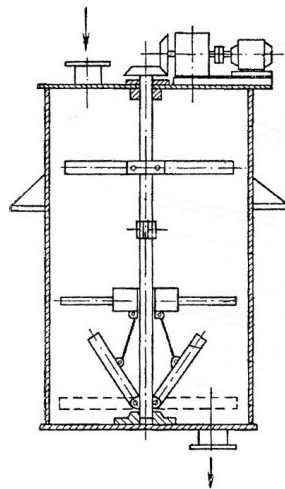


Рис. 3.45. Лопатева мішалка згідно з а. с. № SU381375A1

На початку роботи втулка-поплавок перебуває в крайньому верхньому положенні, що забезпечує максимальне примикання нижніх шарнірних лопатей до валу. Після вмикання приводу вал поступово збільшує свої оберти, а нижні шарнірні лопаті під дією відцентрової сили набувають горизонтального положення.

В а. с. № SU1720697A1 описано аналогічну мішалку з парою лопатей, які «розкриваються», шарнірно закріплені на валу й за допомогою тяг з'єднані зі встановленою на валу шліцьовою втулкою, оснащеною механізмом її примусового переміщення вздовж вала. Така конструкція забезпечує регульовану ступінь «розкриття» лопатей незалежно від частоти обертання вала.

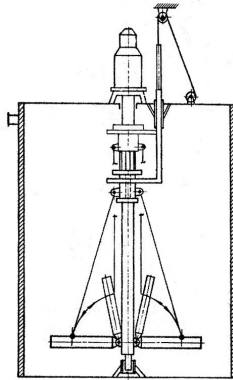


Рис. 3.46. Лопатева мішалка згідно з а. с. № SU1720697A1

У пат. № UA127909U описано якірну мішалку з парою додаткових лопатей, шарнірно закріплених на вертикальному порожнистому валу, крізь який проходить з'єднана з лопатями тяга (рис. 3.47). За потреби (наприклад, зміни в'язкості оброблюваної рідини) за допомогою тяги лопаті повертають, забезпечуючи необхідний кут їхнього розкриття.

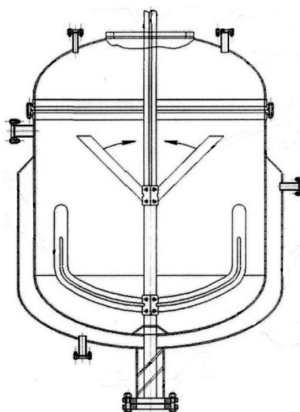


Рис. 3.47. Лопатева мішалка згідно з пат. № UA127909U

У пат. № RU2188701C1 описано рамну мішалку, нижні поперечні лопаті якої шарнірно закріплено на вертикальному валу. Верхні двоплечі різновеликі

поперечні лопаті своїми короткими частинами також шарнірно закріплено на рухомому вздовж вала пружному стакані (рис. 3.48). Така конструкція забезпечує як вільне вилучення мішалки з апарата крізь його верхній люк, так і її розміщення в апараті. Під час обертання вала під дією відцентрової сили лопаті мішалки з витягнутих у вертикальному напрямку паралелограмів перетворюються на горизонтальні прямокутники.

У пат. № RU2523311C1 запропоновано мішалку, виконану у вигляді складеної гармошкою стрічки з наскрізними отворами, верхню ділянку якої закріплено на ковзній уздовж вертикального вала втулці (рис. 3.49). Під час обертання вала оброблюване середовище активно циркулює в апараті, проходячи при цьому крізь отвори стрічки. Наприкінці процесу перемішування при збільшенні частоти обертання вала або зниженні в'язкості оброблюваного середовища (наприклад, в разі приготування композиції на основі епоксидної смоли) стрічка вершинами своїх складок притискається до внутрішньої поверхні корпусу, руйнуючи пристінний шар оброблюваного середовища й підвищуючи однорідність готового продукту.

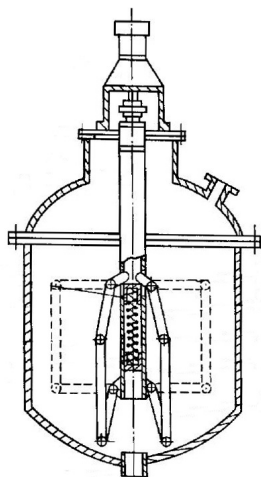


Рис. 3.48. Якірно-лопатева мішалка згідно з пат. № RU2188701C1

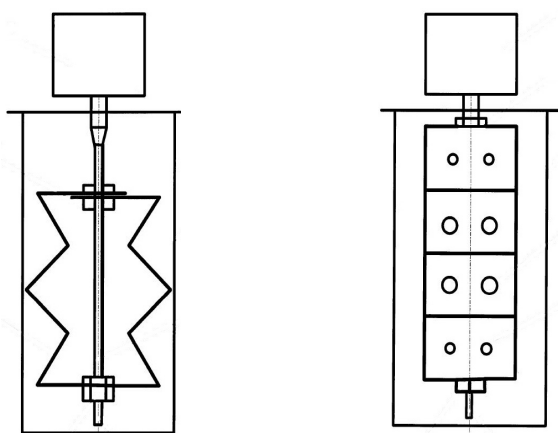


Рис. 3.49. Якірно-лопатева мішалка згідно з пат. № RU2523311C1

За ступенем жорсткості робочих елементів розрізняють мішалки з жорсткими, гнучкими, еластичними й комбінованими елементами.

Мішалка з гнучкими робочими елементами у вигляді циліндричних пружин розтягування, закріплених своїми кінцями на двох паралельних дисках (пат. № UA31227U). Зазначені диски закріплено на валу з можливістю взаємного повороту й фіксації в потрібному положенні, що забезпечує розташування пружин на поверхні однополого гіперboloїда обертання (рис. 3.50).

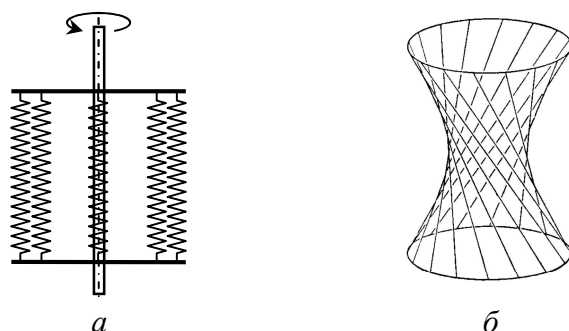


Рис. 3.50. Мішалка згідно з пат. № UA31227U: *а* – вихідне положення пружин; *б* – положення пружин після взаємного повороту дисків

У пат. № UA60258U також розглянуто мішалку з гнучкими робочими елементами, виконаними у вигляді проводів, тросів або ланцюгів, закріплених своїми кінцями на двох паралельних дисках з можливістю регулювання відстані між ними (рис. 3.51). Під час роботи мішалки гнучкі елементи під дією відцентрової сили набувають параболічної форми з вершиною, віддаленою від обертального вала. При цьому зі зменшенням відстані між дисками вигин гнучких елементів зростає.

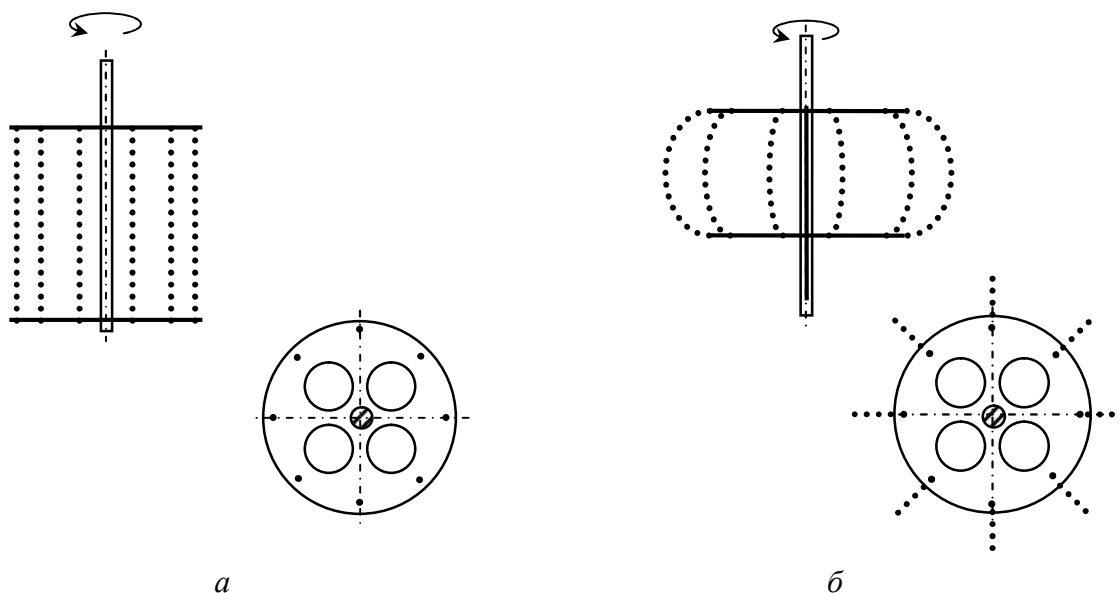


Рис. 3.51. Мішалка згідно з пат. № UA60258U: *а* – вихідне положення; *б* – робоче положення

Також розроблено конструкції гвинтових (пропелерних) мішалок зі змінними кутом атаки лопатей (заявка № WO2016/012348A1), а також змінними ступенем розкриття лопатей та кутом атаки (заявки № WO2016/071567A1 та WO2016/071568A1)

За можливістю зміни живого перерізу робочих елементів розрізняють мішалки з незмінним і змінним живим перерізом робочих елементів.

У пат. № RU2534796C1 описано мішалку зі змінним живим перерізом вертикальних листів, в яких виконано отвори, кожний з яких перекривається шарнірно підвішеною на відповідному листі заслінкою. Під час обертання вала під впливом перемішуваної рідини заслінки відхиляються від вертикального положення, і рідина проходить крізь отвори, що при цьому відкриваються.

У пат. № UA9161U описано самоустановлювану мішалку, виконану у вигляді двох щільно прилеглих одна до одної перфорованих циліндричних оболонок з відкритим днищем (рис. 3.52). Зазначені оболонки встановлено з можливістю взаємного повороту та фіксації в положенні, що забезпечує потрібний ступінь взаємного перекриття отворів їхньої перфорації. Таке конструктивне рішення забезпечує регульований ступінь циркуляції рідини в апараті не тільки за рахунок зміни частоти обертання вала, але й живого перерізу стінки мішалки.

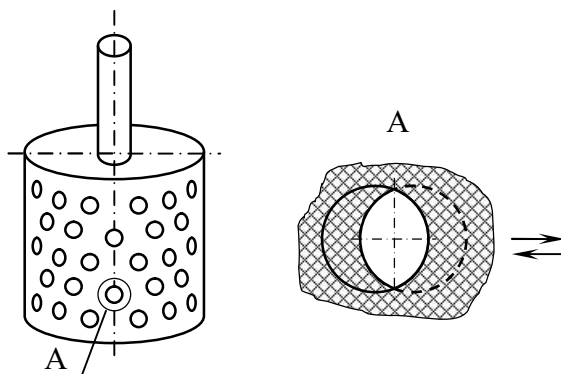


Рис. 3.52. Самоустановлювана циліндрична мішалка згідно з пат. № UA127909U

У пат. № UA126630U описано мішалку для перемішування рідин, що містить вал із закріпленими на ньому двома дисками з отворами, щонайменше один з яких встановлено з можливістю регулювання положення вздовж вала. При цьому кожен із дисків по товщині виконано з двох частин, встановлених з можливістю повороту одна відносно одної в площині диска (рис. 3.53).

Залежно від властивостей перемішуваної рідини диски встановлюють на певній відстані один від одного, а окремі частини відповідного диска повертають одна відносно одної для забезпечення потрібного живого перерізу диска. У результаті під час обертання вала над і під мішалкою утворюються циркуляційні потоки потрібної інтенсивності.

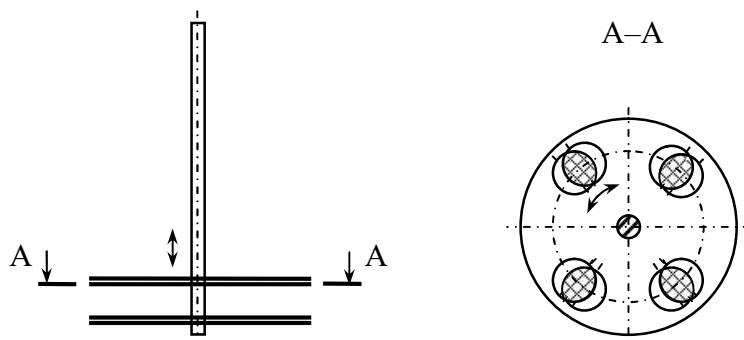


Рис. 3.53. Самоустановлювана циліндрична мішалка згідно з пат. № UA127909U

За наявності додаткових функцій розрізняють мішалки без додаткових функцій і мішалки з додатковими функціями.

Як додаткові функції мішалок можуть бути, наприклад, аерація рідини, зміна її температури, введення в рідину різних добавок і т. д.

Роторні мішалки традиційно виготовляють з металів та їхніх сплавів (як без покриттів, так і з ними, наприклад, емалевими). Однак найширші можливості конструкторам надають полімерні матеріали, технологічні властивості яких дають змогу виготовляти вироби різного типорозміру майже за безвідходним технологіями. При цьому багато полімерних композиційних матеріалів характеризуються й високими експлуатаційними властивостями: високими міцністю, жорсткістю, зносостійкістю, хімічною й термічною стійкістю, низькою густиною тощо [26, 27].

Незважаючи на численні конструкції роторних мішалок змінної форми та/або розмірів, традиційні конструкції роторних мішалок фіксованих форм і розмірів, які протягом тривалого часу підтвердили свої високі технологічні та експлуатаційні властивості, залишаються найбільш затребуваними споживачами. Тим не менш, можна з упевненістю стверджувати, що найближчим часом будуть розроблені та впроваджені не тільки вдосконалені, а й принципово нові конструкції роторних мішалок.

3.6. Діскові мішалки

Одним з найбільш поширених та ефективних видів перемішування рідких середовищ у хімічній, нафтохімічній, нафтопереробній, харчовій та інших галузях промисловості є механічне перемішування, яке зазвичай реалізується в технологічних і допоміжних ємностях з мішалками [8, 9]. При цьому чи не найпростішими за конструкцією та в обслуговуванні є дискові мішалки, що використовуються для обробки як однорідних, так і неоднорідних рідких середовищ помірної в'язкості.

Крім ємнісної апаратури, обертові змішувально-диспергувальні диски також використовуються в багатодискових проточних роторно-пульсаційних апаратах [18]. Однак, на відміну від ємнісних апаратів, об'єм яких набагато

менший за об'єм рідини, на який у певний момент часу активно діє дискова мішалка, дисковий блок роторно-пульсаційного апарата практично займає весь робочий об'єм його змішувальної камери.

Аналіз конструктивного виконання встановлюваних в ємнісній апаратурі дискових мішалок дає змогу запропонувати їхню класифікацію (рис. 3.54).



Рис. 3.54. Класифікація дискових мішалок ємнісної апаратури [28]

За формою диска у плані – мішалки з круглим і круглим кільцевим диском, диском у вигляді правильного шестикутника, п'ятипроменевої зірки, а також диском неправильної форми.

Традиційна дискова мішалка у вигляді круглого плоского диска (пат. № СН640428А5).

Круглий диск змінної товщини: максимальної по центру та мінімальної на периферії (а. с. № SU511964А1).

Мішалка з круглим диском, що має гостру периферійну крайку, а також отвори в полотні диска (пат. № DE4223434С1, заявки № WO94/02239А1, EP0651673А1). Гостра периферійна крайка диска сприяє утворенню кавітаційних бульбашок в оброблюваній рідині.

Круглий кільцевий диск кріпиться або за допомогою радіальних стрижнів до вала, або за допомогою осьових стрижнів до круглого суцільного диска, встановленого безпосередньо на валу мішалки (пат. № CN2930845У).

Диск у вигляді правильного шестикутника із закріпленими в його вершинах знімними вставками для підвищення диспергувальної здатності диска під час оброблення суспензій (пат. US5409313А).

Диск у вигляді п'ятипроменевої зірки з поперечними голками (стрижнями) у її променях забезпечує підвищений змішувально-диспергувальний ефект (пат. № CN210994015U; рис. 3.55).

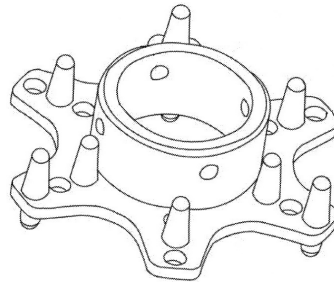


Рис. 3.55. Схема диска у вигляді п'ятипроменевої зірки (пат. № CN210994015U)

Мішалка з диском неправильної форми у плані – у вигляді листа Мебіуса, закріпленого на валу за допомогою радіальних стрижнів (пат. № US4104738А; рис. 3.56). Незважаючи на високий змішувальний ефект, мішалка характеризується статичною та динамічною невірноваженістю, що знижує її надійність.

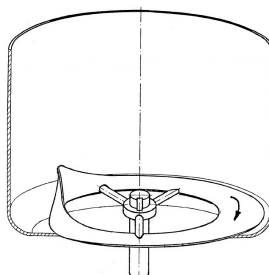


Рис. 3.56. Схема диска у вигляді листа Мебіуса (пат. № US4104738А)

За типом диска як геометричної фігури – мішалки з плоским (двовимірним) та об'ємним (тривимірним) диском.

Мішалка у вигляді круглого плоского диска з отворами для проходу рідини, при цьому отвори мають мінімальний діаметр 1 см^2 , а їхня сумарна площа становить 30...50 % площі диска (пат. № GB867950A).

Мішалка з плоским диском, в якому рівномірно по колу виконано радіальні сочевицеподібні отвори з відігнутими по обидва боки диска крайками для інтенсивного перерозподілу рідини між наддискним і піддискним просторами (заявка № US2002/163856A1).

Аналогічна мішалка з диском, в якому рівномірно по концентричних колах виконано радіальні надрізи з відігнутими в один бік пелюстками (заявка № US2018/111862A1).

Круглий диск мішалки містить наскрізні отвори, а також численні виступи для турбулізації рідини (пат. № JPS6393337A).

Зубчастий диск із відігнутими в один бік похилими пелюстками (пат. № CN2930845Y; рис. 3.57).

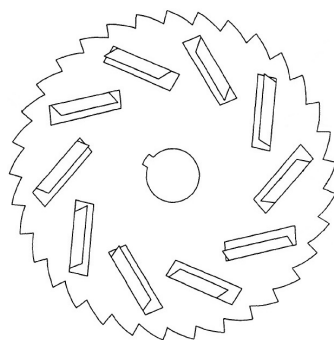


Рис. 3.57. Зубчастий диск (пат. № CN2930845Y)

Мішалка у вигляді плоского диска із зубчастою відбортовкою, що сприяє стабілізації мішалки й диспергуванню компонентів перемішуваної рідини, при цьому зубці виконано трикутними (заявка № EP0132035A2).

Трикутні зубці різної висоти відігнуто в один бік від площини диска, при цьому основи зубів розташовано по спіралі Архімеда (пат. № RU2135272C1). Недолік мішалки – статична та динамічна невірноваженість диска.

Перфорований диск з кільцевими та/або спіральними гофрами (пат. № UA140365U). Мішалка ефективна в експлуатації та технологічна у виготовленні (може бути одержана штампуванням з листового матеріалу).

Мішалки у вигляді плоского диска з надрізними по його периферії й відігнутими по черзі в протилежні сторони від площини диска зубами різної форми (трикутними, прямокутними), що підвищують диспергувальну здатність дисків (пат. № DE3213283A1, CN210009887U, CN211487392U, CN108905940A та CN208944091U, заявки № WO2006/018168A1 та EP1264630A2; рис. 3.58).

Аналогічний диск, на периферійній кільцевій ділянці якого додатково виконано похилі пелюстки (пат. № CN202161949U).

Круглий диск з периферійними диспергаторами у вигляді пластини з відгалуженнями (пат. № CN205731098U; рис. 3.59). Недолік конструкції – утворення значного об'єму відходів під час виготовлення.

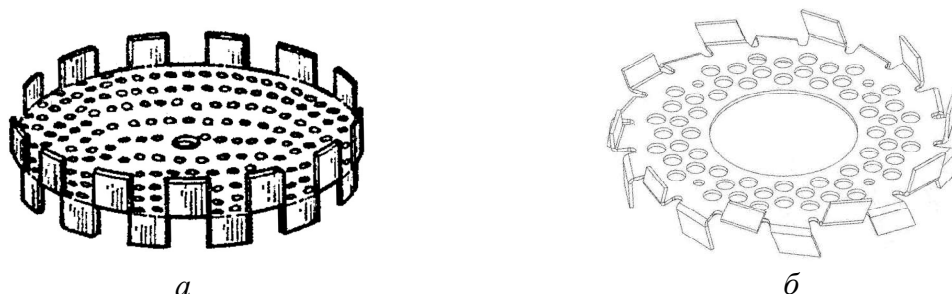


Рис. 3.58. Схема диспергувальних дисків згідно з пат. № DE3213283A1 (а) і CN108905940A (б)

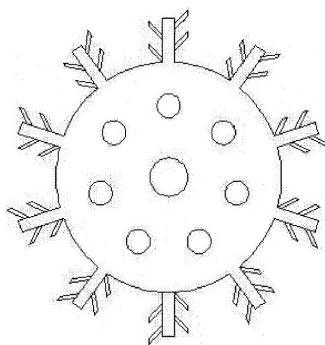


Рис. 3.59. Схема диспергувального диска згідно з пат. № CN205731098U

Круглий диск з фігурними отворами та периферійними диспергаторами у вигляді загостреного сектора кругового кільця (пат. № CN206082373U).

Круглий плоский диск з потовщеною периферійною частиною та виконаними з обох боків лопатками (пат. № GB566687A).

Мішалки з тривимірним (об'ємним) диском у вигляді суцільного (заявка № WO02/098547A2) або перфорованого (пат. № US5490727A, заявки № WO94/02239A1 та EP0651673A1) сферичного сегмента (круглої мушлі).

Мішалки з об'ємним диском у вигляді конічної оболонки з кутом конусності, близьким до розгорнутого кута (180°), частково стабілізуються в процесі обертання (пат. № GB938873A та KR20100021695A).

Диск у вигляді половини тора забезпечує інтенсивну циркуляцію рідини, а також виконує роль стабілізатора (пат. № SU1662342A3).

За кількістю дисків – одно-, дво- та багатодискові мішалки.

Мішалка з двома однаковими дисками, які розташовано з проміжком один відносно одного та мають отвори, а також відігнуті назовні периферійні трикутні зубці (а. с. № SU1414438A1).

Мішалки у вигляді двох перфорованих дисків з надрізними на їхній периферії та відігнутими по черзі в протилежні боки від площини кожного диска прямокутними зубами, при цьому диски виконано отвори для проходу рідини (пат. № US4813787A та US6290386B1).

Мішалка з двома зубчастими дисками однакового діаметра, розташованими з проміжком між собою й мають надрізані пелюстки, відігнуті на обох дисках у протилежні боки (пат. № CN201410373Y).

Мішалка з двома зубчастими дисками різного діаметра, розташованими з проміжком між собою (пат. № EP0896834A2, DE29825001U1).

На вертикальному валу встановлено два диски у вигляді криволінійних оболонок обертання з утворенням між собою проміжку, що звужується в радіальному напрямку (а. с. № SU398266A1 і SU476889A2). Зміною проміжку між дисками забезпечують потрібний насосний ефект мішалки.

Мішалка у вигляді двох закріплених на втулці з проміжком один відносно одного дисків, один з яких виконано з центральним отвором (пат. № US6132080A, заявки № WO01/34286A2, EP0132035A2 та EP1261417A2). Рідина всмоктується у вказаний отвір і під дією відцентрової сили викидається з проміжку між дисками. Недолік конструкції – неможливість регулювання величини проміжку між дисками.

Два плоскі круглі диски з пакетами стільникових елементів, які обернено один до одного та зміщено на половину їхньої ширини в радіальному напрямку (пат. № JPH09276681A; рис. 3.60). Рідина крізь центральний отвір верхнього диска всмоктується в проміжок між дисками і, огинаючи стінки стільникових елементів, інтенсивно переміщується. Недолік мішалки – можливість утворення застійних зон всередині стільникових елементів.

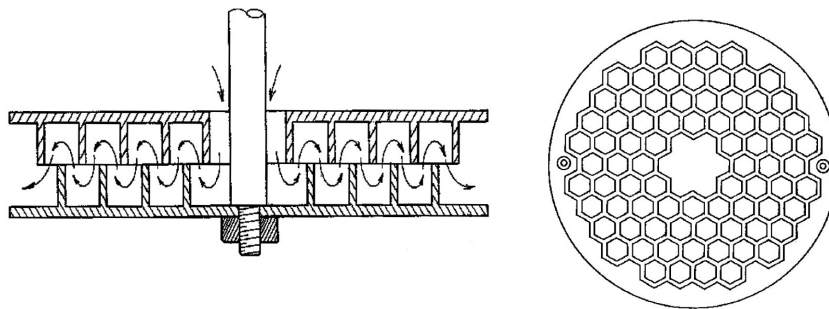


Рис. 3.60. Схема дводискової мішалки та вигляд верхнього диска з боку стільникових елементів (пат. № JPH09276681A)

Багатодискові мішалки містять встановлений вздовж поздовжньої осі циліндричного апарата (пат. № GB875796A, GB1056257A та GB1359091A) або з ексцентриситетом відносно зазначеної осі (пат. № GB1110690A та US3495947A) вертикальний вал з кількома дисками однакового діаметра.

Мішалка містить вертикальний вал з декількома дисками, при цьому діаметр дисків поступово зменшується зверху вниз (заявки № WO98/43726A1 і GB2337947A).

Багатодискова планетарна мішалка містить оснащено дисками два вали: центральний і периферійний, при цьому периферійний вал, крім обертання навколо своєї осі, також обертається навколо центрального вала (пат. № US4380398A). Мішалка забезпечує високий змішувальний ефект, однак вона характеризується складністю у виготовленні та експлуатації.

Багатодискова мішалка містить два паралельні вертикальні вали, на кожному з яких рівномірно розташовано круглі диски, при цьому диски одного вала зміщено по висоті відносно дисків другого вала та в плані частково перекривають один одного (пат. № US6000646A; рис. 3.61).

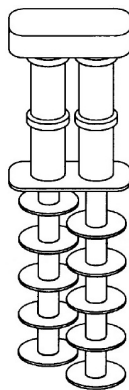


Рис. 3.61. Схема багатодискової мішалки (пат. № US6000646A)

За розташуванням диска в просторі – мішалки з горизонтальними, вертикальними й похилими дисками.

Мішалка із закріпленням на порожнистому горизонтальному валу одним або декількома вертикальними дисками (заявка № WO2016/180853A1). Крізь порожнину вала в рідину вводиться газ.

Мішалки у вигляді закріплених на вертикальному валу суцільних (пат. № GB938873A, а. с. № SU793624A1) або таких, що мають наскрізні отвори (пат. № GB942400A та DE3438766A1), круглих дисків. Недолік мішалок з похилим диском – статична й динамічна невірноваженість мішалки та спричинене ними знакозмінне згинальне навантаження, що діє на вал.

За характером руху диска – роторні мішалки, мішалки зі зворотно-поступальним рухом диска, а також мішалки з прецесійним рухом диска.

Мішалка з перфорованим диском, що здійснює зворотно-поступальний рух у вертикальному напрямку, при цьому привід зворотно-поступального руху диска виконано у вигляді багатоланкового кулачкового просторового механізму з малим періодом часу прямого або зворотного ходу (пат. № UA48551U; рис. 3.62). Зазначений привід забезпечує нерівномірний зворотно-поступальний рух диска, що істотно інтенсифікує перемішування рідини.

Для оброблення в ємнісних апаратах токсичних і високочистих середовищ, коли необхідно забезпечення надійної герметизації порожнини апарата, використовуються магнітні дискові мішалки, які зазвичай не обертаються, а здійснюють прецесійний рух [17].

За характером частоти обертання диска – мішалки з фіксованою (постійною) й змінною (регульованою) частотою обертання.

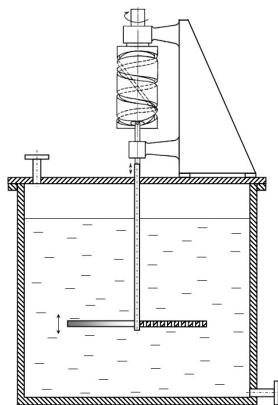


Рис. 3.62. Схема мішалки зі зворотно-поступальним рухом перфорованого диска (пат. № UA48551U)

Мішалка з двома встановленими з проміжком між собою горизонтальними дисками, один з яких закріплено на вертикальному валу жорстко, а другий – вільно (пат. № UA50139U). Мішалку оснащено шестірнею, що взаємодіє із закріпленими на дисках еліптичними лобовими зубчастими колесами. Диски обертаються зі змінною швидкістю (у процесі кожного обороту валу) у протилежних напрямках.

За можливістю зміни форми та/або розмірів мішалки розрізняють мішалки незмінних і змінюваних форми та/або розмірів.

Виконання мішалок змінюваної форми істотно розширюють їхні технологічні можливості [19]. Однак складність виготовлення та експлуатації таких мішалок обмежує їхнє широке використання.

Мішалка у вигляді двох дисків, що взаємодіють між собою основами, при цьому в дисках рівномірно по колу виконано отвори, крок розташування яких перевищує їхній діаметр (пат. № UA287U). Взаємним поворотом дисків змінюють живий переріз отворів мішалки, а отже й інтенсивність циркуляції рідини над мішалкою та під нею.

В аналогічній мішалці між отворами одного диска виконано обтічні секторні виступи, що забезпечують додаткове вихороутворення з боку відповідного диска (пат. № UA130454U).

В удосконаленій мішалці зазначені обтічні секторні виступи виконано з еластичного матеріалу, а порожнини між ними й відповідним диском сполучено з магістраллю стисненого повітря, що дає змогу регулювати висоту зазначених виступів (пат. № UA136102U).

На валу мішалки закріплено два диски з отворами та можливістю регулювання відстані між ними (пат. № UA126630U). При цьому кожен з дисків по їх товщині виконано з двох частин, встановлених з можливістю повороту одна відносно одної. Конструкція забезпечує зміну відстані між дисками й живого перерізу кожного зі здвоєних дисків. Таким чином, можна змінювати насосний ефект мішалки, а також інтенсивність циркуляції рідини над мішалкою та під нею.

За наявністю додаткових засобів перемішування – безпосередньо дискові мішалки, а також комбіновані мішалки.

Комбінована дисково-оболонкова мішалка містить закріплені на вертикальному валу диск і встановлений над ним напрямний елемент у вигляді порожнистого зрізаного конуса з відкритою великою основою та днищем з боку меншої основи (пат. № UA59773U; рис. 3.63). У днищі напрямного елемента виконано отвори, при цьому диск та/або напрямний елемент закріплено на валу з можливістю переміщення вздовж нього. Рідина крізь отвори днища напрямного елемента підсмоктується всередину нього та інтенсивно викидається крізь проміжок між напрямним елементом і диском. Зміною відстані між напрямним елементом і диском можна регулювати насосний ефект мішалки.

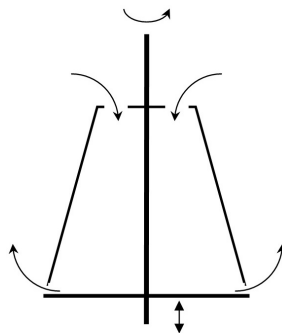


Рис. 3.63. Схема комбінованої дисково-оболонкової мішалки згідно з пат. № UA59773U

Комбінована дисково-лопатева мішалка містить два горизонтальні круглі диски, з'єднані між собою діаметрально розташованою вертикальною пластиною (пат. № DE3616203A1).

Комбінована дисково-лопатева мішалка містить два круглі диски різного діаметра, з'єднані між собою діаметральними взаємно перпендикулярними вертикальними пластинами (пат. № JPS58159838A). Нижній диск меншого діаметра виконано з центральним отвором для підсмоктування рідини в простір між дисками та пластинами, з якого вона видаляється в радіальному напрямку під дією відцентрової сили.

Комбіновані дисково-лопатеві мішалки містять круглий диск з лопатями, закріпленими на його нижній поверхні (пат. № JP2001054726A) або на обох поверхнях (пат. № JP2001054726A).

За наявності додаткових функцій – мішалки з підведенням компонента та мішалки із засобами нагрівання (охладження).

На порожнистому валу мішалки закріплено диск з одним або декількома каналами, що сполучаються з порожниною вала, в яку подається рідкий компонент, що підмішується до оброблюваної рідини (пат. № KR20100021770A).

Аналогічні рішення для введення в оброблювану рідину підмішуваних компонентів запропоновано в пат. № FR2604107A1 та US3650513A.

Мішалка для введення в рідину щонайменше двох компонентів містить порожнистий вал зі встановленими на ньому дисками, при цьому кожен підмішуваний компонент подається на окремий диск і далі під дією відцентрової сили розподіляється в рідині (пат. № US3934859A).

На порожнистому валу мішалки закріплено пакет кільцевих дисків з утворенням між сусідніми дисками вузьких щілин (заявка № GB2113562A). Газ, що подається в порожнину вала, крізь виконані в стінці вала отвори потрапляє в щілини між дисками та ефективно розподіляється в потоці рідини.

У порожнистий вал дискової мішалки вводиться теплоносіє, що змінює температуру вала й диска (пат. № JPS5987025A та EP0105436A2).

За матеріалом диска – мішалки з металевими й неметалевими дисками.

Диск мішалки для оброблення агресивних середовищ виконано із зернистого неорганічного матеріалу, наприклад, карбиду кремнію (а. с. № SU112470A1).

Диск мішалки з надвисокомолекулярного поліетилену містить периферійну кільцеву ділянку з безліччю радіальних канавок на обох поверхнях диска, що підвищують змішувально-диспергувальну здатність диска (пат. № GB2024636A та US4171166A).

Великі можливості для виготовлення дискових мішалок надають полімерні композиційні матеріали, які характеризуються високими технологічними та експлуатаційними властивостями [27, 29–31].

Незважаючи на відносну простоту більшості конструкцій дискових мішалок, вони вирізняються низьким споживанням енергії та забезпечують високий змішувально-диспергувальний ефект. При цьому навіть класичні дискові мішалки у вигляді плоского круглого диска продовжують широко використовуватися для оброблення різноманітних рідких середовищ.

3.7. Мішалки у вигляді тіл обертання

Серед численних типів роторних мішалок [5, 6, 8, 9] особливе місце займають мішалки у вигляді тіл обертання, які характеризуються відносно низьким споживанням енергії, а також самостабілізацією їхнього положення в рідині, що дає змогу відмовитися від додаткових опор вала, наприклад, різного роду підп'ятників і спеціальних стабілізаторів.

Аналіз конструктивного виконання встановлюваних в ємнісній апаратурі мішалок у вигляді тіл обертання дає змогу запропонувати їх класифікацію (рис. 3.64).

За формою – мішалки у вигляді кулі (сфери), кругового циліндра, конуса, параболоїда, гіперболоїда, частини тора, комбінованої форми, а також іншої форми.

Мішалка у вигляді кулі, закріпленої на вільному кінці вала [8].



Рис. 3.64. Класифікація мішалок у вигляді тіл обертання [32]

Мішалка у вигляді суцільного кругового циліндра забезпечує перемішування в'язкого середовища в реакторі-полімеризаторі (пат. № US4198383A).

Мішалка у вигляді циліндричної оболонки з похилими сферичними канавками на її зовнішній поверхні (заявка № US2004/145068A1). Гострі похилі виступи, що утворюються сусідніми канавками, сприяють утворенню безлічі кавітаційних бульбашок у перемішуваній рідині.

Мішалка у вигляді циліндричної оболонки із зовнішньою та внутрішньою спіральними стрічками протилежного напрямку навивки (пат. № CN211216584U). Під час обертання оболонки спіральні стрічки забезпечують циркуляційний рух рідини в апараті.

Мішалки у вигляді двох коаксіальних циліндричних оболонок, оснащених диспергувальними виступами та встановлених на валу за допомогою радіальних стрижнів (пат. № CN105688717A та CN107469692A; рис. 3.65).

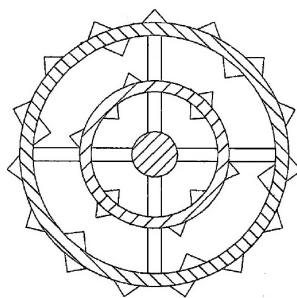


Рис. 3.65. Вид зверху біциліндричної мішалки згідно з пат. № CN105688717A, № CN107469692A)

Мішалка у вигляді циліндричної склянки з відкритим верхом і перфорованої стінкою забезпечує інтенсивну циркуляцію й диспергування перемішуваного середовища (пат. № US4743428A).

Мішалка у вигляді ступінчастого циліндра забезпечує різну швидкість зсуву між кожним зі ступенів і циліндричним корпусом апарата (пат. № GB615425A).

Магнітна мішалка з високим крутним моментом у вигляді декількох циліндричних оболонок, з'єднаних з валом, на якому закріплено додаткові змішувальні елементи (пат. № CN211706638U). Перевага цієї мішалки – гарантована герметичність порожнини апарата в процесі перемішування рідини [17].

Мішалка у вигляді суцільного конуса зі спіральною канавкою на бічній поверхні (заявка № DE4223612A1).

Мішалка у вигляді конічного стакана з відкритим верхом, а також подовжніми прорізами в стінці стакана (пат. № CN111530340A). У процесі роботи мішалки перемішуване середовище під дією відцентрових сил інтенсивно диспергується крізь зазначені подовжні прорізи.

Мішалка у вигляді конічного стакана з відкритим верхом, суцільною стінкою й перфорованим днищем забезпечує інтенсивну циркуляцію перемішуваного середовища (пат. № US5403092A).

Мішалка у вигляді двох суцільних конусів різної висоти із спільною більшою основою (пат. № EP1072561A2).

Мішалка у вигляді параболоїда, зрізаного з боку його вершини (пат. № RU2121870C1).

Мішалка у формі параболоїда з подовжніми наскрізними отворами вздовж маточини для проходу рідини й забезпечення ефективної циркуляції не тільки над мішалкою, а й під нею (пат. № CN108404710A).

Мішалки у вигляді гіперболоїда (пат. № CN102554582A, CN108225634A та TW202031349A, заявка № WO2020/114907A1; рис. 3.66).

Мішалки у вигляді гіперболоїда зі спіральними ребрами на їхній поверхні (пат. № US5149195A, CN106994307A, CN109603631A, CN111569753A, CN202224092U, CN202529846U, CN204529435U,

CN207757839U, CN208320522U, CN208389458U, CN209997488U, CN210332447U, CN211562676U та KR101525925B1, заявка № WO2020/224838A1). За конструкцією такі мішалки багато в чому схожі на відкрите робоче колесо відцентрового насоса.

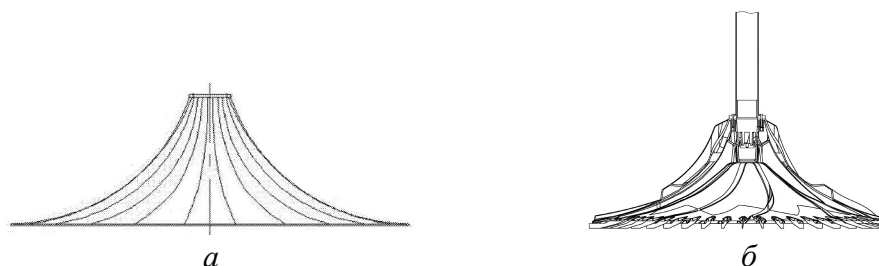


Рис. 3.66. Схеми мішалок у вигляді гіперболоїда: *a* – згідно з пат. № CN102554582A; *б* – згідно із заявкою № WO2020/1149

Мішалку з верхньою гіперболоїдною поверхнею та нижньою плоскою поверхнею, оснащеною диспергувальними виступами, призначено для перемішування та аерації рідких середовищ (пат. № DE4218027A1).

Диск у вигляді нижньої половини горизонтально розташованого тора забезпечує інтенсивну циркуляцію рідини в просторі над мішалкою, а також виконує роль стабілізатора (пат. № SU1662342A3).

Комбінована мішалка у вигляді кругового циліндра, торці якого є меншою й більшою основами двох зрізаних конусів (пат. № JP2011235224A). Стінки корпусу апарата розташовано еквідистантно по відношенню до поверхні мішалки. Під час руху рідини вздовж мішалки й залежно від напрямку руху в ній виникають деформації зсуву, що збільшуються або зменшуються.

Комбінована мішалка у вигляді вертикального кругового циліндра, основа якого переходить у конус, під яким у порожнині апарата нерухомо розташовано кільцевий барботер (пат. № JPS54155651A). Повітря, що виходить з барботера, потрапляє на конічне днище мішалки, після чого її циліндричною частиною інтенсивно диспергується в об'ємі рідини.

Мішалка у вигляді оболонки обертання, утвореної в результаті обертання витка синусоїди навколо осі, що проходить через вершину зазначеного витка (пат. № RU2252816C1).

Комбінована мішалка у вигляді тіла обертання, верхня частина якого є гіперболоїдом, середня – круговим циліндром, а нижня – зрізаним конусом з порожнистою циліндричною вершиною, сполученою з двома похилими каналами для підвищення насосної дії мішалки (пат. № US4240618A).

За можливістю зміни форми та/або розмірів – мішалки фіксованих (незмінних) і змінюваних форми та/або розмірів.

Мішалка містить дві прилеглі одна до одної перфоровані циліндричні оболонки, встановлені з можливістю взаємного повороту, що забезпечує зміну

площі живого перерізу отворів перфорації (пат. № UA9161U; [19]). Забезпечується регулювання кратності циркуляції рідини за рахунок зміни частоти обертання мішалки й живого перерізу її стінки.

Біконічна мішалка містить встановлені на вертикальному валу два порожнисті зрізані конуси з отворами з боку їхніх менших основ, при цьому конуси обернені один до одного великими або меншими основами (пат. № UA45143U; рис. 3.67). Зміною взаємного положення оболонок та/або відстані між ними регулюють кратність циркуляції рідини.

За наявністю додаткових засобів перемішування – мішалки без додаткових засобів перемішування й комбіновані мішалки.

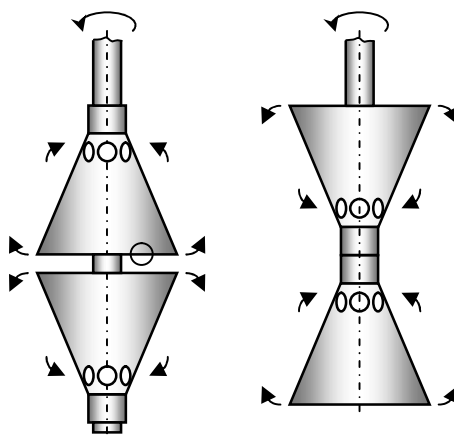


Рис. 3.67. Схема біконічної мішалки згідно з пат. № UA45143U

Комбінована конусно-дискова мішалка містить закріплені на вертикальному валу оболонку у вигляді зрізаного конуса, що розширюється вниз, і встановлений під ним диск, при цьому конічну оболонку й диск установлено на валу з можливістю переміщення вздовж нього (пат. № UA59773U; див. рис. 3.63). Рідина крізь верхню основу конічної оболонки потрапляє всередину й видаляється з її порожнини крізь проміжок між нижньою основою оболонки й диском. Змінюючи відстань між оболонкою й диском, регулюють інтенсивність циркуляції рідини в апараті.

Аналогічна комбінована конусно-дискова мішалка містить закріплені на вертикальному валу оболонку у вигляді зрізаного конуса, що розширюється вгору, і встановлений над ним диск, при цьому конічну оболонку й диск встановлено на валу у фіксованому положенні (пат. № GB1123847A). Недолік мішалки – неможливість зміни проміжку між конічною оболонкою й диском.

Мішалка містить вертикальну перфоровану циліндричну оболонку з нижньою відкритою основою й перекритою кришкою верхньою основою (пат. № UA58964U; рис. 3.68).

Ззовні перфорованої оболонки з утворенням кільцевого проміжку розміщено додаткову оболонку обертання з відкритими основами, при цьому діаметр верхньої основи більший за діаметр нижньої основи. У процесі роботи

мішалки в проміжку між оболонками утворюється висхідний потік, що дробить струмені води, що виходять з перфорації внутрішньої оболонки, на окремі краплі.

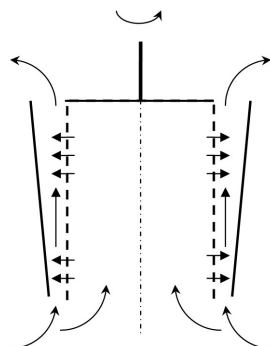


Рис. 3.68. Схема циліндро-конічної мішалки згідно з пат. № UA58964U

В аналогічній мішалці обидві оболонки виконано циліндричними, при цьому в середній частині зовнішньої оболонки утворено отвори (пат. № UA64653U). У процесі роботи мішалки під дією відцентрової сили рідина проходить крізь отвори зовнішньої оболонки, внаслідок чого в проміжку між оболонками утворюються осьові потоки, спрямовані від основ оболонок до зазначених отворів.

Мішалка у вигляді перфорованої циліндричної оболонки, поблизу основ якої на валу закріплено лопаті, що мають протилежний нахил (пат. № JPH03217222A). Під час обертання мішалки з боку основ оболонки виникають два протилежно спрямовані циркуляційні контури рідини, що проходять крізь перфорацію оболонки та її основи.

Мішалка у вигляді суцільної циліндричної оболонки, закріпленої на валу за допомогою нахилених в одному напрямку лопатей (пат. № JPS55147141A). Під час обертання мішалки лопаті утворюють осьовий потік рідини в оболонці. Отже, оболонка є не тільки мішалкою, але й напрямним обертовим елементом циркуляційного контуру рідини в апараті.

Мішалка у вигляді порожнистого зрізаного конуса із закріпленими на його зовнішній поверхні похилими лопатями (пат. № CN206661032U).

Мішалка у вигляді рознесених по висоті вала й закріплених на ньому порожнистого перфорованого циліндра й лопатевої мішалки (пат. № CN209138473U). Під час обертання вала лопатева мішалка забезпечує циркуляцію рідини в апараті, а порожнистий перфорований циліндр – інтенсивне диспергування перемішуваної рідини.

Мішалка у вигляді рознесених по висоті вала та закріплених на ньому трирівневої лопатевої мішалки, порожнистого перфорованого циліндра та якірної мішалки (пат. № CN210905715U). Під час обертання вала порожнистий перфорований циліндр інтенсивно диспергує перемішувану рідину.

За наявності додаткових функцій – мішалки без додаткових функцій і мішалки з підведенням компонента.

Мішалка у вигляді гіперboloїда, закріпленого на вільному кінці порожнистого вертикального вала, забезпечує диспергування повітря в перемішуваний рідині (пат. № TW202031349A, заявка № WO2020/114907A1).

Мішалка аналогічного призначення у вигляді двох порожнистих зрізаних перфорованих конусів, з'єднаних між собою меншими основами й закріплених на вільному кінці порожнистого вертикального вала (пат. № GB1322476A).

Мішалка у вигляді порожнистого перфорованого циліндра з суцільними основами, порожнина якого сполучено з порожниною вала, другий вільний кінець якого сполучено з атмосферою (пат. № JPS6078626A). Під час обертання мішалки рідина з циліндра під дією відцентрової сили крізь перфорацію виходить в об'єм рідини в апараті, після чого в циліндр крізь порожнистий вал починає підсмоктуватися атмосферне повітря, яке безперервно диспергується в рідині.

В аналогічній мішалці рідкий або газоподібний підмішуваний компонент подають у порожнину вала під тиском (пат. № CN111841475A).

Незважаючи на невисоку універсальність мішалок у вигляді тіл обертання, завдяки їх низькому енергоспоживанню, а також здатності стабілізуватися в процесі роботи, вони продовжують удосконалюватися й використовуватися для оброблення різноманітних рідких середовищ.

3.8. Теплообмінні пристрої змішувачів з роторними мішалками

Одним з найбільш поширених та ефективних видів перемішування рідин є механічне перемішування в ємнісних апаратах переважно з роторними мішалками [5, 6, 8, 9, 16, 19]. При цьому перемішування використовується майже у всіх процесах хімічної технології: гідромеханічних (гомогенізація, емульгування, суспендування, диспергування), масообмінних (розчинення, кристалізація, екстракція, абсорбція, електроліз), теплових (нагрівання, охолодження, випарювання) та хімічних (гомо- та гетерогенні реакції) [16].

У багатьох випадках оброблення рідин в апаратах з мішалками необхідно проводити за певного температурного режиму, що забезпечується теплообмінними пристроями різного принципу дії та конструкцій.

Аналіз конструкцій теплообмінних пристроїв ємнісних апаратів з роторними мішалками дає змогу запропонувати їхню класифікацію (рис. 3.69).

За методом теплообміну – пристрої з джерелом конвекційного теплообміну (без зміни та зі зміною агрегатного стану теплоносія), радіаційного, електричного, індукційного та діелектричного нагрівання, а також комбінованого теплообміну.

До пристроїв з джерелом конвекційного теплообміну належать, насамперед, теплообмінні оболонки та змійовики різного типорозміру з рідким або пароподібним теплоносієм [5, 6, 8, 9, 16, 19].

Вертикальний корпус установки радіаційного теплообміну виконано з кварцового скла, а на його бічній стінці встановлено плазмовий пальник (пат. № RU174080U1). У процесі роботи ультрафіолетові промені проходять крізь прозору стінку та опромінюють компоненти оброблюваного розчину, одночасно підігрівуючи його.

Вертикальний апарат з двома мішалками, що обертаються в протилежних напрямках, і зануреними в перемішуване середовище стрижневими електронагрівниками (пат. № CN108745117A).

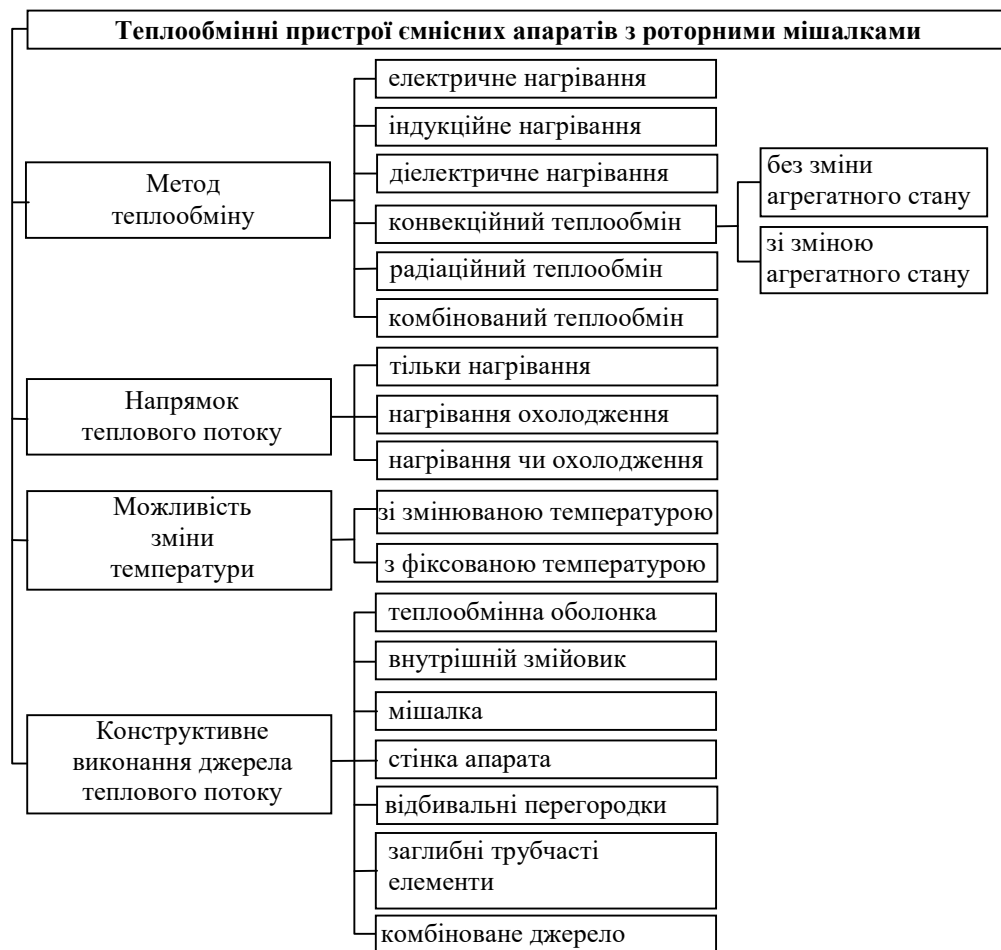


Рис. 3.69. Класифікація теплообмінних пристроїв ємнісних апаратів з роторними мішалками [33]

Пристрій у вигляді вертикального вала з закріпленими на ньому лопатями у вигляді електронагрівників, при цьому кожен електронагрівник може бути оснащено незалежним контуром керування (пат. № UA114376U).

Мішалка у вигляді електронагрівника, що має форму циліндричної спіралі, розташованої перпендикулярно валу (пат. № RU2604212C1).

Електронагрівник у вигляді циліндричної спіралі розташовано навколо вертикального вала лопатевої мішалки (пат. № RU2611865C1).

Пристрій для електричного нагрівання перемішуваного середовища крізь стінку вертикального апарата (заявка № EP2502977A1).

Закріплена на вертикальному валу гвинтова мішалка з електронагрівником (пат. № FR2775621A1).

Один або кілька електронагрівників вмонтовано в мішалку, виконану у вигляді порожнистого диска з осьовим всмоктувальним отвором і випускними периферійними отворами (пат. № JP2016049487A, заявки № US2017232412A1 і WO2016/031401A1). У процесі обертання мішалки рідина, проходячи крізь порожнину мішалки, безперервно нагрівається.

У пристрої індукційного нагріву перемішуваної рідини ззовні корпусу змонтовано котушку індуктивності, при підключенні якої до джерела електричного струму внаслідок індукції починає нагріватися мішалка, забезпечуючи підігрів рідини (заявка № WO2018/008540A1).

Пристрій діелектричного нагрівання водної дисперсії каучуку містить неелектропровідний апарат, у нижній частині якого встановлено два електроди: зовнішній кільцевий і внутрішній у вигляді мішалки (пат. № GB684264A). При створенні різниці потенціалів між електродами перемішувана дисперсія нагрівається.

Пристрій комбінованого теплообміну містить теплообмінну оболонку з текучим теплоносієм і плоский гнучкий електронагрівник, закріплений на лопатях гвинтової мішалки майже без зміни їхньої форми (пат. № FR2841154A1).

За напрямком теплового потоку – пристрої, що забезпечують лише нагрівання або тільки охолодження перемішуваного середовища, а також пристрої, що забезпечують як його нагрівання, так і охолодження.

Пристрій, що забезпечує охолодження реакційної суміші в процесі полімеризації, включає охолодну оболонку та дволопатева мішалку зі змійовиковим каналом для проходження холодоагенту (пат. № JP2002301350A).

Пристрій забезпечує глибоке охолодження перемішуваного середовища за допомогою багаторівневої дискової мішалки, охолодної оболонки й завантажуваного в порожнину корпусу сухого льоду (пат. № JPS5644036A).

Пристрій для охолодження реакційної маси у вигляді теплової труби з випарником, розташованим у листовій мішалці й конденсатором, сполученим за допомогою порожнистого вала й винесеним за межі кришки апарата (пат. № GB1481142A).

Пристрій для безперервного охолодження текучого середовища містить корпус з теплообмінною оболонкою та охолоджуваною рідким холодоагентом об'ємною мішалкою, виконаною, наприклад, у вигляді тонкостінного черв'ячного ротора (пат. № GB1491279A, FR2293979A1 і CH591284A5).

У пристроях, що забезпечують лише нагрівання, як джерело теплоти використовується насичена глуха пара, що конденсується (заявка № DE19640740A1), а також електронагрівники (пат. № GB1296909A).

Пристрій, що забезпечує або нагрівання, або охолодження рідини, містить порожнистий вал із закріпленою на ньому порожнистою мішалкою, в яких циркулює нагрівний або охолодний агент (пат. № RU2280500C2).

Аналогічний пристрій містить трилопатеву мішалку з теплоносієм, що циркулює всередині її лопатей (заявка № KR101531859B1).

За можливістю зміни температури – пристрої, що забезпечують зміну температури перемішуваного середовища, а також пристрої, що підтримують її фіксовану температуру.

Пристрій, що забезпечує зміну температури перемішуваного середовища містить апарат з винесеними за його межі циркуляційним насосом і підігрівачем, при цьому нагнітальну магістраль циркуляційного насоса сполучено з порожниною перфорованої мішалки (пат. № RU2169611C2). У процесі роботи пристрою рідина, що виходить з перфорацій мішалки, забезпечує її обертання. Переваги пристрою – відсутність традиційного електродвигуна мішалки й широкий діапазон регулювання температури перемішуваної рідини.

До пристроїв, що забезпечують фіксовану температуру перемішуваної рідини належить пристрій індукційного нагріву, що містить виконаний з немагнітного матеріалу вертикальний циліндричний корпус, ззовні якого на рівні мішалки змонтовано котушку індуктивності, при цьому мішалку виконано з магнітного матеріалу з точкою Кюрі, що відповідає робочій температурі перемішуваної рідини (пат. № UA137441U). Після підключення котушки індуктивності до джерела струму мішалка внаслідок індукції нагрівається. К разі досягнення нею температури, яка відповідає точці Кюрі матеріалу мішалки, вона втрачає магнітні властивості й перестає нагріватися. За подальшого охолодження матеріал мішалки знову набуває магнітних властивостей, і мішалка починає нагріватися. У результаті підтримується постійна температура мішалки й оброблюваної в апараті рідини, при цьому зазначена температура дорівнює точці Кюрі матеріалу мішалки [34].

За конструктивним виконанням джерела теплового потоку – пристрої з джерелом у вигляді теплообмінної оболонки, стінки ємнісного апарату, мішалки, заглибних трубчастих елементів, відбивних перегородок, щонайменше одного внутрішнього змійовика, а також їх комбінації.

Найбільш поширеними пристроями є роз'ємні та нероз'ємні теплообмінні оболонки різного конструктивного виконання: у вигляді циліндричної обичайки, що охоплює з проміжком корпус апарату (пат. № RU2019348C1, CH358927A, GB1173391A, CN208800031U та CN208800099U, заявки № US2018/178176A1, WO2010/085011A1,

WO2019/203273A1, EP2668999A1 та EP3318317A1), циліндричної обичайки з круглими вм'ятинами, а також у вигляді виконаного з півтруб змійовика ([35]; пат. № GB1280525A).

Апарат з теплообмінною оболонкою для нагрівання або охолодження перемішуваної рідини, при цьому теплоносій в оболонці завдяки гвинтовій стрічковій перегородці рухається по спіралі (пат. № FR2122055A5).

Апарат з теплообмінною оболонкою для нагрівання або охолодження перемішуваної рідини, при цьому порожнину оболонки розділено вертикальними перегородками на окремі секції різної ширини, оснащені індивідуальними патрубками подавання й відведення теплоносія (пат. № CN685476A5). Включенням або відключенням подавання теплоносія в кожную секцію забезпечується регулювання площі теплообмінної поверхні пристрою.

Апарат з оболонкою у вигляді виконаного з півтруб змійовика й закріпленими зовні корпуса генераторами ультразвукових (акустичних) коливань істотно інтенсифікує процес теплопередачі (пат. № JP2017217638A).

Апарат з оболонкою у вигляді виконаного з півтруб змійовика з рівномірно розташованими навколо мішалки заглибленими U-подібними теплообмінними трубками (заявка № DE2441302A1).

Апарат містить вертикальний циліндричний корпус з патрубками й теплообмінною оболонкою, а також розташований вздовж осі корпуса вал з мішалкою, при цьому в порожнині теплообмінної оболонки встановлено вертикальні циркуляційні трубки, сполучені з порожниною корпуса (пат. № UA140037U; рис. 3.70). Рідина в апараті під дією мішалки безперервно проходить крізь вертикальні циркуляційні трубки, які значно збільшують площу теплопередачі. Таким чином, рідина в апараті піддається тепловому обробленню не тільки в зоні контакту корпуса з теплообмінною оболонкою, але й під час проходження теплообмінних трубок в оболонці, що підвищує інтенсивність теплового оброблення рідини.

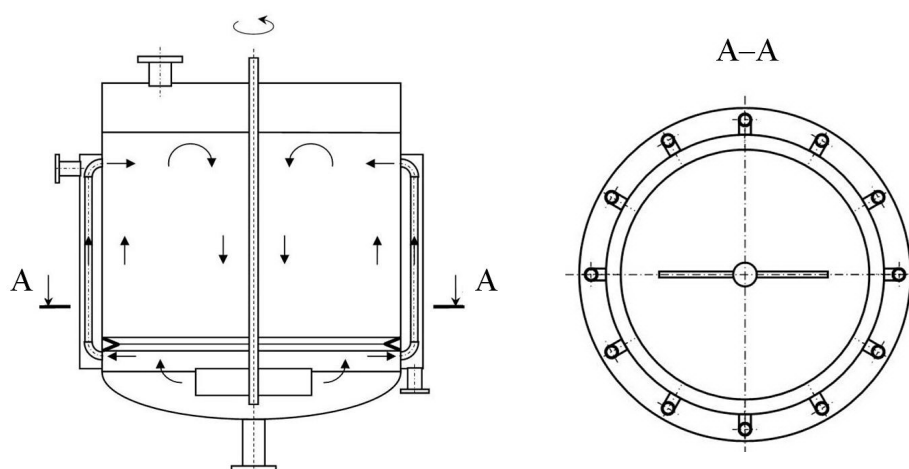


Рис. 3.70. Апарат з мішалкою й теплообмінною оболонкою згідно з пат. № UA140037U

Пристрій з джерелом теплоти у вигляді нагрівальних елементів, заглиблених безпосередньо в стінку ємнісного апарата (пат. № RU2597124C1).

Апарат з нагрівальним елементом у вигляді мішалки, кожну лопать якої зігнуто з трубки у формі плоского змійовика для циркуляції рідкого теплоносія (пат. № US1587840A; рис. 3.71).

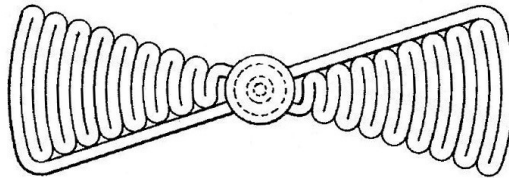


Рис. 3.71. Мішалка-змійовик згідно з пат. № US1587840A

Трубчасту мішалку вигнуто у вигляді кругового кільця, а також рам різної форми (пат. № US3241606A).

Трубчасті мішалки з лопатями ще більш різноманітної форми: П-подібної, U-подібної, у вигляді плоского або спірального змійовика, а також дуги кола або еліпса (заявки № DE1926704A1, DE2011174A1).

Апарат з порожнистим вертикальним валом типу «труба в трубі» та поперечними лопатями, тепловий потік до яких від зазначеного вала передається теплопровідністю (пат. № JPH0739742A). Перевага пристрою – простота конструкції, проте його ефективність нижче, ніж у мішалок з порожнинами для теплоносія.

Апарат з валом аналогічної конструкції, але з поперечними трубчастими лопатями, вхід і вихід кожної з яких сполучено з відповідними магістралями вала (пат. № CH643153A5).

Апарат для нагрівання або охолодження перемішуваної рідини за допомогою текучого теплоносія містить змонтований на валу типу «труба в трубі» щонайменше один диск з каналом для руху теплоносія (пат. № GB1296909A).

Апарат з трубчастим валом для проточного руху теплоносія й закріпленою на ньому листовою мішалкою з вигнутими перфорованими лопатями (пат. № CH349581A).

В апараті з аналогічним теплообмінним валом перемішуване середовище за допомогою багаторівневої дискової мішалки додатково нагрівається або охолоджується за допомогою теплоносія в оболонці (пат. № FR2058865A5).

В апараті рідкий теплоносій проходить крізь порожнини шести вертикальних відбивних перегородок, установлених з проміжком відносно внутрішньої поверхні корпусу (пат. № CH559575A5).

Теплообмінний пристрій виконано у вигляді вертикальних пластин, рівномірно розташованих навколо багаторівневої мішалки під кутом до 70° до

радіуса циліндричного корпусу апарата (пат. № СН686117А5). Пластини підвішено до двох кільцевих труб з рухомим у них теплоносієм.

У пристрої аналогічної конструкції замість пластин використано плоскі пучки вертикальних теплообмінних труб (пат. № СН696802А5, заявка № WO2005/005040А1).

Вертикальний апарат з вбудованою вздовж осі трубчаткою, яка розташована над лопатевою мішалкою та одночасно є центральною циркуляційною трубою (пат. № СН578618А5).

Вертикальний апарат з теплообмінною оболонкою, стрічковою мішалкою й розміщеним усередині неї нерухомим трубчастим або змійовиковим теплообмінником забезпечує високу ефективність теплового оброблення перемішуваної рідини (пат. № JPS6377529А).

Пристрій у вигляді змонтованого під мішалкою циліндричного змійовика забезпечує не тільки нагрівання перемішуваного середовища, але й поліпшує його циркуляцію в порожнині апарата (заявка № WO2006/007681А1).

Аналогічний змійовик розташовано ззовні спіральної мішалки (заявка № WO2018/219049А1).

Апарат з плоскими вертикальними змійовиками, розташованими перед відбивними перегородками (відносно напрямку обертання мішалки) з нахилом до внутрішньої стінки корпусу (пат. № JPH0295428А). Змійовики не тільки сприяють нагріванню перемішуваної рідини, але й її поділу на численні мікропотоки з подальшим їх злиттям між собою, що інтенсифікує процес теплопередачі (за аналогією зі статичними змішувачами [15]).

Вертикальний циліндричний апарат з багаторівневою гвинтовою мішалкою й розташованим у нижній частині корпусу теплообмінним пристроєм, що складається з послідовно сполучених між собою й розміщених у вигляді вертикального пакета плоских змійовиків (пат. № CN208678949U; рис. 3.72).

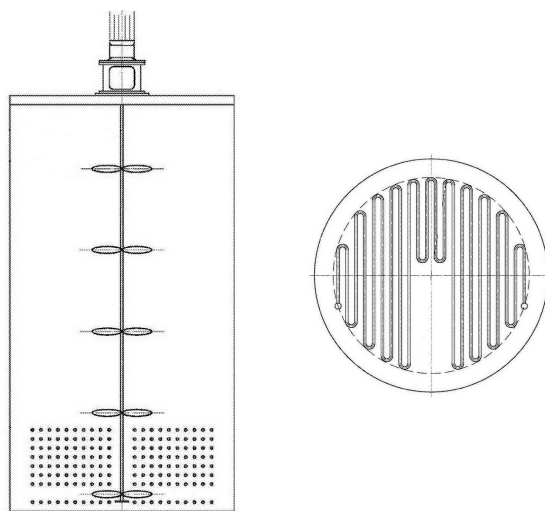


Рис. 3.72. Апарат з мішалкою й пакетом плоских змійовиків (пат. № CN208678949U)

Апарат з комбінованим нагріванням перемішуваного середовища містить парову оболонку й трубчастий вал, виконаний у вигляді циліндричного зміювика із закріпленими на ньому скребками й теплоносієм, що циркулює в ньому (пат. № UA118253C2 та UA105419U).

В аналогічному апараті перемішуване середовище нагрівається як за допомогою оболонки, так і за допомогою вала з гвинтовою лопаттю, крізь які проходить нагрівна пара (пат. № RU2066239C1).

Апарат з комбінованим нагріванням містить теплообмінну оболонку з гвинтовим каналом, а також циліндричний зміювик, що охоплює мішалку, або заглибні вертикальні труби різноманітної форми, у тому числі у вигляді плоского зміювика (пат. № US3978918A).

Апарат з комбінованим нагріванням містить теплообмінну оболонку, а також циліндричний зміювик, що охоплює листову мішалку (пат. № CN655857A5, FR2530485A1 і GB2128493A).

Апарат з комбінованим нагріванням в'язкого середовища містить теплообмінну оболонку, а також два коаксіальних циліндричних зміювиків, що охоплюють багаторівневу турбінну мішалку (пат. № GB806995A та FR1176160A).

В аналогічних апаратах замість зміювиків встановлено порожнисті циліндричні кільцеві елементи для руху нагрівного або охолодного агента (пат. № GB1199606A), у тому числі зі спіральним каналом (пат. № GB1136131A).

Апарат з комбінованим нагріванням в'язкою середовища містить теплообмінну оболонку, а також вертикальні теплообмінні трубки, які охоплюють шнекову мішалку, при цьому відповідні кінці теплообмінних трубок сполучено між собою за допомогою горизонтальних кільцевих колекторів (пат. № GB1238943A та FR1581919A).

Полімеризаційний апарат з комбінованим нагріванням або охолодженням містить теплообмінну оболонку, а також змонтовані на валу типу «труба в трубі» рознесені по його висоті та сполучені з ним диски з порожнинами для руху теплоносія (пат. № GB1250984A).

Полімеризаційний апарат з комбінованим нагріванням або охолодженням містить теплообмінну оболонку, а також змонтовані на валу типу «труба в трубі» зигзагоподібні вертикальні трубчасті лопаті, що сполучаються з порожнинами вала для руху в них теплоносія (пат. № GB1269600A; рис. 3.73).

Пристрій для термообробки реакційної маси у вигляді вертикального циліндричного апарата з теплообмінною оболонкою, а також розміщеного в його порожнині вертикального вала з поперечними відцентровими тепловими трубами S-подібної форми (у діаметральній площині апарата) (а.с. № SU1747137A1). Конструкція забезпечує високу однорідність температури середовища, що перемішується по всьому його об'єму.

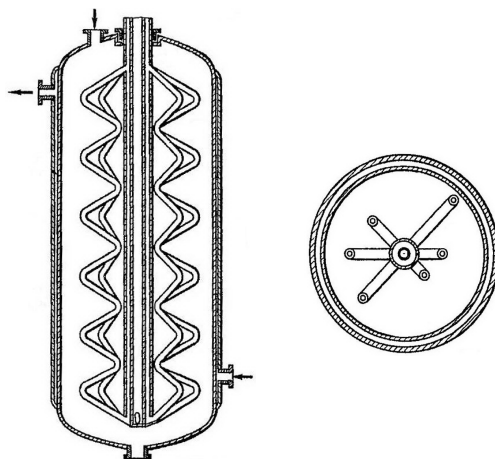


Рис. 3.73. Апарат згідно з пат. № GB1269600A

Вертикальний апарат з занурюваними стрижневими електронагрівниками, розташованими рівномірно навколо листової або всередині якірної мішалки (пат. № СН441237А та GB1136116А).

Вертикальний апарат з мішалкою й заглибленими U-подібними трубками, кожен з яких може бути оснащено індивідуальним підведенням текучого теплоносія (також трубки можуть бути об'єднані в групи або сполучені послідовно) (пат. № GB191513044А).

Апарат аналогічного принципу дії містить теплообмінну оболонку, а також розташований всередині П-подібної мішалки циліндричний змійовик, що складається з послідовно з'єднаних між собою й розташованих одна в одній двох секцій різного діаметра (пат. № FR2835046А1).

Аналогічний пристрій, але з рознесеними по висоті вертикального вала дисковою й лопатевою мішалками, описано в пат. № KR20060119714А.

Теплообмінний пристрій складається з п'яти закріплених на внутрішній поверхні корпусу апарата вертикальних порожнистих пластин для проходження теплоносія, що утворюють циркуляційну трубу з поперечним перерізом у вигляді правильного п'ятикутника (пат. № СН431463А; рис. 3.74).

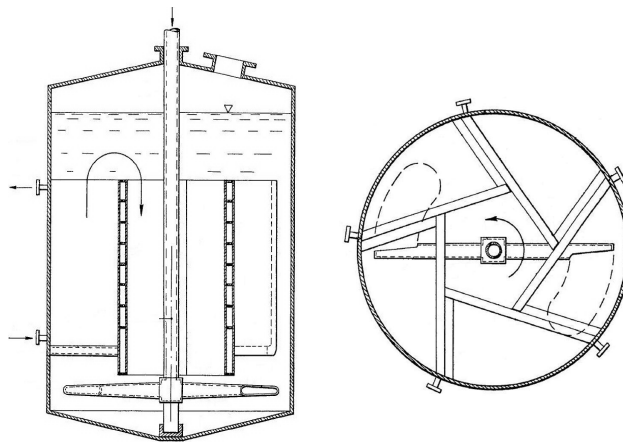


Рис. 3.74. Апарат згідно з пат. № СН431463А

Дискову мішалку з каналом для руху текучого теплоносія (вода, пара, дифеніл, масло тощо) виготовлено з полімерного композиційного матеріалу (пат. № GB1296909A). Слід зазначити, що під час проектування теплообмінних пристроїв ємнісних апаратів композиційні матеріали можуть бути надзвичайно ефективними [26, 27, 36]. Крім унікальних експлуатаційних властивостей зазначені матеріали характеризуються й високими технологічними властивостями, що забезпечують виготовлення елементів обладнання різноманітного типорозміру майже за безвідходними технологіями [30].

Як видно з вищенаведеного, незважаючи на численні конструкції теплообмінних пристроїв ємнісних апаратів з роторними мішалками, найбільш поширеними пристроями цього типу залишаються традиційні конструкції теплообмінних оболонок, а також внутрішні змійовики.

4. ЗМІШУВАЧІ ПЛАСТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1. Формування переліку змішувального устаткування пластичних матеріалів

Аналіз існуючих інноваційних змішувачів рідких високов'язких матеріалів та їхніх змішувальних елементів дає змогу сформуванню такий їх перелік для подальшого дослідження:

- змішувальні елементи черв'ячних екструдерів;
- фільтри екструдерів;
- роторні змішувачі закритого типу для пластичних мас і гумових сумішей, а також ущільнення їхніх роторів

4.2. Змішувальні елементи черв'ячних екструдерів

Одним з найбільш поширених видів технологічного обладнання для формування пластичних матеріалів, і зокрема термопластичних полімерів і матеріалів з їх застосуванням (далі – полімерні композиційні матеріали; ПКМ), є одно- і двочерв'ячні екструдери [37–41].

Екструдери призначені для підготовки розплаву ПКМ і його формування у вигляді плівкового, рулонного, листового виробу або безперервного профілю різного поперечного перерізу [42–45]. Для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей одержуваної продукції до перероблюваного полімеру традиційно додають різні компоненти (наповнювачі, барвники, стабілізатори, антиоксиданти, пластифікатори та ін.), які необхідно рівномірно розподілити в об'ємі полімерної матриці [43–45].

Для усереднення параметрів багато- або однокомпонентного ПКМ у його об'ємі (насамперед температури, густини, концентрацій компонентів) насамперед і призначено процес змішування. При цьому в загальному випадку в екструдері реалізуються всі основні види процесу змішування (рис. 4.1): гомогенізувальне (дистрибутивне, розподільне), диспергувальне, активувальне й комбіноване (найчастіше гомогенізувально-диспергувальне) [39, 41, 46, 47].

Основним робочим органом черв'ячного екструдера є один або два черв'яки, встановлені в його корпусі (циліндрі) з можливістю обертання. Оскільки процес змішування ПКМ зазвичай забезпечують безпосередньо в екструдері в умовах в'язкотекучого стану перероблюваного матеріалу, то змішувальні елементи та пристрої розташовують переважно в зоні гомогенізації розплаву ПКМ, тобто в третій функціональній зоні класичного черв'ячного екструдера [37, 41, 47–49].

Ефективна в'язкість перероблюваних ПКМ зазвичай перевищує 10 кПа·с [50], тому процес змішування компонентів в об'ємі всього потоку

ПКМ здійснюється вимушеною конвекцією й рідше – дифузією, оскільки час перебування елементарного об'єму ПКМ в екструдері незначний. Конвекційне перенесення компонентів ПКМ відбувається як під безпосередньою дією рухомих робочих поверхонь змішувальних елементів і пристроїв (найчастіше динамічних і комбінованих змішувачів), так і під дією градієнта тиску, що генерується попередніми функціональними зонами екструдера (найчастіше статичних змішувачів).

Більш ефективним є механізм змішування, заснований на одно- або багаторазовому розподілі загального потоку ПКМ на окремі струмені та їх подальшому злитті між собою. Утворювані струмені ПКМ рухаються в осьовому або радіальному (коловому) напрямку черв'яка, а також під кутом до його осі. Крім того, зазначені струмені можуть як перерозподілятися (зазвичай під час гомогенізувального змішування), так і не перерозподілятися (зазвичай під час диспергувального змішування) між собою.

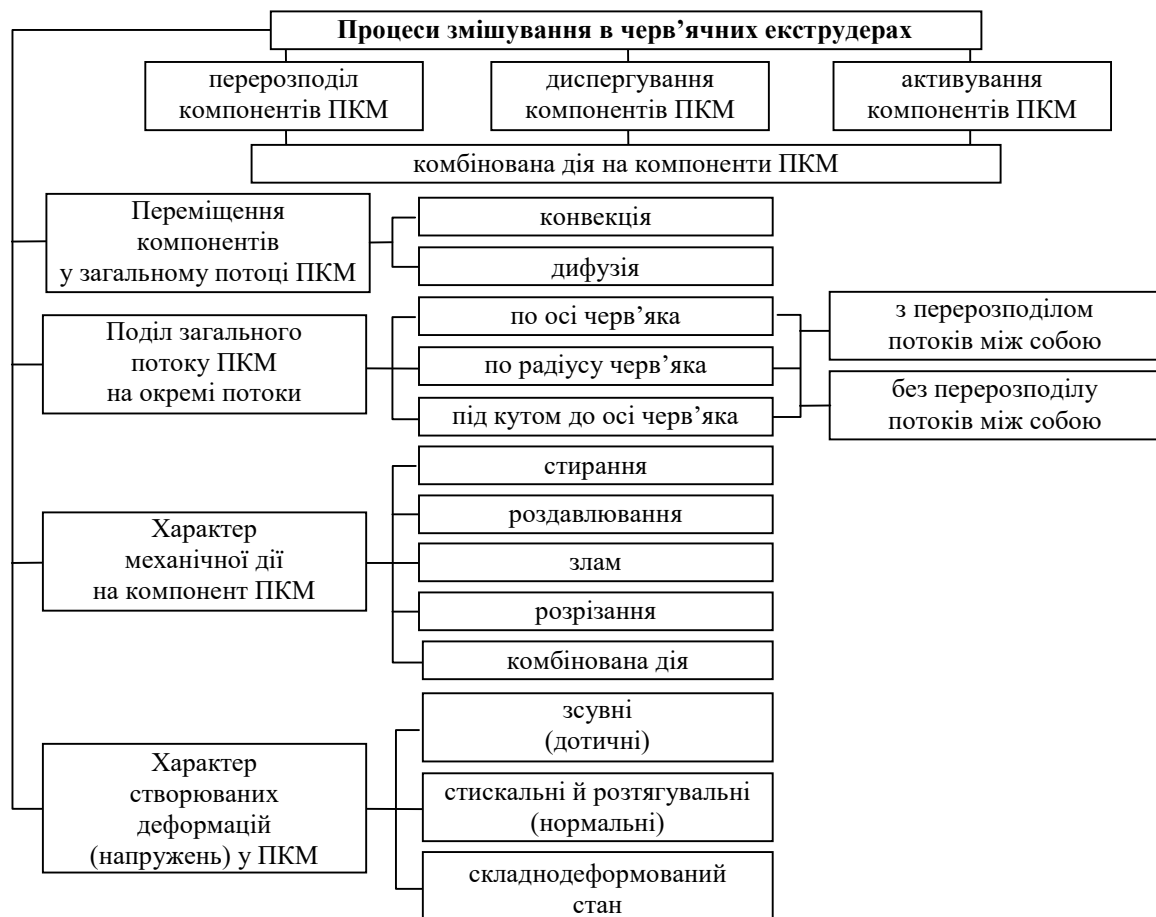


Рис. 4.1. Класифікація змішувальних ефектів в екструзійному обладнанні [15]

У разі диспергувального змішування зменшення розмірів частинок компонентів ПКМ здійснюється за допомогою практично всіх відомих механізмів руйнування: стирання, раздавлювання, зламу, розрізання або їхньої спільної дії (див. рис. 4.1).

І, нарешті, процес змішування під час екструзії здійснюється переважно під дією зсувних деформацій, що приводять до виникнення в ПКМ дотичних напружень. Набагато рідше змішування відбувається під дією стискальних і розтягувальних деформацій, що приводять до утворення нормальних напружень, або в умовах складнодеформованого стану ПКМ.

Розробниками екструзійного обладнання запропоновано різні підходи для забезпечення якісного змішування в черв'ячних екструдерах, проте в науковій і технічній літературі приділено недостатньо уваги класифікації розроблених змішувальних елементів і пристроїв.

Насамперед змішувальні елементи поділяються залежно від типу черв'ячних екструдерів: одно- чи двочерв'ячних (рис. 4.2).

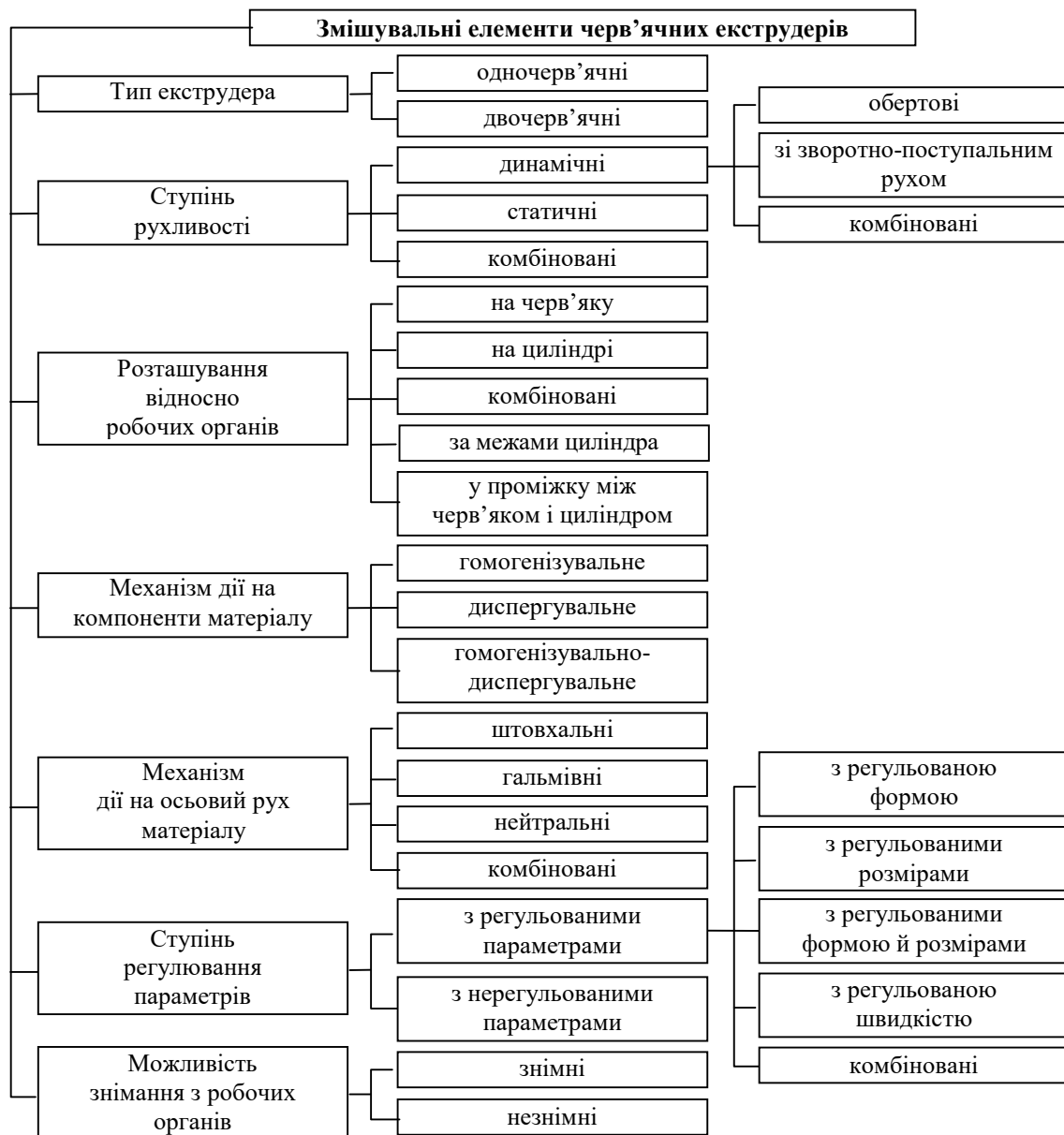


Рис. 4.2. Класифікація змішувальних елементів черв'ячних екструдерів

При цьому, незважаючи на здавалося б можливість використання зазначених елементів в обох типах екструдерів, у ряді випадків змішувальні елементи розробляються під певний тип черв'ячної машини (рис. 4.3).

Залежно від наявності в змішувальних елементах рухомих поверхонь, що взаємодіють з перероблюваним ПКМ, їх поділяють на статичні, динамічні й комбіновані.

Статичні елементи не мають рухомих робочих поверхонь, а змішувальний ефект забезпечується передусім за рахунок багаторазового розподілу в'язкотекучого ПКМ на окремі потоки з подальшим їх злиттям (як з перерозподілом, так і без перерозподілу їх між собою). Такі елементи виконують у вигляді різноманітних решіток, сит, розсікачів, шайб тощо, крізь отвори та канали яких ПКМ рухається під впливом тиску, що генерується попередніми функціональними зонами екструдера (рис. 4.4).

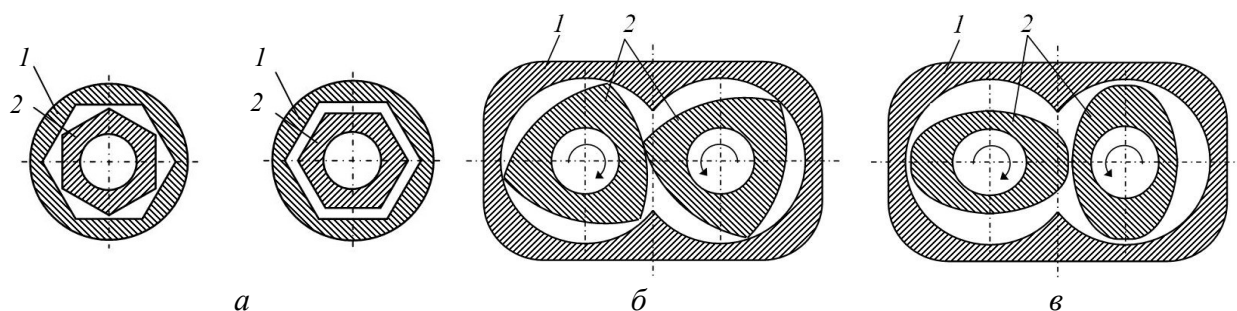


Рис. 4.3. Схема змішувальних кулачків одно- и двочерв'ячних екструдерів шестигранної (а), трикутної (б) та овальної (в) форми ([48], заявка DE102006009867A1: 1 – циліндр; 2 – кулачки

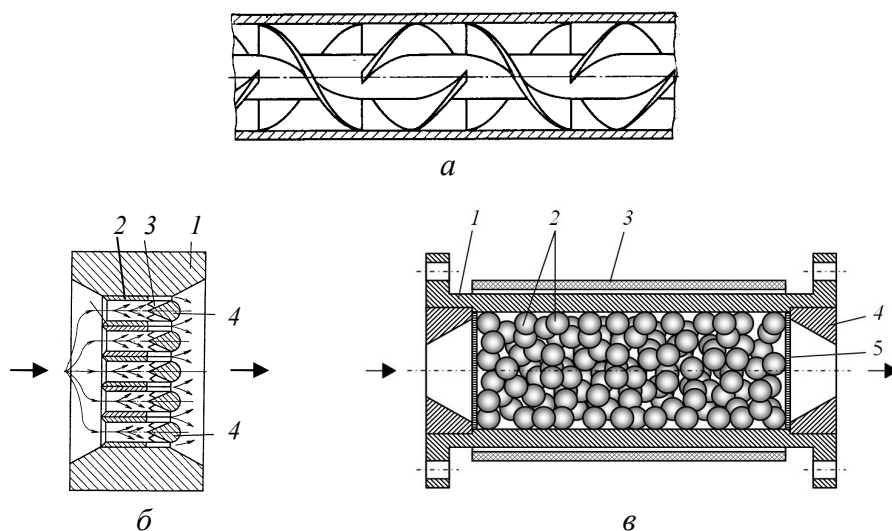


Рис. 4.4. Конструкції статичних змішувачів: а – у вигляді труби з переривчастим двозахідним шнеком [38]; б – згідно з а. с. SU1781049A1 (1 – корпус; 2 – трубка; 3 – прорізи; 4 – вставка); в – пат. № UA69843U (1 – корпус; 2 – насадкові тіла; 3 – котушка індуктивності; 4 – перехідник; 5 – перфорована перегородка)

У конструкції статичного змішувача згідно з пат. № UA69843U (див. рис. 4.4, в) порожнистий корпус виконано з немагнітного матеріалу й містить розміщені в ньому насадкові тіла, виготовлені з магнітного матеріалу з точкою Кюрі, що відповідає температурі проведення процесу змішування, при цьому із зовнішнього боку корпуса змонтовано котушку індуктивності. Перероблюваний ПКМ послідовно рухається крізь розташований на вході в корпус перехідник, а потім крізь отвори перфорованих перегородок і потрапляє до порожнини корпуса. Далі, проходячи між насадковими тілами, ПКМ багаторазово поділяється на окремі потоки, і нарешті, крізь перфоровану перегородку й перехідник на виході з корпуса видаляється за його межі.

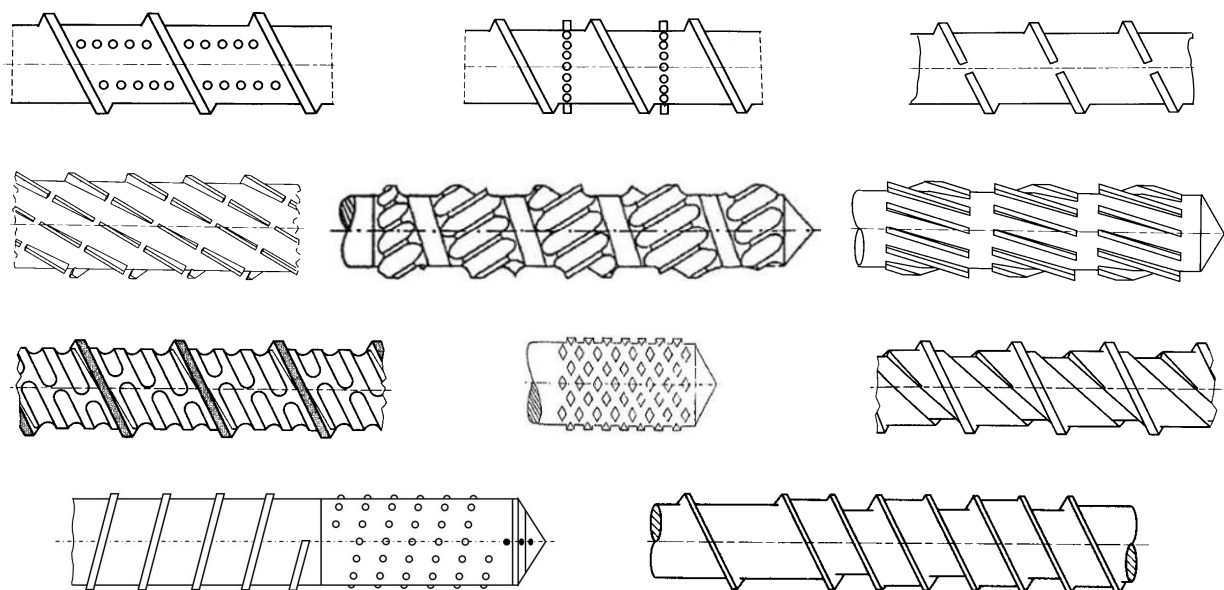
При підключенні котушки індуктивності до джерела електричного струму елементи насадки внаслідок індукції нагріваються. За умови досягнення ними температури, що відповідає точці Кюрі матеріалу насадкових тіл, вони втрачають магнітні властивості й у результаті перестають нагріватися. За подальшого поступового охолодження матеріал насадкових тіл знову набуває магнітних властивостей, і вони знову починають нагріватися. Таким чином, без використання складної системи теплової автоматики підтримується постійна температура насадкових тіл, а отже й перероблюваного ПКМ.

Безсумнівна перевага статичних змішувачів – відсутність рухомих елементів і досить проста експлуатація. У той самий час, вони мають деякі недоліки: значний опір, часом – невисокий змішувальний ефект, можливість утворення застійних зон і нерівномірність часу перебування елементарних об'ємів ПКМ у зоні змішування.

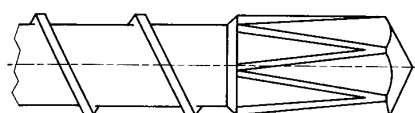
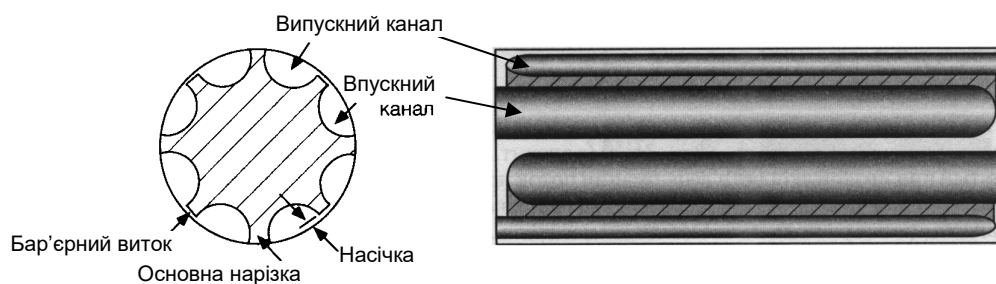
Найбільш поширеними є динамічні елементи, що виконуються з однією або декількома рухомими робочими поверхнями часто досить складної конфігурації. У цих пристроях процес змішування забезпечується передусім за рахунок зсувного впливу на перероблюваний ПКМ. Крім того, за допомогою динамічних елементів часто організуються досить ефективні з точки зору змішування зворотні потоки (у статичних елементах наявність зворотних потоків призводить до значного збільшення гідравлічного опору).

У динамічних елементах різноманітні виступи (штифти), виконані на черв'яку (рис. 4.5), можуть імітувати його дискретну нарізку: пряму (штовхальну), зворотну (гальмувальну) або нейтральну.

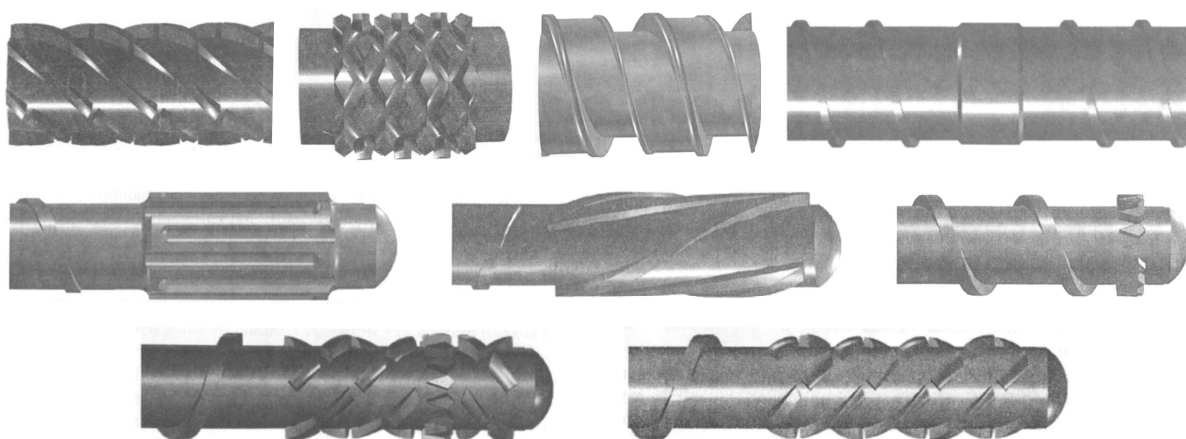
При цьому виконання зазначених штифтів знімними дає змогу досить просто змінювати їхні форму й розміри, а виконання їх у вигляді лопаток, що встановлюються в знімній гільзі черв'яка з можливістю повороту відносно поздовжньої осі й фіксації в потрібному положенні, дає змогу регулювати функцію утвореної дискретної нарізки (забезпечуючи штовхальну, гальмувальну або нейтральну функцію; пат. № UA53891U). Також запропоновано досить просту конструкцію штифтового черв'яка з можливістю одночасного регулювання висоти штифтів (пат. UA47082U).



a



б



в

Рис. 4.5. Приклади деяких конструкцій динамічних елементів [39–41]:
a – гомогенізувальні елементи; *б* – диспергувальні (диспергувально-гомогенізувальні) елементи; *в* – об'ємний вигляд деяких конструкцій динамічних елементів черв'яка

Під час перероблення різних ПКМ широкого поширення набули диспергувальні (диспергувально-гомогенізувальні) елементи, що мають два види витків нарізки: основний (штовхальний, очисний) і бар'єрний, діаметр якого менший за діаметр основного витка (див. рис. 5, б).

Під час обертання такого елемента потік ПКМ у вигляді тонкого шару проходить між гребенем бар'єрного витка й стінкою циліндра екструдера і за допомогою сусіднього основного витка проштовхується в бік екструзійної головки. Під час проходження ПКМ над гребенем бар'єрного витка відбувається інтенсивне диспергування компонентів перероблюваного матеріалу.

Комбіновані змішувальні елементи мають переваги й недоліки як статичних, так і динамічних змішувачів. У цьому випадку динамічні елементи комбінованих змішувальних пристроїв часто виконуються з різними каналами: наскрізними або поверхневими (пат. № UA73358U; рис. 4.6, а).

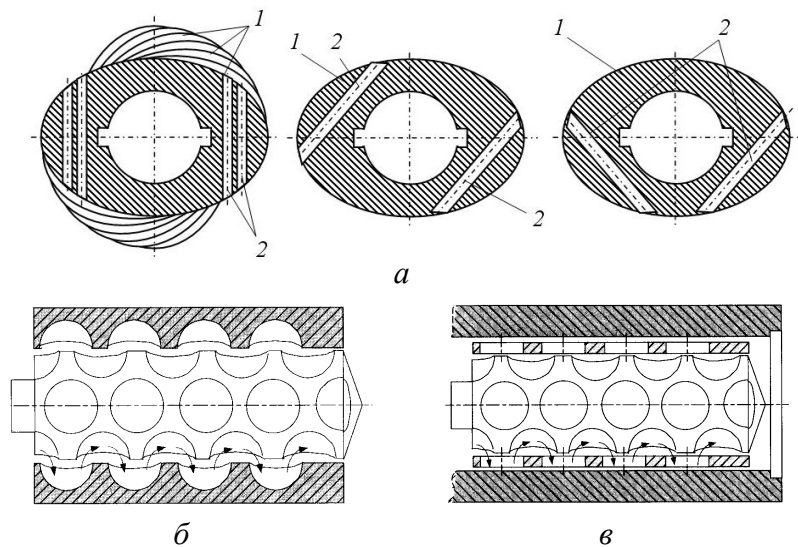


Рис. 4.6. Комбіновані змішувальні елементи (динамічно-статичні):
а – згідно з пат. № UA73358U (1 – змішувальні кулачки; 2 – наскрізні канали);
б – змішувач типу СТМ [41]; в – змішувач типу ТМР [41]

Часто також динамічні елементи комбінованих змішувальних пристроїв виконуються у вигляді конструктивної частини черв'яка, а статичні – конструктивної частини корпусу екструдера (рис. 4.6, б) [41]. На відміну від змішувача типу СТМ у змішувачі типу ТМР (рис. 4.6, в) [41] циліндр виконується без заглиблень, що спрощує його виготовлення, а їхню роль виконують наскрізні отвори, виконані у втулці, вільно розташованій між циліндром і черв'яком. Під дією перероблюваного ПКМ втулка починає обертатися; при цьому, внаслідок меншої, ніж у черв'яка швидкості обертання, здійснюється інтенсивне перемішування ПКМ.

Комбіновані елементи досить ефективні, проте вони складні у виготовленні та експлуатації.

За розташуванням відносно робочих органів змішувальні елементи поділяють на такі, які розташовуються на черв'яку, корпусі екструдера, одночасно на черв'яку й корпусі, поза черв'яком і корпусом (у проміжку між ними й закріплені, наприклад, на екструзійній головці), а також за межами корпуса екструдера (наприклад, під час проходження ПКМ крізь виносний змішувальний елемент за допомогою розплавопроводу, наприклад, крізь змішувально-нагнітальний шестеренний насос).

Найбільш переважними елементами є такі, які не потребують внесення істотних змін у конструкцію базової машини. Ці елементи найчастіше встановлюються на одному чи обох черв'яках або виконуються як одне ціле з ними. Виконання змішувальних або змішувально-диспергувальних елементів за одне ціле з черв'яком доцільно в разі комплектування екструдером технологічної лінії стабільного виробництва, коли немає потреби в переході на інший перероблюваний ПКМ. І навпаки, виконання знімних, легко замінюваних елементів забезпечує значну гнучкість технологічного обладнання в разі частої зміни перероблюваного матеріалу, продуктивності або типорозміру одержуваної продукції.

Найбільш поширеними змішувальними елементами, що встановлюються на корпусі екструдера, є радіально розташовані в робочому каналі й такі, що проходять крізь кільцеві розриви в нарізці черв'яка радіальні штифти (так званий екструдер зі штифтовим циліндром; рис. 4.7) [37, 39]. Наприклад, у пристрої згідно із заявкою DE102006009867A1 вказані штифти виконано у вигляді лопаток, встановлених у корпусі з можливістю їх повороту відносно поздовжньої осі та фіксації в потрібному положенні. Таке виконання штифтів дає змогу регулювати ступінь впливу на перероблюваний ПКМ і час його перебування в зоні змішування [51].

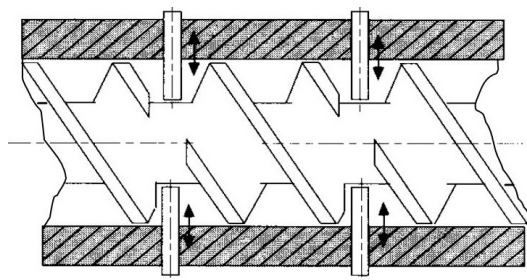


Рис. 4.7. Схема екструдера зі штифтовим циліндром

Аналогом попередньої конструкції можна вважати екструдер із змішувально-диспергувальними елементами у вигляді сукупності встановлених між черв'яком і циліндром тіл кочення, зокрема кульок (пат. № UA98920U; рис. 4.8).

Черв'ячний екструдер містить оснащений завантажувальним бункером 1 порожнистий корпус 2, розміщений в його порожнині з можливістю обертання

черв'як 3, що утворює з порожниною корпуса робочий канал 4, при цьому кінцевий ділянку 5 черв'яка 3 виконано у вигляді круглого циліндра, а між зазначеною ділянкою 5 черв'яка 3 і корпусом 2 розміщено тіла обертання 6, розташовані в кільцевій проточці 7, виконаній на кінцевій ділянці 5 черв'яка 3. Ділянка 5 черв'яка 3 може мати діаметр, рівний діаметру гребенів нарізки черв'яка 3 або трохи більше його (у цьому разі утворений дисково-циліндричний елемент на кінці черв'яка 3 істотно поліпшує диспергувально-змішувальну здатність екструдера).

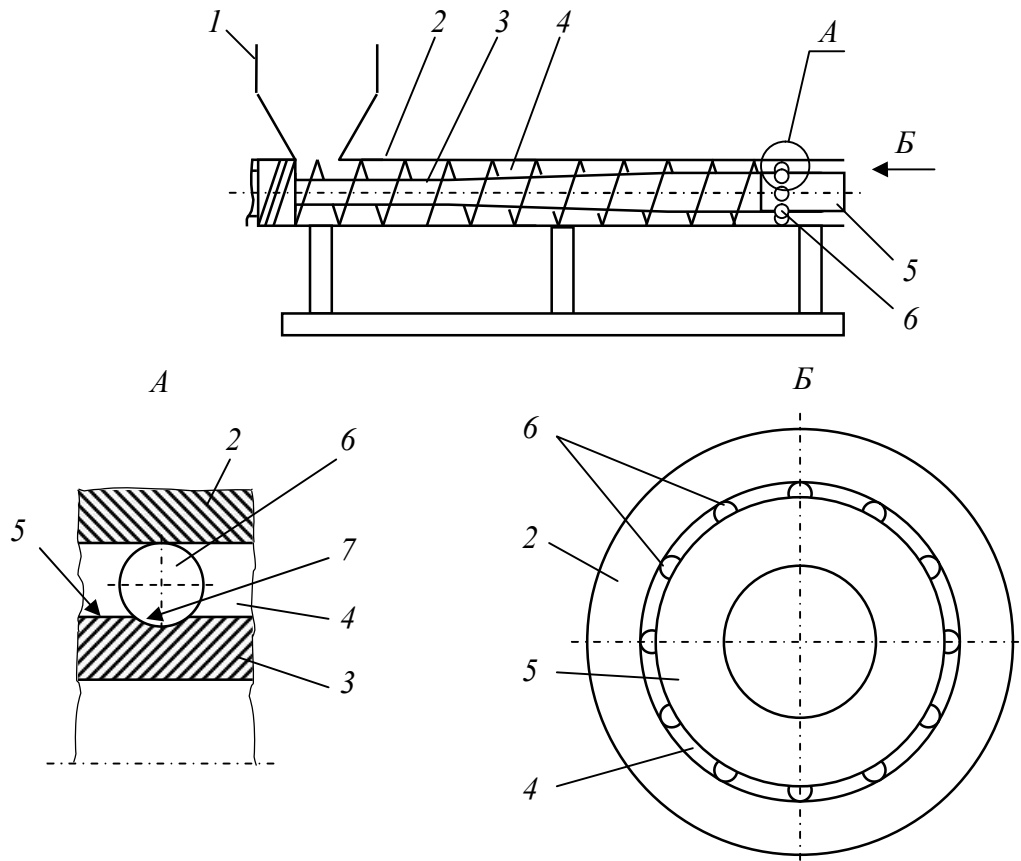


Рис. 4.8. Схема екструдера зі змішувальними кульками (пат. № UA98920U)

Матеріал, що підлягає переробленню, подають у завантажувальний бункер 1 порожнистого корпуса 2, де він захоплюється нарізкою черв'яка 3 і далі робочим каналом 4 транспортується в напрямку кінцевої ділянки 5 черв'яка 3. Під час обтікання розплавом тіл обертання 6 відбувається його гомогенізація, яка підвищує якість одержуваної продукції. Вказані тіла обертання 6 не тільки сприяють гомогенізації розплаву, але й фіксують черв'як 3 від прогину, а отже й стабільність кільцевої форми робочого каналу на виході з кінцевої ділянки 5 черв'яка 3, що забезпечує високу якість екструдату.

Подібне технічне рішення запропоноване й в пат. № UA119024U, у якому як змішувально-диспергувальні елементи використано поздовжні

стрижні з циліндричними кінцевими ділянками, розміщеними в пазах гребеня сусідніх витків гвинтової нарізки черв'яка (рис. 4.9).

Черв'ячний екструдер містить порожнистий корпус 1, розміщений в його порожнині з можливістю обертання черв'як 2, який утворює з порожниною корпусу 1 робочий канал 3 щонайменше з однією ділянкою 4 з розміщеними між черв'яком 2 і корпусом 1 обертовими елементами 5, при цьому кожен ділянку 4 розташовано в межах нарізки черв'яка 2, а обертові елементи 5 виконано поздовжніми з циліндричними кінцевими ділянками 6 і 7, розміщеними в пазах 8 гребенів 9 сусідніх витків нарізки черв'яка 2. Також середню частину обертових елементів 5 може бути виконано з поперечним перетином, відмінним від круглого, наприклад квадратним.

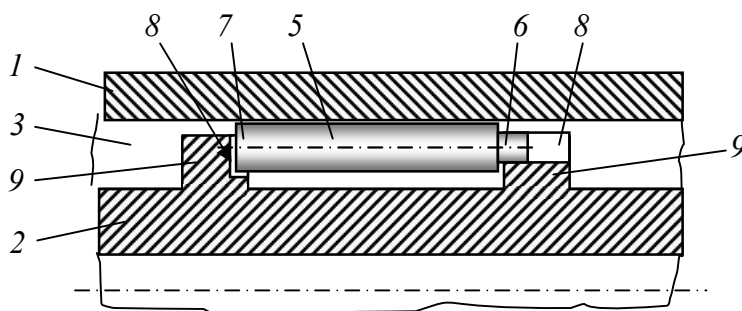


Рис. 4.9. Схема екструдера зі змішувальними стрижнями (пат. UA119024 U)

Матеріал, що підлягає переробленню, подають у завантажувальний бункер порожнистого корпусу 1, де він захоплюється нарізкою черв'яка 2 і далі робочим каналом 3 транспортується до наконечника черв'яка 2. Під час обтікання розплавом обертових елементів 5 завдяки підвищеним деформаціям зсуву відбувається його інтенсивне перемішування, а також диспергування компонентів перероблюваного матеріалу, що підвищує якість продукції. Зазначені обертові елементи 5 не тільки сприяють гомогенізації розплаву, але й фіксують черв'як 2 від прогину, а отже й забезпечують стабільність кільцевої форми робочого каналу на виході з черв'яка 2, що забезпечує рівнотовщинність одержуваних трубчастих виробів.

Комбінацію штифтового черв'яка екструдера та оснащеної дорном екструзійної головки запропоновано в пат. № UA119897U (рис. 4.10).

Одочерв'ячний екструдер містить порожнистий корпус 1 з оснащеною нерухомим дорном 2 екструзійною головкою 3, а також розміщений у порожнині корпусу 1 з можливістю обертання черв'як 4 зі змішувальною секцією 5 на його кінцевій ділянці. Змішувальну секцію 5 черв'яка 4 оснащено радіальними штифтами 6 і виконано порожнистою з можливістю розміщення в ній дорна 2 екструзійної головки 3.

При цьому дорн 2 у поперечному перерізі на ділянці розташування радіальних штифтів 6 виконано некруглої форми, наприклад, у вигляді еліпса, гіпоциклоїди, епіциклоїди або овала Кассіні, а штифти 6 розміщено в радіальних отворах 7 черв'яка 4 з можливістю зворотно-поступального руху.

Перероблюваний матеріал подають у завантажувальний бункер порожнистого корпусу 1, де він захоплюється нарізкою черв'яка 4 і далі робочим каналом транспортується в напрямку його кінцевої ділянки. Під час обтікання розплавом рухомих штифтів 6 відбувається його інтенсивне перемішування, а також диспергування компонентів перероблюваного матеріалу.

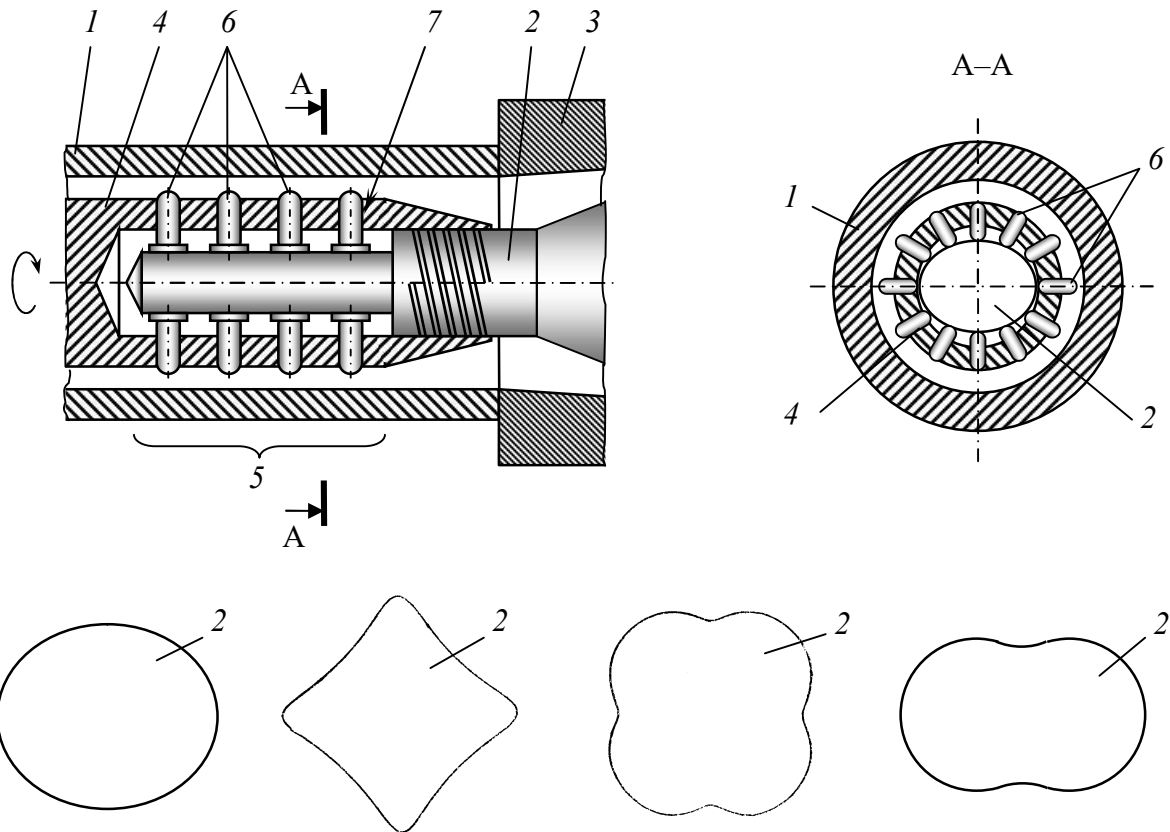


Рис. 4.10. Схема екструдера зі змішувальними стрижнями (пат. № UA119897U)

Зокрема під час обертання черв'яка 4 за рахунок контакту штифтів 6 з фігурною поверхнею нерухомого дорна 2 забезпечується їх зворотно-поступальний рух у робочому каналі екструдера (між черв'яком 4 і корпусом 1), а отже інтенсивна дія штифтів 6 на перероблюваний матеріал, що підвищує змішувально-диспергувальний ефект екструзії.

Нарешті, за рівнем регулювання параметрів змішувальні елементи поділяються на елементи з фіксованими параметрами, використовуваними в екструдерах з мало змінюваними режимами перероблення (наприклад, у великотоннажних виробництвах), і з регульованими параметрами. До регульованих параметрів насамперед належить геометричні (форма й розміри), а також швидкість рухомих поверхонь змішувальних елементів. Елементи, що є частиною черв'яка, зазвичай не дають змоги регулювати швидкість їх обертання. У той же час, ділянки корпусу, що обертаються або виконують зворотно-поступальний рух ([52], заявка № DE102006023835A1),

дають змогу досить легко регулювати їхню швидкість. Також легко регулюється швидкість обертання дорнів різного типу дисипативних (зсувних) екструзійних головок (рис. 4.11) [52], істотним недоліком яких є складність їх виготовлення та експлуатації [53].

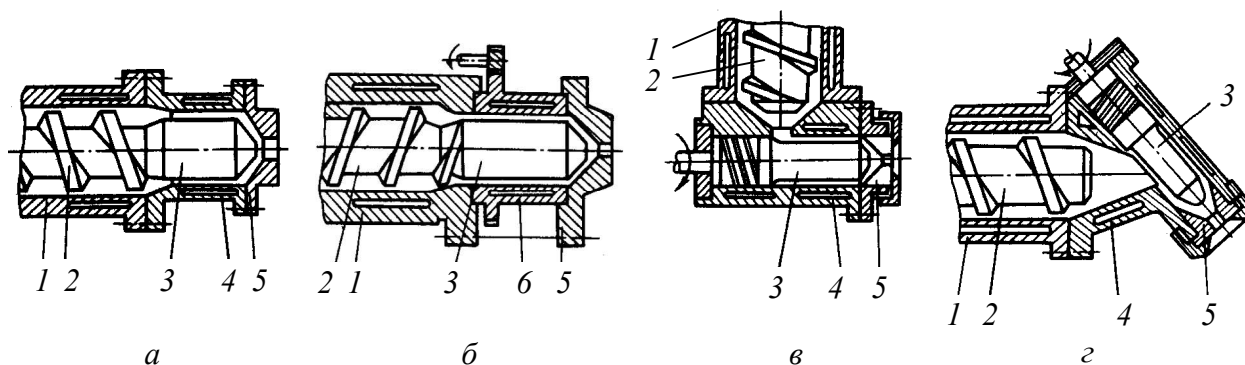


Рис. 4.11. Схеми змішувальних елементів без регулювання (а) і з регулюванням (б–г) відносної швидкості обертання їхніх робочих поверхонь [52]: 1 – циліндр; 2 – черв’як; 3 – дорн; 4 – корпус головки; 5 – формувальний інструмент; 6 – обертова втулка

Потрібно зазначити, що ефективне використання існуючих або розробка нових змішувальних елементів черв’ячних екструдерів передбачає проведення відповідних ґрунтовних експериментальних або теоретичних досліджень. Це пов’язано з тим, що в разі використанні певного елемента й переході на перероблення іншого ПКМ (у тому числі вторинного, властивості якого можуть істотно відрізнятися від властивостей первинного матеріалу [47, 54]) або навіть зміни режиму перероблення одного й того самого ПКМ параметри процесу екструзії можуть зазнавати істотних небажаних змін і призвести до зниження якості одержуваної продукції.

4.3. Фільтри екструдерів

Під час екструзії відповідальних полімерних виробів, наприклад, тонких плівок, для очищення розплаву полімеру від різних включень, зокрема від полімерних гранул, що не розплавився, екструдер оснащують фільтром [37, 40, 55].

Призначення фільтра визначає вимоги до нього: герметичність, швидка заміна або очищення фільтрувальних елементів, відсутність застійних зон, а також низький градієнт температури та швидкості потоку по поперечному перерізу розплаву. При цьому фільтри встановлюють переважно в екструдерах безперервної дії: черв’ячних, дискових, комбінованих і каскадних [30].

Крім того, фільтри можна розглядати і як додаткові змішувачі екструдерів, оскільки вони за аналогією зі статичними змішувачами не тільки забезпечують виділення з розплаву сторонніх домішок, але й багаторазове розділ потоку розплаву на мікропотоки з подальшим злиттям їх між собою, що підвищує гомогенізацію розплаву [56].

Розроблено багато тисяч конструкцій фільтрів (тільки у фондах Європейського патентного відомства станом на кінець 2021 року налічувалося понад 5200 документів з даної тематики), тому далі зупинимося лише на найбільш цікавих конструкціях.

Аналіз конструктивного оформлення фільтрів екструдерів для переробки полімерних матеріалів та гумових сумішей дозволяє запропонувати їхню класифікацію (рис. 4.12).

За місцем розташування фільтра розрізняють фільтри, розташовані в каналі екструдера, за межами каналу екструдера (у розплавопроводі, а також між екструдером і формувальною головкою) і безпосередньо у формувальній головці.

Фільтр у вигляді знімного поворотного блоку встановлено між екструдером і формувальною головкою (пат. № CH593786A5). Зазначений блок містить рівномірно виконані по колу комірки з фільтрувальними елементами, а також систему каналів, що забезпечують одночасну роботу одного з елементів та очищення іншого елемента зворотним потоком розплаву.

Фільтри змонтовано в розплавопроводі за межами робочого каналу екструдера та містять два фільтрувальних елементи, які працюють по черзі (а. с. № SU1380987A1 і SU1426826A2). Фільтри характеризуються високим гідравлічним опором і матеріалоємністю.

Фільтр змонтовано в розплавопроводі екструдера, винесеному за межі середньої частини робочого каналу екструдера (а. с. № SU1514637A1; рис. 4.13). Недолік конструкцій – складність очищення та висока матеріалоємність.

Аналогічні конструкції запропоновано в пат. № KR102096460B1, US5419634A та заявці № WO93/04841A1.

Виконані у вигляді пористого стакану фільтрувальні елементи також змонтовано в розплавопроводі (пат. № FR2111117A5 і GB1340233A). Недолік конструкцій – розташування вхідного й вихідного патрубків фільтра під кутом 180°, що збільшує його гідравлічний опір.

За принципом очищення фільтруючих елементів розрізняють фільтри зі знімними та стаціонарними фільтрувальними елементами (тобто з фільтрувальними елементами, що очищаються за межами фільтра, а також безпосередньо у фільтрі). Ця ознака класифікації аналогічна поділу фільтрів за характером дії в часі – фільтри періодичної (циклічної) та безперервної дії.

Знімний фільтр для очищення розміщують в обігрівній ємності, в яку подається розчинник для видалення з фільтрувальних дискових елементів залишків полімеру й виділених забруднень (пат. № JP2018001052A). Недолік конструкції – необхідність регенерації розчинника.

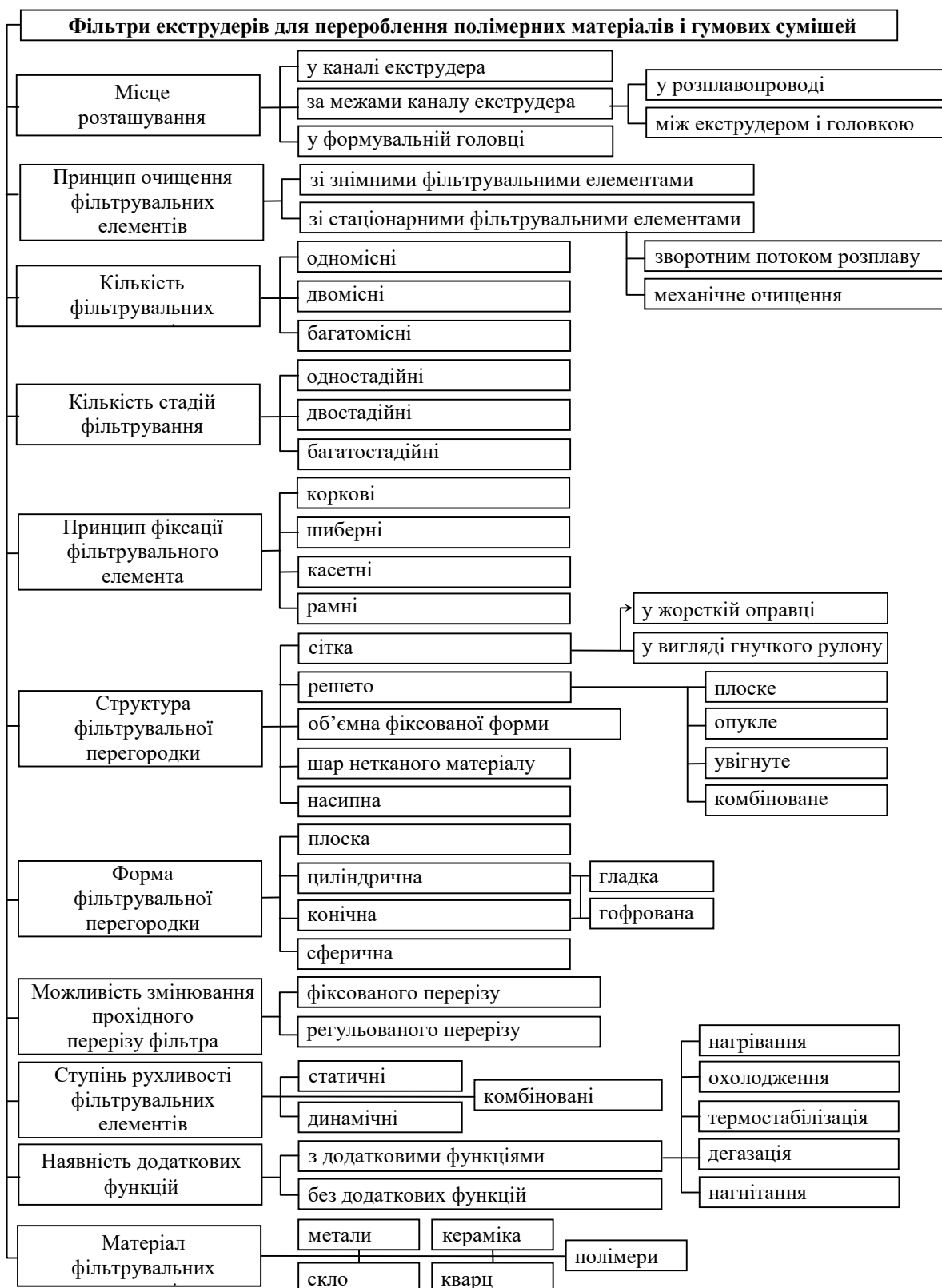


Рис. 4.12. Класифікація фільтрів екструдерів для перероблення полімерних матеріалів і гумових сумішей

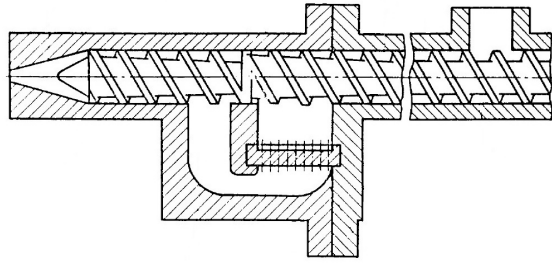


Рис. 4.13. Фільтр, розміщений у розплавопроводі (а. с. № SU1514637A1)

Знімний забруднений фільтр очищають не тільки в кислому та лужному середовищах, але й піддають ультразвуковому обробленню (пат. № JP2019013890A).

Стаціонарні фільтри містять корпус з поворотною кульовою пробкою та закріпленими в ній двома фільтрувальними решітками. У процесі роботи одна решітка здійснює фільтрацію, а друга піддається очищенню зворотним потоком розплаву полімеру (пат. № RU2293655C1, CN504945A та FR1550932A). Після забруднення робочої решітки кульову пробку повертають. Перевага пробкових фільтрів – простота конструкції та механізації зміни фільтрувальних елементів, а недолік – обмежена (до 60 кг/год) продуктивність [55].

В аналогічному фільтрі два пакети сіток закріплено під прямим кутом один відносно одного не в кульовій, а в циліндричній пробці (пат. № FR1569573A). У разі забруднення пакету сіток циліндр повертають, а зазначений пакет чистять.

Стаціонарний фільтр виконано у вигляді обертової циліндричної сітки з подачею розплаву на її зовнішню поверхню, до якої прилягає скребок для видалення з фільтрувальної поверхні забруднень (пат. № RU2579449C2).

Стаціонарний фільтр у вигляді обертової циліндричної сітки з подачею розплаву на її зовнішню поверхню, при цьому поверхню сітки по колу розділено на кілька зон (а. с. № SU956277A1). У певний час фільтрування здійснюється лише крізь одну зону з боку зовнішньої поверхні сітки, в той час як крізь інші зони розплав проходить у протилежному напрямку, видаляючи виділені забруднення за межі екструдера.

Стаціонарний фільтр виконано у вигляді порожнистого щілинного циліндра з розташованим всередині нього очисним шнеком, оснащеного індивідуальним приводом обертання (а. с. № SU1514636A1).

Розроблено стаціонарний фільтр з механічним очищенням жорсткої фільтрувальної перегородки за допомогою дволопатевих криволінійних скребків, що переміщують домішки до периферії перегородки (пат. № KR20150144539A; рис. 4.14, а).

Аналогічні фільтри з дволопатевиими скребками описано в пат. № CN107791488A, CN107791490A та заявці № EP2764976A2, а фільтр з чотирилопатевим криволінійним скребком – у пат. № CN209718576U.

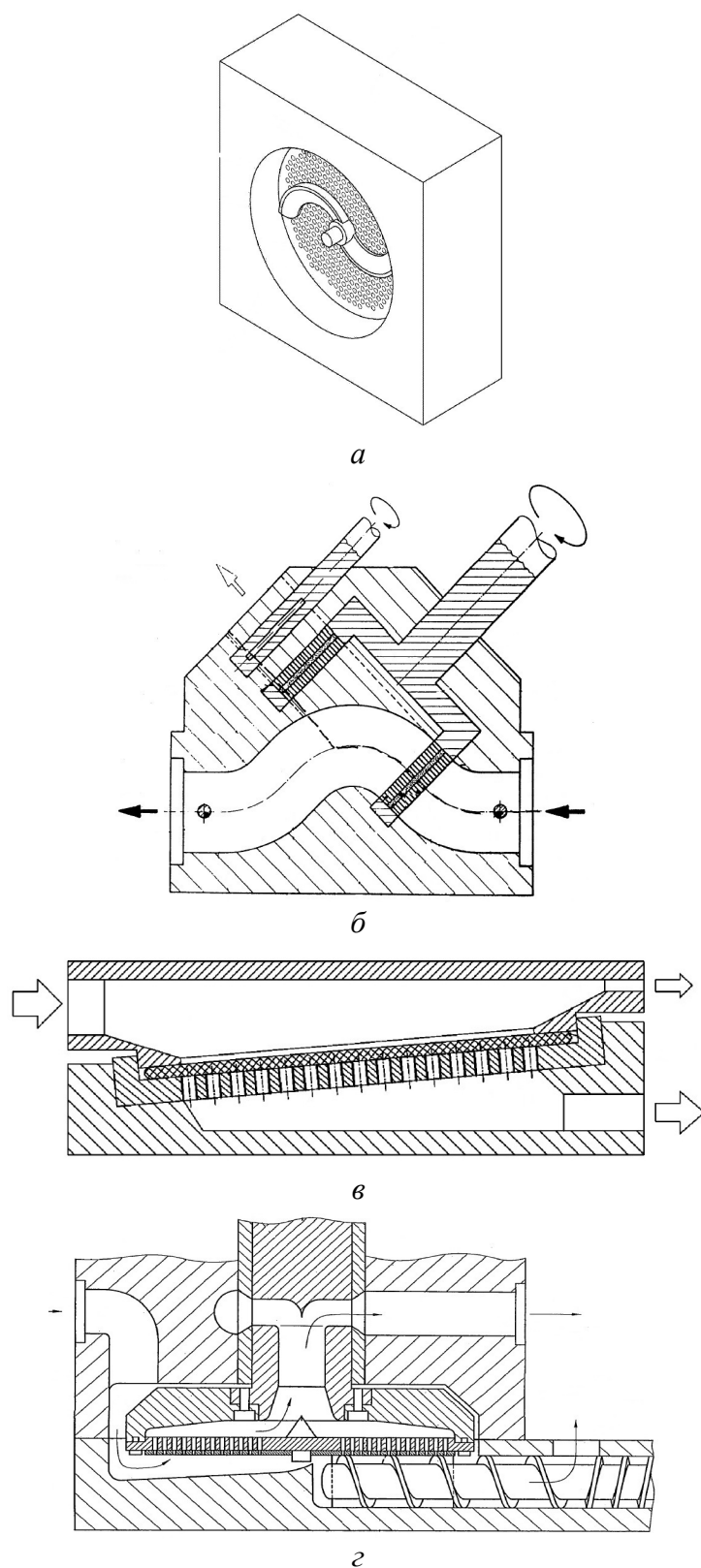


Рис. 4.14. Фільтри з механічним очищенням фільтрувального елемента:
 а – пат. № KR20150144539A; б – пат. № DE3716707A1;
 в – заявки № WO2016/131071A2, DE102016202489A1;
 г – заявка № US2010/006492A1

Фільтр з двома циліндричними фільтрувальними гільзами, у кожній з яких розташовано поршень для періодичного видалення виділених з розплаву домішок (заявки № EP2907646A1 і DE102014101776A1).

Стаціонарний фільтр безперервної дії з промиванням обертового фільтрувального стакану зворотним потоком розплаву (пат. № DE3716707A1; рис. 4.14, б). Недолік конструкції – складність виготовлення.

Стаціонарний фільтр з безперервним очищенням плоского похилого фільтрувального елемента частиною основного потоку розплаву (заявки № WO2016/131071A2, DE102016202489A1; рис. 4.14, в).

Стаціонарний фільтр з безперервним очищенням фільтрувального елемента у вигляді круглого диска приводним шнеком (заявка № US2010/006492A1; рис. 4.14, г). Недолік фільтра – висока матеріало- та енергоємність.

За кількістю фільтрувальних елементів розрізняють одно-, дво- та багатомісні фільтри.

Двомісні фільтри містять два паралельно (заявка № EP1762364A2) або послідовно чи паралельно працюючі фільтрувальні елементи (пат. № DE2403765A1, заявка № DE202010001628U1).

Подвійні фільтри по черзі використовують два фільтрувальні елементи закріплено в спільному шибері, розташованому з можливістю переміщення перпендикулярно осі черв'яка (пат. № CH477282A, FR1490131A, GB1258188A, DE19702806C1, KR10211111196B1, JP2016022660A, CN107891592A та US6260852B1, заявка № WO03/031154A1). У разі забруднення елемента за допомогою шибера його виводять за межі екструдера, чистять і встановлюють на місце, при цьому очищення розплаву забезпечує інший фільтрувальний елемент.

На відміну від попередніх конструкцій двомісних фільтрів з плоскими фільтрувальними елементами запропоновано фільтри із закріпленими в шибері елементами у вигляді сукупності пористих стаканів з рухом розплаву від їхніх зовнішніх до внутрішніх поверхонь (заявка № EP3321061A1) або навпаки – від внутрішніх до зовнішніх (пат. № GB2073038A, DE2119545A1 і DE2315344A1).

У двомісному фільтрі два поперемінно працюючих фільтрувальних елементи закріплено в окремих шиберах, що перекривають два паралельні канали для проходження розплаву й розташованих з можливістю переміщення перпендикулярно осі черв'яка (пат. № FR2409847A1 і GB1587580A).

Оригінальна зміна фільтрувальних елементів двомісного фільтра у вигляді обойми, що коливається (пат. № JP2018126867A та JP2019072926A; рис. 4.15, а).

Двомісний фільтр містить два паралельно розташовані трубчасті фільтрувальні елементи (пат. № JP2017001357A). З допомогою кульових

кранів забезпечується як одночасна робота обох елементів, так і послідовна (один елемент працює, а другий очищається зворотним потоком розплаву).

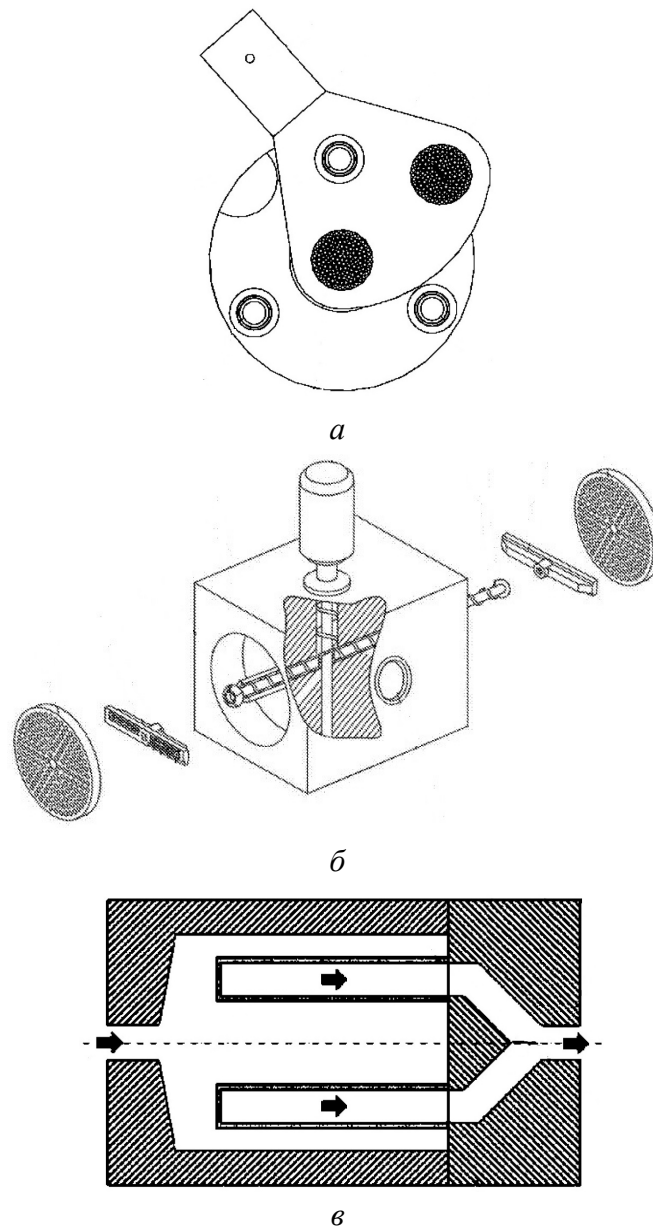


Рис. 4.15. Двомісні (а, б) і багатомісні (в) фільтри: а – пат. № JP2018126867А та JP2019072926А; б – пат. № CN107856275А та CN207310486U; в – пат. № JP2017170620А

Двомісний фільтр містить два фільтрувальні елементи, які за допомогою чотирьох кульових кранів працюють одночасно або послідовно, коли один елемент працює, а другий піддається очищенню після його вилучення з фільтра (пат. № СН483919А, FR1554412А та GB1168063А).

Двомісний фільтр містить два фільтрувальні елементи, що працюють по черзі за допомогою розташованих на вході та виході з них двох кульових розподільників потоку розплаву (пат. № DE1779497А1).

Двомісний фільтр безперервної дії містить корпус з двома фільтрувальними дисками, оснащеними обертовими очисними елементами (пат. № CN107856275A та CN207310486U; рис. 4.15, б). Виділені домішки зчищаються з внутрішньої поверхні дисків і крізь порожнисті вали видаляються за межі фільтра. Недолік фільтра – складність виготовлення та експлуатації.

У багатомісних фільтрах кілька поперемінно працюючих фільтрувальних елементів закріплено в загальному шибєрі, розташованому з можливістю переміщення перпендикулярно осі черв'яка (пат. пат. № DE1554913B1, DE2719790A1, CN625722A5, GB1574644A, GB2060423A, CN206983224U та CN207140304U).

У багатомісному фільтрі фільтрувальні елементи закріплено рівномірно на колу в круглому поворотному диску, встановленому перпендикулярно осі екструдера (пат. № KR20190038811A, JP2019527618A, CN207310485U, US5090887A, RU2343070C2, заявки № WO2018/019336A1, DE102013216973A1, US2019/344491A1). У разі забруднення чергового фільтрувального елемента диск повертають до суміщення вихідного каналу екструдера з сусіднім фільтрувальним елементом, а забруднений фільтрувальний елемент чистять.

У багатомісному фільтрі фільтрувальні елементи закріплено в поворотній обоймі рівномірно по колу, при цьому на виході з кожного елемента встановлено індивідуальний формувальний інструмент, а фільтрування розплаву здійснюється в напрямку осі черв'яка (а.с. № SU722778A1). На даний момент часу можуть працювати як усі формувальні інструменти, так і їх частина. У разі забруднення фільтрувального елемента перекривають подачу до нього розплаву, витягають з обойми і чистять. Недолік фільтра – висока вартість внаслідок наявності кількох формувальних інструментів.

У співвісній з черв'яком екструдера порожнини багатомісного фільтра розташовано паралельно встановлені перфоровані фільтрувальні стакани (пат. № JP2017170620A; рис. 4.15, в). Недолік конструкції – необхідність розбирання для очищення.

Аналогічними фільтрувальними елементами комплектуються фільтри згідно з пат. № JP2020055223A, CN536129A та GB1386143A, заявка № US2015/360393A1.

За кількістю стадій фільтрування розрізняють одно-, дво- та багатостадійні фільтри.

В одностадійному циліндричному фільтрі для збільшення поверхні фільтрування перфороване осердя покрито сіткою з поздовжніми гофрами (заявка № WO2004/094033A1).

У двостадійному фільтрі попереднє фільтрування здійснюється крізь конічний фільтрувальний елемент, а остаточне – крізь розташований усередині нього циліндричний фільтрувальний елемент (а. с. № SU1597286A1).

За принципом фіксації фільтрувальної перегородки розрізняють пробкові, шиберні, касетні й рамні фільтри.

До рамних належать фільтри з одним плоским фільтрувальним елементом, обмеженим по периферії жорсткою рамою (пат. № KR20150144539A).

За структурою фільтрувальної перегородки розрізняють фільтри з фільтрувальною перегородкою у вигляді сітки, решета, перегородкою об'ємної фіксованої форми, перегородкою у вигляді шару нетканого матеріалу та насипною фільтрувальною перегородкою.

Фільтрувальні перегородки у вигляді нерухомого пакета круглих сіток однакового діаметра з різним розміром комірок (пат. № CN476860A та DE1660445A1, заявка № DE102017221279A1) або сіток з живим перерізом, що збільшується в напрямку руху потоку розплаву (заявка № EP0911140A2).

Встановлена в конічному корпусі фільтрувальна перегородка у вигляді нерухомого пакету круглих сіток різного діаметра з різним розміром комірок (пат. № FR516398A) або аналогічних щілинних реіток (пат. № FR624466A).

Фільтрувальна перегородка у вигляді змотуваної в рулон сітки забезпечує швидку зміну забрудненої ділянки сітки в процесі роботи екструдера (пат. № CN667615A5, FR2196227A1 і CN107584746A, а. с. № SU642184A1).

Фільтри аналогічного принципу дії містять не одну, а дві сітки, що дає змогу знімати одну з них для очищення за межами екструдера, не перериваючи процес екструзії (пат. № CN673009A5, заявка № EP2789447A1).

Фільтрувальна перегородка у вигляді змотуваної в рулон сітки, що контактує із зовнішньою поверхнею перфорованого циліндричного барабана (пат. № FR2301354A1, GB1504071A, DE2554645A1 і SU913925A3).

Фільтрувальна перегородка у вигляді рухомої сітки, розташованої в похилому робочому каналі вздовж осі черв'яка, забезпечує швидку заміну забрудненої ділянки сітки (заявки № WO2016/131072A2, EP3292981A1; рис. 4.16, а).

У багастадійному фільтрі періодичної дії розплав проходить фільтрувальний елемент у вигляді співвісної з черв'яком екструдера свічки, що складається з декількох концентричних сіток (пат. № KR20180028954A та JP2018039006A, заявки № EP3292982A1 та US2018/071967A1; рис. 4.16, б). Для збільшення поверхні фільтрування сітки можуть бути виконані з поздовжніми гофрами.

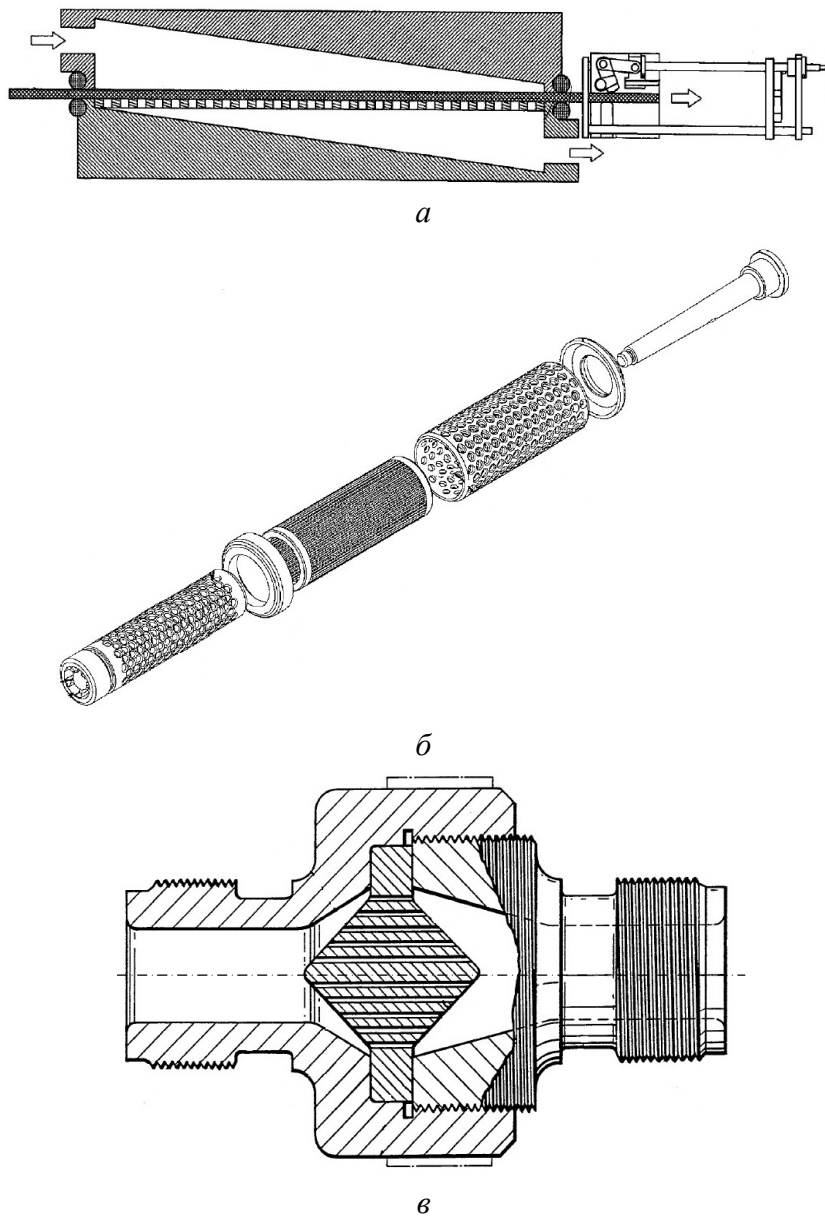


Рис. 4.16. Фільтри з фільтрувальними елементами у вигляді сіток (а, б) і решітки (в):
а – заявки № WO2016/131072A2 та EP3292981A1; б – пат. № KR20180028954A
та JP2018039006A, заявки № EP3292982A1 та US2018/071967A1;
в – пат. № GB2236261A

Разом з фільтрувальними перегородками у вигляді однієї або декількох сіток широко застосовують перегородки у вигляді решета – листа з виконаними в ньому отворами або щілинами, які для зниження ймовірності забивання виконують такими, що розширюються за ходом розплаву (пат. № JP2017113926A, заявка № WO96/31267A1).

Найпростішими є плоскі решета (пат. № CH360491A, FR2380867A1, GB2182279A, DE2707351A1, KR20180028494A, JP2018089828A та CN207290866U, а. с. № SU1288091A1 і SU1388308A1, заявка № EP3323589A1).

Опуклі решета знижують ймовірність утворення застійних зон (пат. № FR2144032A5), а увігнуті у вигляді сферичного сегмента або конуса характеризуються підвищеною міцністю та жорсткістю (пат. № CH570826A5, FR2175974A1, DE2310965A1, DE3742964A1, DE202010014709U1 та US5756129A, заявки № EP0914927A2, DE19937732A1, WO2012/055528A1 і WO2015/124306A1). Опуклі по центру та увігнуті по периферії круглі решітки характеризуються високою жорсткістю, проте вони сприяють виникненню небажаного градієнта швидкості розплаву в радіальному напрямку (пат. № US2539129A).

Для збільшення жорсткості плоских фільтрувальних елементів на одній з їхніх поверхонь виконують виступи й западини, що чергуються між собою (заявки № DE102019112523A1 та US2019/366614A1).

Для вирівнювання швидкості потоку по поперечному перерізу каналу решето може мати товщину, що зменшується від центра до периферії (заявки № EP0914927A2 та US2002/107326A1), при цьому діаметр отворів решета може зменшуватися від центра до периферії (пат. № US5346383A).

З цією самою метою, а також для унеможливлення утворення застійних зон фільтр виконують у вигляді подвійного перфорованого конуса (пат. № GB2236261A; рис. 4.16, в). Недолік фільтра – висока матеріалоемність.

Фільтрувальна перегородка у вигляді двох шарів нетканого матеріалу: шару, що примикає до опорної плити, з коротких металевих волокон, а також розташованого на ньому шару з довгих волокон (пат. JP2016196176A). В аналогічному фільтрі пакет фіксується сіткою (пат. № JP2017136582A).

Фільтрувальна перегородка об'ємної фіксованої форми у вигляді спеченого металевого пористого матеріалу з кількістю комірок від 50 до 40000 на 1 см² (пат. № FR2108392A5 і GB1347335A).

Фільтрувальні перегородки у вигляді сукупності окремих не скріплених один з одним елементів (насипні фільтрувальні перегородки) за задовільної роздільної здатності забезпечують рівномірний розподіл розплаву по поперечному перерізу каналу. При цьому у фільтрах можуть бути використані елементи, подібні до елементів насадок масообмінних колон [57–59].

Фільтрувальні перегородки у вигляді укладеного на опорній решітці й накритого захисною сіткою шару однакових кульок діаметром 2–12 мм (пат. № CH475373A, FR1590457A та GB1171735A), а також частинок неправильної форми (пат. № GB1460396A).

Для фільтрування та підвищення рівномірності потоку розплаву кільцеву плівкову головку оснащено порожниною, заповненою однаковими або різними частинками чи гранулами різної форми (пат. № US4681721A).

За формою фільтрувальної перегородки розрізняють фільтри з плоскою, сферичною, циліндричною й конічною фільтрувальними перегородками, при цьому дві останні можуть бути як гладкими, так і гофрованими.

Фільтрувальні елементи у вигляді сукупності порожнистих перфорованих дисків, порожнини яких сполучаються з центральною перфорованою трубою (пат. № JP2018001052A, JP2019034432A, JP2019081360A та JP2016185666A; рис. 4.17, а). Фільтр має велику поверхню фільтрування, але складний в очищенні.

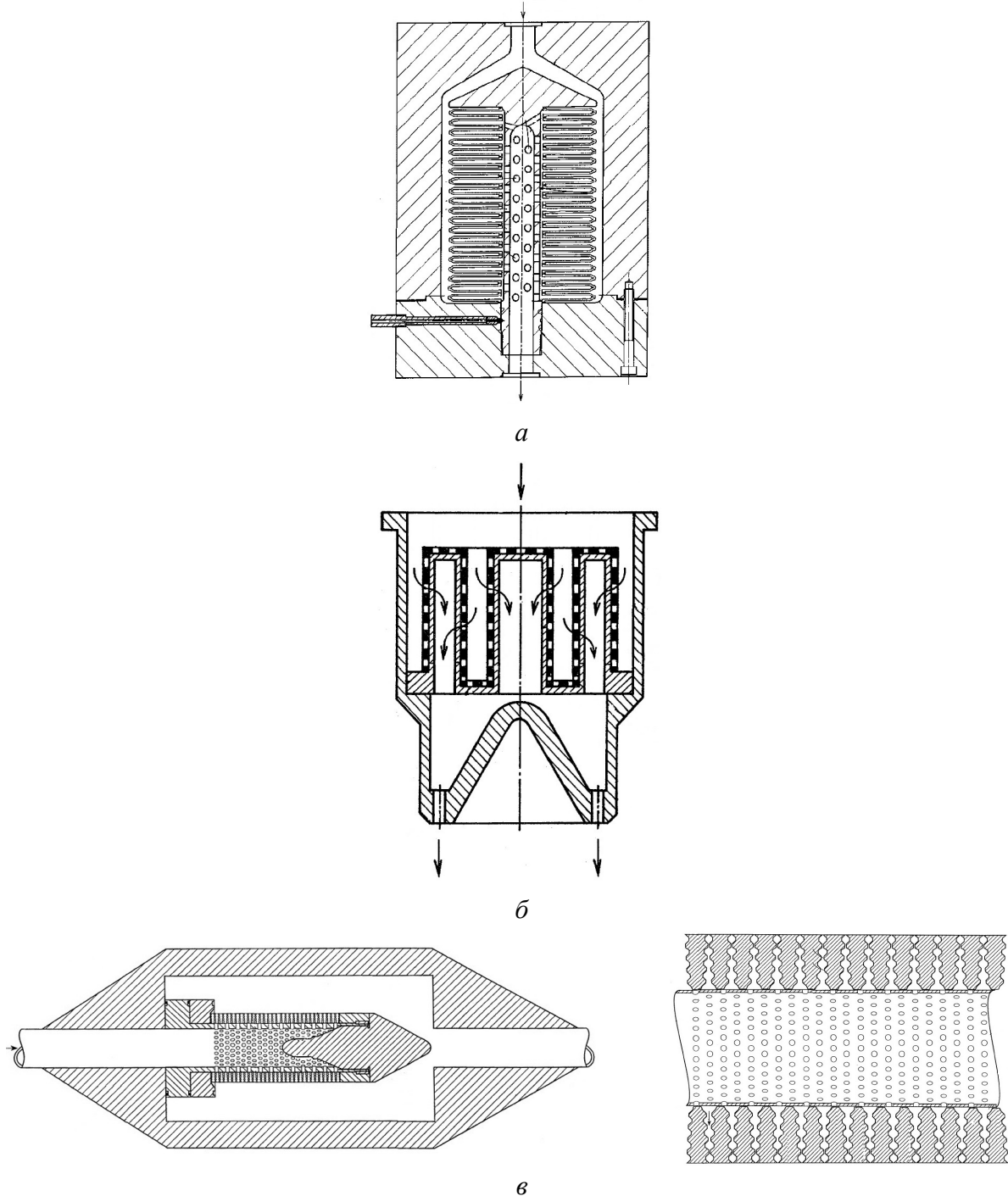


Рис. 4.17. Фільтри з порожнистими перфорованими дисками (а) і циліндричними стаканами (б, в): а – пат. № JP2016185666A; б – а. с. № SU1695965A1; в – заявка № WO00/29196A1

Фільтр з нерухомою циліндричною перегородкою, що охоплює кінцеву ділянку черв'яка, при цьому розплав рухається від внутрішньої поверхні гільзи до зовнішньої (пат. № СН434720А).

Фільтри з циліндричною перегородкою монтують у головці для виготовлення рукавної плівки, при цьому розплав рухається від внутрішньої поверхні перегородки до зовнішньої (а. с. № SU712257А1).

Фільтр із співвісним з черв'яком циліндричним фільтрувальним елементом у вигляді коаксіальних перфорованих циліндрів з торцевими перфорованими кільцевими перегородками між ними (а. с. № SU1695965А1; рис. 4.17, б). Елемент має високу питому поверхню фільтрування, проте під час його очищення у відходи потрапляє велика кількість розплаву.

Фільтр з циліндричною перегородкою, що має радіальні ступінчасті канали, переріз яких зменшується за ходом руху розплаву – від внутрішньої поверхні елемента до зовнішньої (заявка № WO00/29196А1; рис. 4.17, в). Недолік фільтра – складність виготовлення й видалення виділених домішок.

Аналогічні переваги й недоліки має фільтр із сукупністю співвісних з черв'яком фільтрувальних елементів у вигляді пористих циліндричних склянок (а. с. № FR2127216А5).

Фільтр з поперечним відносно черв'яка циліндричним фільтрувальним елементом та його безперервним очищенням (пат. № KR20180124024А та JP2019502581А, заявка № EP3406417А1). Видалення виділених на зовнішній поверхні домішок здійснюється зворотним потоком розплаву.

У фільтрі аналогічної конструкції очищення зовнішньої поверхні фільтрувального елемента також можливе скребком, встановленим з боку зовнішньої поверхні фільтрувального елемента (пат. № KR20160021818А).

За можливістю зміни прохідного перерізу фільтра розрізняють фільтри з фіксованим і регульованим прохідним перерізом.

Більшість фільтрів мають фіксований прохідний переріз, проте розроблено фільтр з фільтрувальною перегородкою у вигляді двох встановлених з можливістю повороту одна відносно одної решіток з круглими отворами (пат. № СН599855А5). Взаємним поворотом решіток регулюють живий переріз фільтра.

За ступенем рухливості фільтрувальних елементів розрізняють статичні, динамічні та комбіновані фільтри.

Більшість конструкцій належить до статичних фільтрів, тобто фільтрів з нерухомим у процесі роботи фільтрувальним елементом.

У динамічному фільтрі фільтрувальна пластина, що коливається, знижує в'язкість розплаву й полегшує виділення з нього сторонніх домішок (заявка № EP3308940А1).

Динамічний фільтр виконано у вигляді перфорованого диска, який жорстко закріплено в діаметральній площині на циліндричному хвостовику черв'яка та обертається разом з ним (заявка № WO00/54958А1).

У комбінованому фільтрі до наконечника черв'яка своєю вершиною прикріплено конічний фільтрувальний елемент, що обертається разом з ним, всередині якого розміщено нерухомий циліндричний фільтрувальний елемент, прикріплений до формувальної головки (а. с. № SU1597286A1).

Комбінований фільтр виконано у вигляді двох перфорованих дисків, що прилягають один до одного, один з яких нерухомо закріплено в корпусі екструдера, а другий обертається разом з черв'яком (пат. № US5055027A). Фільтр сприяє диспергуванню компонентів перероблюваного матеріалу.

За наявності додаткових функцій розрізняють фільтри без додаткових функцій та із зазначеними функціями, зокрема дегазацією, нагріванням, охолодженням, термостабілізацією розплаву та його нагнітанням (підвищенням тиску).

Суміщений з черв'яком екструдера циліндричний перфорований фільтрувальний елемент разом з гільзою корпусу екструдера забезпечує дегазацію розплаву (заявка № WO2005/087477A1).

Корпуси фільтрів охолоджуються для підвищення в'язкості розплаву й попередження його витоків в місцях контакту фільтрувальних решіток з екструдером і формувальною головкою (пат. № GB2096912A і FR2504820A3, а. с. № SU630088A1). Така конструкція фільтрів сприяє герметизації з'єднань «екструдер – фільтр» і «фільтр – формувальна головка», проте під час проходження фільтра потоком розплаву збільшує нерівномірність швидкості по його перерізу.

Пластинчастий шибєр з двома фільтрувальними елементами оснащено паровим змішувачем для обігріву фільтра й скорочення часу підготовки екструдера до пуску (а. с. № SU1399156A2). З аналогічною метою на вході в екструзійну головку встановлено фільтр з електрообігрівом (пат. № CN207156409U).

Пластинчастий шибєр з двома фільтрувальними елементами оснащено нагрівниками для полегшення зміни фільтрувальних елементів і пристроєм охолодження для поліпшення ущільнення шибєра у фільтрі (а. с. № SU1407828A2).

Корпуси фільтрів з перемотуваним стрічковим фільтрувальним елементом оснащено каналами для теплоносія, що забезпечує нагрівання або охолодження як корпусу, так і фільтрувального елемента (пат. № FR1527722A, FR2332113A1, GB1285702A, GB1285703A, DE2339057A1, DE202018102350U1 і CN107738431A).

Статичний фільтр з насипною насадкою, елементи якої виготовлено з матеріалу з точкою Кюрі, що відповідає потрібній температурі розплаву, забезпечує його термостабілізацію (пат. № UA69843U; [34]).

Фільтри з розміщеним після фільтрувальної решітки шестеренним насосом для підвищення тиску розплаву на вході в формувальну головку (пат. № JP2017007141A, JP2017087486A та JP2017213810A, заявка № DE10034468A1).

За матеріалом фільтрувального елемента розрізняють фільтри з фільтрувальними елементами з металів і сплавів, скла, кварцу, кераміки, металокераміки, а також полімерних матеріалів.

Найбільш поширені фільтрувальні елементи з металів і сплавів: вуглецевої та корозійностійкої сталі, бронзи, латуні, міді, нікелю (пат. № GB1439853A), благородних металів (пат. № CH475373A, FR1590457A та GB1171735A). Рідше використовують скло, кварц, кераміку, склокераміку (пат. № CH475373A, FR1590457A та GB1171735A).

Високі експлуатаційні властивості мають полімерні матеріали, наприклад політетрафторетилен (пат. № GB1439853A). Ці матеріали також мають високі технологічні властивості, що забезпечують майже безвідходне виготовлення фільтрувальних елементів [26, 27].

Аналіз фільтрів екструдерів для перероблення полімерних матеріалів і гумових сумішей показує, що, незважаючи на значне різноманіття їхніх конструкцій, завдяки простоті виготовлення та експлуатації, а також високій надійності найбільш поширеними залишаються традиційні фільтри шибєрного, касетного та пробкового типів.

4.4. Роторні змішувачі закритого типу для пластичних мас і гумових сумішей

Основним видом обладнання для великотоннажного приготування пластичних мас і гумових сумішей, що входить до складу технологічних ліній для виробництва такої масової продукції як лінолеум, транспортні стрічки, пневматичні та масивні шини, різні гумотехнічні вироби, є роторні змішувачі закритого типу. Конструктивною особливістю більшості роторних змішувачів є закрита змішувальна камера з двома обертовими в протилежних напрямках фігурними роторами, об'єм яких досягає 60 % об'єму закритої змішувальної камери [10, 11, 30, 47, 49, 60, 61].

Перші «життєздатні» роторні змішувачі були розроблені англійським інженером Ф. Х. Бенбері (Fernley Hore Banbury; 1881–1963). Відмінність запатентованого в 1916 році класичного змішувача Бенбері полягало в наявності на роторах похилих лопатей, що забезпечують змішування й диспергування компонентів суміші в коловому та осьовому напрямках роторів. Також було використано примусову подачу каучуку та інших компонентів суміші в змішувальну камеру при обертанні роторів (пат. № US1200070A, GB119241A, GB119242A, GB306371A, FR520335A, FR520337A, FR702827A та FR702828A).

Згодом роторні змішувачі Бенбері, що стали класичними, постійно вдосконалювалися. А оскільки продуктивність закритих змішувачів, а також якість одержуваних у них композицій значною мірою залежать від типорозміру робочої частини роторів [60], то основні зусилля проектувальників були спрямовані на вдосконалення саме роторів змішувачів.

Аналіз конструктивного виконання роторних змішувачів дає змогу запропонувати їх укрупнену класифікацію (рис. 4.18).

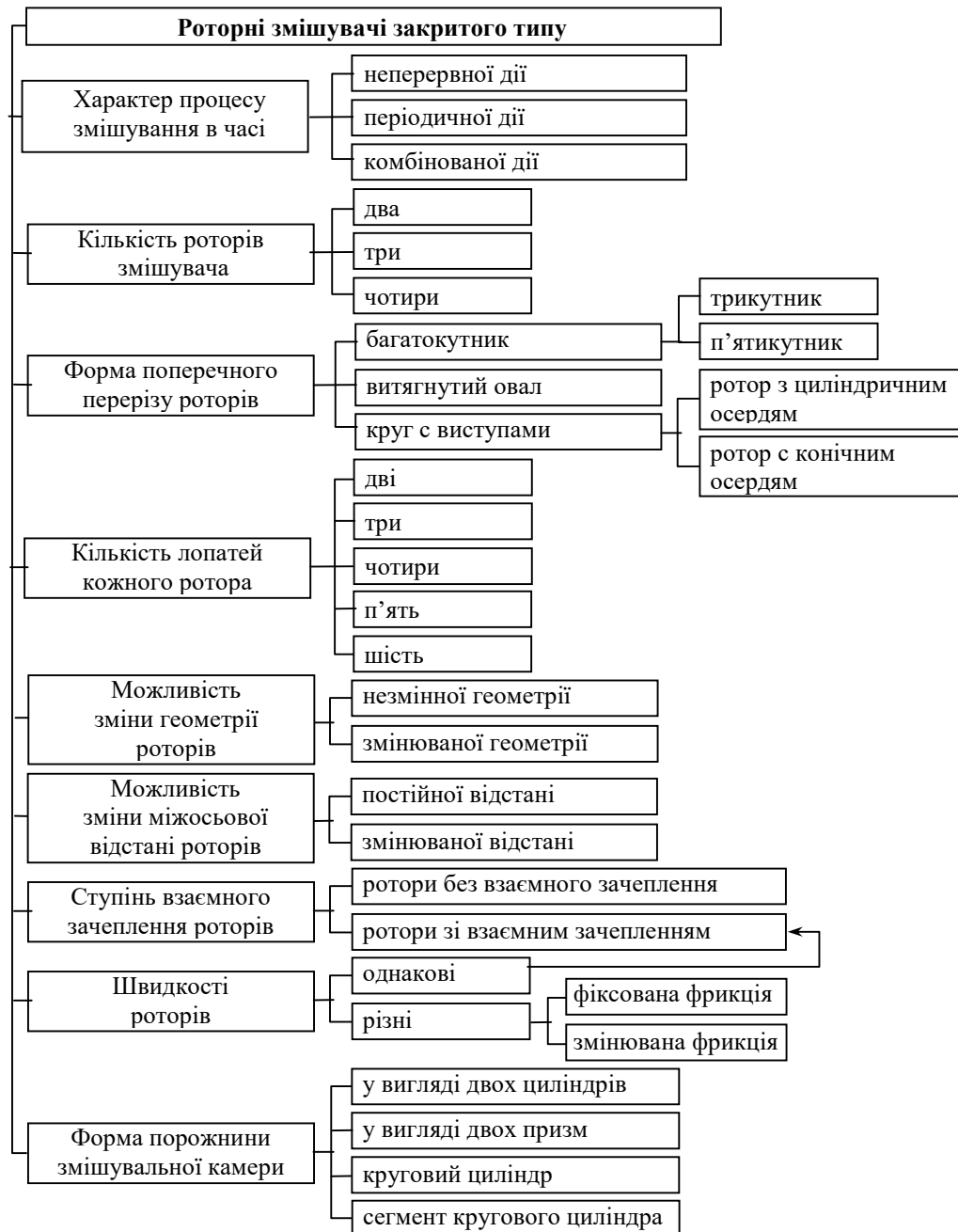


Рис. 4.18. Класифікація роторних змішувачів закритого типу

За характером процесу змішування в часі розрізняють змішувачі періодичної (циклічної), безперервної та комбінованої дії.

З часу створення класичних змішувачів Бенбері роторні змішувачі закритого типу зазвичай є змішувачами періодичного дії. Незважаючи на меншу, порівняно зі змішувачами безперервної дії, продуктивність, змішувачі періодичної дії характеризуються ширшими технологічними (експлуатаційними) можливостями.

На початку 1960-х років фірмою Фаррел (Farrel Co., USA) був розроблений «безперервний» варіант змішувача Бенбері – «Farrel Continuous Mixer» («FCM»), тобто «змішувач безперервної дії Фаррела» (пат. № US3154808A та GB1039758A, заявки № DE1288294B і CA806044A (рис. 4.19). FCM є змішувачем з двома зустрічно обертовими з однаковою швидкістю фігурними роторами, оснащеними на вхідній ділянці транспортувальними шнеками. Проте, незважаючи на очевидні переваги зазначеного змішувача, він так і не зміг повноцінно замінити традиційні змішувачі Бенбері.

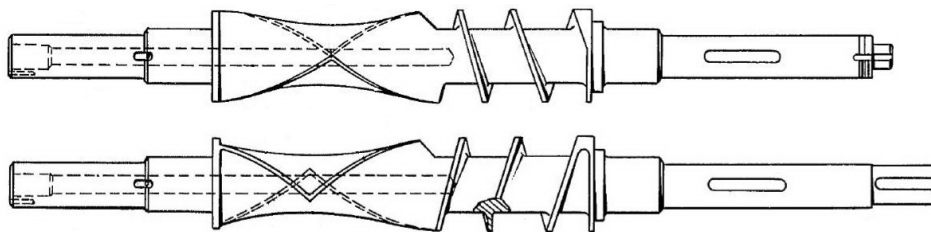


Рис. 4.19. Ротори змішувача FCM згідно з пат. № US3154808A

Змішувачі безперервної дії для живлення черв'ячного екструдера (пат. № GB1304604A, GB1422264A та JPS59147629A).

Транспортувальні шнеки роторів змішувача безперервної дії розташовано в незалежних камерах, що сполучаються між собою лише в зоні змішування (заявка № DE2513656A1).

Змішувач для безперервного двостадійного змішування з двома паралельними роторами, на кожному з яких виконано дві незалежні змішувальні зони, а також випускні отвори між ними та після другої змішувальної зони (пат. № JP2001129823A та JPH058221A). Перевага змішувача – можливість додавання компонентів суміші перед другою змішувальною зоною.

Кожен ротор змішувача безперервної дії містить кілька змішувальних ділянок з гвинтовими лопатями, при цьому зазначені ділянки роторів зміщено вздовж осі змішувача на половину кроку (пат. № JPS55137034A).

На вихідній ділянці змішувача безперервної дії між роторами встановлено рухому у вертикальному напрямку пластину, зміною положення якої регулюють ступінь переходу суміші між півкамерами змішувальної камери, а отже й ступінь змішування (пат. № JPS61266206A).

Змішувач безперервної дії містить два конічні ротори, кожен з яких має послідовно розташовані транспортувальний шнек і змішувальну зону з

гвинтовими лопатями (пат. № CN102225317A).

Слід відрізнити роторні змішувачі безперервної дії від двочерв'яних екструдерів з різноспрямованим обертанням черв'яків, оснащених різноманітними змішувальними елементами [41], переважно набором кулачків різної форми, що імітують гвинтову нарізку (пат. № US3122356A, US3195868A, US3198491A, DE1214386B, DE2307717A1, RU2050273C1, JPH07164433A та JPH10109309A, заявка № EP1600276A1). У роторних змішувачах довжина робочої частини роторів зазвичай не перевищує двох її діаметрів, а довжина черв'яків двочерв'яних екструдерів зазвичай становить не менше за десять діаметрів кожного з черв'яків [10].

Ротор змішувача комбінованої дії містить циліндричне осердя з гвинтовими лопатями, довжина яких менша за довжину робочої частини ротора (заявка № DE19949415A1). Змішувач може працювати періодично (живлення змішувача здійснюється крізь завантажувальні дверцята) або безперервно (живлення змішувача здійснюється за допомогою черв'ячного екструдера, що здійснює попереднє змішування компонентів композиції).

За кількістю роторів розрізняють змішувачі з двома, трьома та чотирма роторами.

Більшість змішувачів мають два ротори, що обертаються в протилежних напрямках, хоча розроблено змішувачі з роторами, що обертаються в одному напрямку.

Кожен ротор змішувача з односпрямованим обертанням роторів складається з двох однакових і скручених по довжині частин сочевицеподібного поперечного перерізу, при цьому обидві частини в місці їх сполучення повернено одна відносно одної на 90° (пат. № US3490750A; рис. 4.20).

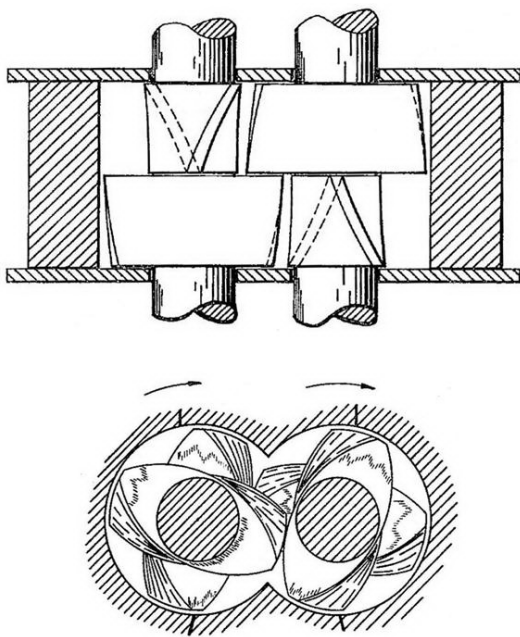


Рис. 4.20. Схема змішувача згідно з пат. № US3490750A

Змішувачі безперервної дії з трьома циліндричними (пат. № CN102225315A) і конічними (пат. № CN102228817A) роторами, розташованими в горизонтальній площині. При цьому кожен ротор містить послідовно розташовані гвинтову транспортувальну нарізку та змішувальну зону різного конструктивного виконання.

Аналогічні змішувачі з циліндричними (пат. № CN102225316A та CN202146733U) і конічними (пат. № CN102228818A) роторами, розташованими у вершинах правильного трикутника, спрямованого вершиною донизу (рис. 4.21).

Також розроблено змішувачі з чотирма роторами й порожниною між ними (пат. № CN206170388U), а також з центральним нерухомим тілом між роторами для підвищення ефективності диспергування (пат. № UA34962U).

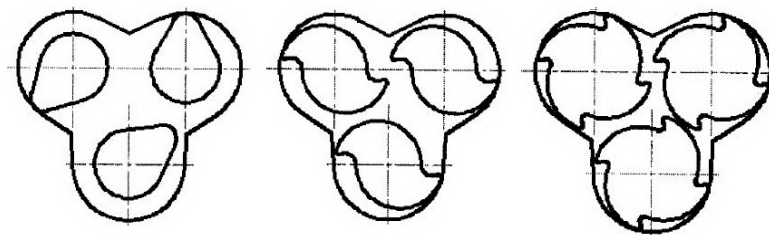


Рис. 4.21. Поперечний переріз камери змішувача згідно з пат. № CN202146733U

За формою поперечного перерізу роторів розрізняють змішувачі з роторами, які в поперечному перерізі мають форму овала, криволінійних трикутника та п'ятикутника, а також кола з виступами.

Овальний ротор (аналогічний роторам змішувача Бенбері) містить дві гвинтові лопаті з протилежними кутами підйому гвинтової лінії: довгою – 25–40° і короткою – 35–55° (пат. № US4714350A). Ротори обертаються з однаковими або різними за величиною швидкостями.

Агрегати, що складаються з двох розташованих один над одним змішувачів з овальними роторами, призначені для двостадійного приготування гумових сумішей (заявки № GB2201680A, EP0277558B1 та US2018290337A1).

Агрегати, що складаються з роторного змішувача й розташованих під ним вальців (а. с. № SU515643A1 і SU651967A2). Для унеможливлення утворення застійної зони на вході в міжвалковий проміжок піз час роботи роторного змішувача валки обертаються в напрямку, протилежному напрямку обертання роторів.

Змішувач з двома парами овальних роторів, розміщених у розташованих одна над одною змішувальних камерах, сполучених між собою каналом, що перекривається поворотними заслінками (пат. № CN109129967A).

Аналогічний змішувач з відкритим каналом між змішувальними камерами наведено в пат. № CN209022273U.

Ротор з поперечним перерізом у вигляді криволінійного трикутника з увігнутими сторонами (тригранний ротор) [10]. Такий ротор утворено циліндричним осердям і трьома V-подібними лопатями, симетричними відносно центральної діаметральної площини робочої частини ротора.

Кожен ротори змішувача має п'ять прямолінійних лопатей, які в поперечному перерізі утворюють правильний п'ятикутник з увігнутими сторонами (заявка № GB2191713A). Недолік змішувача – низька ефективність змішування в осьовому напрямку роторів.

Ротор містить циліндричне осердя з виконаними на ньому гвинтовими лопатями, довжина яких дорівнює довжині робочої частини ротора або менша за неї (пат. № GB431012A). Поперечний переріз ротора – коло з виступами.

За кількістю лопатей кожного ротора розрізняють змішувачі з роторами, що мають по дві, три, чотири, п'ять і шість лопатей.

Ротор з двома лопатями: довгою й короткою, закрученими вздовж осі ротора у протилежних напрямках (а. с. № SU670449A1 і SU979150A1). Навпроти довгої лопаті одного ротора розташовано коротку лопать іншого.

Змішувач з двома дволопатевиими роторами різного діаметра – більшим у тихохідного ротора й меншим у швидкохідного, при цьому співвідношення діаметрів роторів обернено пропорційно співвідношенню їхніх кутових швидкостей (а. с. № SU887238A1). Забезпечуються майже однакові зсувні деформації в кожній з півкамер за умови ефективного перерозподілення композиції між ними. Недолік змішувача – низька технологічність, обумовлена різними значеннями діаметрів як роторів, так і півкамер.

Дволопатевий ротор з довгою й короткою лопатями, виконаними у протилежних торців робочої частини ротора, що частково перекривають один одного в середній частині ротора й мають протилежні кути закрутки (пат. № US4456381A).

Ротор з двома безперервними по довжині робочої частини гвинтовими лопатями, що мають опуклу лобову та увігнуту тильну поверхні (пат. № JPH05278026A; рис. 4.22).

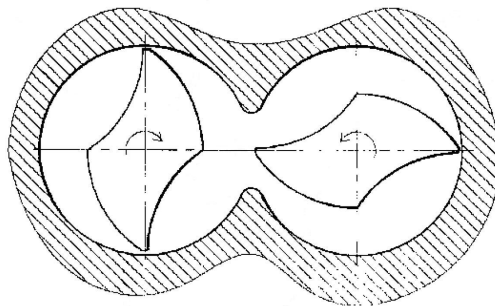


Рис. 4.22. Поперечний переріз камери змішувача згідно з пат. № JPH05278026A

Аналогічну форму мають лопаті трилопатевого (пат. № JPS6347107A) та чотирилопатевого (пат. № GB1187178A) роторів.

Ротор мінімум з трьома V-подібними лопатями, виконаними по всій довжині робочої частини ротора з однаковим кутовим кроком у коловому напрямку, при цьому плечі кожної лопаті мають різну довжину (вершини лопатей зміщено в осьовому напрямку ротора (пат. US4871259A)).

Коротке плече кожної лопаті аналогічного ротора утворює проміжок між її гребенем і стінкою змішувальної камери більше проміжку між гребенем довгого плеча лопаті й стінкою камери змішувача (пат. № US4914635A). У результаті композиція в коловому напрямку рухається переважно між гребенями коротких плечей лопатей і стінкою камери, а в осьовому – уздовж довгих плечей лопатей, забезпечуючи інтенсивну циркуляцію композиції.

Робоча частина ротора містить три лопаті: дві короткі, виконані по краях робочої частини ротора й закручені вздовж її осі в протилежних напрямках, а також довгу лопать, розташовану за ними в центральній частині робочої частини ротора (пат. № RU2477683C1). Конструкція ротора забезпечує високу диспергувальну здатність змішувача.

Робоча частина ротора містить чотири лопаті: дві довгі й дві короткі, при цьому кожен з коротких лопатей розміщено позаду відповідної довгої лопаті. Довгі лопаті по довжині закручені в протилежних напрямках, що забезпечує переміщення перемішуваної композиції до центру робочої частини ротора (пат. № RU2472616C1).

Ротор містить чотири лопаті – розташовані біля різних торців робочої частини ротора дві довгі та дві короткі (пат. № RU2672898C1). Довгі лопаті закручені в напрямку, протилежному закрутці коротких лопатей, а навпроти довгих лопатей одного ротора розташовані короткі лопаті іншого ротора. Конструкції цього й попереднього роторів запобігають локальному перегріву композиції, що спричинюється енергією дисипації.

Чотирьохлопатевий ротор з виконаними по краях його робочої частини парами односпрямованих довгих і коротких лопатей, при цьому довгі й короткі лопаті мають протилежні кути закрутки (пат. № US4284358A).

Ротор з двома парами гвинтових лопатей, які розташовано біля торців робочої частини ротора й частково перекривають одна одну (заявка № US2006/098527A1). Лопаті виконано з двох частин з різним кутом підйому гвинтової лінії.

Ротор з трьома лопатями постійних кутів підйому гвинтової лінії та четвертої лопаті – змінного кута (пат. № JP2006218691A та RU2472616C1).

Ротори з чотирма гвинтовими лопатями – розташованими біля різних торців робочої частини ротора парами довгих і коротких лопатей (пат. № US6402360B1). Коротка й довга лопаті кожної пари розташовані під прямим кутом одна до одної, при цьому кут підйому короткої лопаті не менше 60°, а між зазначеними лопатями утворено проміжок для проходження суміші.

Ротори з чотирма гвинтовими лопатями – розташованими у різних торців робочої частини ротора парами довгих і коротких лопатей без їх

взаємного перекриття (пат. № US4893936A, заявки № EP0246044A1 та EP0340888A1). Ротори змішувача обертаються з однаковою швидкістю.

Аналогічні ротори, але з трьома або чотирма гвинтовими лопатами – двома парами довгих і коротких лопатей (пат. № US4744668A). Зазначені пари лопатей виконані у різних торців робочої частини ротора, при цьому пари розташовані послідовно одна за одною або одна «всередині» іншої.

Ротори з чотирма гвинтовими лопатями – парою діаметрально розташованих біля одного краю довгих лопатей і парою діаметрально розташованих біля іншого краю коротких лопатей, при цьому в місці стикування довгих і коротких лопатей у діаметральній площині утворюються уступи (пат. № US3230581A, GB1028358A, заявка № SK160399A3).

Аналогічні ротори утворюють збільшений, порівняно з традиційними роторними змішувачами, проміжок між гребенем ротора й стінкою змішувальної камери, що дає змогу збільшувати колову швидкість роторів і збільшити продуктивність до 70 % (пат. № US4718771A).

Змішувач з роторами, що мають конічні осердя з двома гвинтовими виступами, що утворюють у поперечному перерізі симетричний овал зі зрізаними вершинами (заявка № DE1679879B1). Основи осердь роторів різного діаметра розташовані навпроти одна одної, що забезпечує рух суміші не тільки в коловому напрямку, але й вздовж осей роторів.

Змішувач з роторами, що мають конічне осердя та дві пари довгих і коротких гвинтових лопатей (а. с. № SU713685A1).

Змішувач з роторами, що мають циліндричне осердя з двома парами закручених в одному напрямку лопатей: довгою й короткою (у поперечному перерізі ротори мають форму кола з виступами; пат. № US4234259A, заявка № DE2836940A1). Пари лопатей розташовані й закручені в протилежних напрямках, при цьому довгі лопаті виконані в середній частині ротора, а кожна з коротких лопатей – біля його торця й розташована за відповідною довгою лопаттю. Виконання лопатей завдовжки менше половини довжини робочої частини ротора з кутом підйому менше 40° поліпшує циркуляцію суміші й підвищує її температурну однорідність.

Змішувач з роторами аналогічної форми, але двома довгими лопатями, розташованими з країв робочої частини ротора й закрученими в протилежних напрямках, а також двома короткими лопатями, розташованими в центральній частині робочої частини ротора й закрученими в напрямку, протилежному відповідним довгим лопатям (пат. № DE738787C).

Кожен ротор змішувача безперервної дії містить змішувальну зону з шістьма гвинтовими лопатями (заявка № DE2513656A1).

Ротор з шістьма (а реально з дванадцятьма) лопатями, кожен з яких розділено на довгу й коротку частини (пат. № CN103056978A та CN203092810U).

В аналогічному змішувачі кожна з чотирьох лопатей має розрив, тому реально кожен ротор має вісім коротких лопатей (пат. № JPH068235A).

Дослідження та промислова експлуатація змішувачів доводять, що збільшення кількості лопатей ротора підвищує продуктивність, поліпшує якість одержуваної суміші та знижує питомі витрати енергії [60].

Для збільшення диспергувальної поверхні роторів їхні гребені виконують з поперечними пазами (пат. № JP2005144703A, а. с. № SU1109317A1).

За можливістю зміни геометрії роторів розрізняють змішувачі з роторами постійної й змінної геометрії.

Ротор змінної геометрії містить рухому секцію на одній з лопатей для зміни проміжку між зазначеною секцією та стінкою змішувальної камери, а отже й диспергувальної здатності змішувача (а. с. № SU958121A1). Недолік конструкції – складність і низька надійність змішувача.

За можливістю зміни міжосьової відстані роторів розрізняють змішувачі з постійною й змінною міжосьовою відстанню роторів.

Переважну більшість змішувачів виконують з фіксованою міжосьовою відстанню роторів. Однак розроблені конструкції, що дають змогу змінювати міжосьову відстань роторів, навіть у процесі роботи змішувача (пат. № US4775240A). Для цього підшипники роторів встановлюють в ексцентричних втулках, що закріплюються з можливістю їх повороту й фіксації в положенні, що визначає потрібну міжосьову відстань роторів. При цьому можна частково компенсувати зношування робочих органів змішувача.

Подібні рішення запропоновано в а. с. № SU670449A1 і SU979150A1.

За ступенем взаємного зачеплення роторів розрізняють змішувачі з роторами без взаємного зачеплення, а також із взаємним зачепленням.

Класичні змішувачі типу Бенбері належать до змішувачів з роторами без взаємного зачеплення й забезпечують можливість обертання роторів з різними швидкостями, у тому числі зі змінною фрикцією.

Змішувачі з роторами, що обертаються з однаковими швидкостями й перебувають у взаємному зачепленні за відсутності контакту поверхонь роторів між собою (пат. № JPS59124804A, заявки № EP0170397A1 та EP2626180A1).

За швидкістю роторів розрізняють змішувачі з роторами, що обертаються з однаковими й різними швидкостями. При цьому в останніх змішувачах фрикція (співвідношення швидкостей роторів) може бути фіксованою й змінною.

Змішувач з циліндричними роторами, що обертаються з однаковою швидкістю та мають щонайменше один виступ, виконаний у поперечному перерізі роторів у вигляді сектора кола (а. с. № SU409886A1). При цьому виступ одного ротора розташовано проти циліндричної ділянки іншого ротора.

У вдосконаленому змішувачі аналогічний виступ розташовано з ексцентриситетом відносно до поздовжньої осі ротора. При цьому між виступами роторів і змішувальною камерою утворюються серповидні проміжки, що підвищують змішувально-диспергувальний ефект змішувача (а. с. № SU611787A1).

Змішувач з роторами, що обертаються з однаковою швидкістю та мають обернені назустріч один одному циліндричні виступи, а також протилежно розташовані змішувальні лопатки (пат. № SU652873A1).

В удосконаленому змішувачі на циліндричних виступах роторів у коловому напрямку виконано кільцеві канавки (пат. № SU975435A1). В утворюваному між виступами роторів хвилястому проміжку реалізується змінна фрикція, що підвищує якість змішування.

В удосконаленому змішувачі канавки виконано не під прямим кутом до поздовжніх осей роторів, а під гострим кутом (пат. № UA108616U).

Ще більша ефективність досягається в змішувачі, в якому довжина дуг циліндричних виступів різна, а ротори кінематично зв'язані між собою за допомогою зубчастої пари з ексцентрично встановленими круглими зубчастими колесами (а. с. № SU1047722A1).

Змішувач періодичної або безперервної дії з роторами, що обертаються з однаковими швидкостями, при цьому робочу частину кожного з роторів виконано у вигляді вигнутого по довжині циліндра (заявка № GB2173414A; рис. 4.23). У даному поперечному перерізі забезпечується змінна фрикція в проміжку між роторами, а також у проміжках між роторами та стінкою змішувальної камери. Перевага змішувача – висока технологічність і ремонтпридатність.

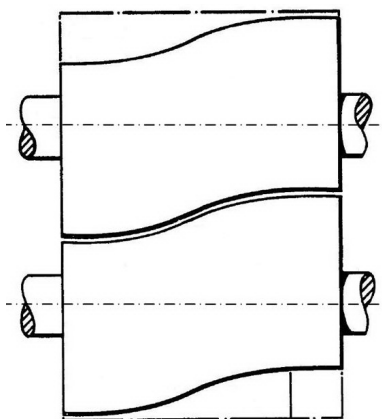


Рис. 4.23. Ротори змішувача згідно із заявкою № GB2173414A

Більш технологічними є ротори, виконані у вигляді еквідистантно розташованих косих кругових циліндрів (а. с. № SU1692849A1), а також V-подібні в плані ротори круглого поперечного перерізу (пат. № UA130478U). Незважаючи на високу ефективність змішування, зазначені змішувачі через динамічну невірноваженість роторів мають невисоку надійність.

Загальний недолік більшості змішувачів з роторами, що обертаються з однаковою швидкістю, – низька змішувально-диспергувальна здатність у проміжку між роторами, тому змішувачі з незалежним регулюванням швидкостей роторів забезпечують не лише кращу якість сумішей, але й мають більш широкі технологічні можливості (пат. № US5782560A).

За формою порожнини змішувальної камери розрізняють змішувачі зі змішувальною камерою у вигляді двох паралельних циліндрів або правильних призм, що частково перетинаються, а також у вигляді кругового циліндра й сегмента кругового циліндра.

Змішувач зі змішувальною камерою у вигляді двох розташованих у горизонтальній площині паралельних циліндрів, що частково перетинаються, з виконаними на її внутрішній поверхні двома групами нахилених під різними кутами поздовжніх рифлів – довгих і коротких, виконаних в обох півкамерах дзеркально (пат. № CN106042207A та CN205799913U; рис. 4.24). Недолік змішувача – складність очищення камери.

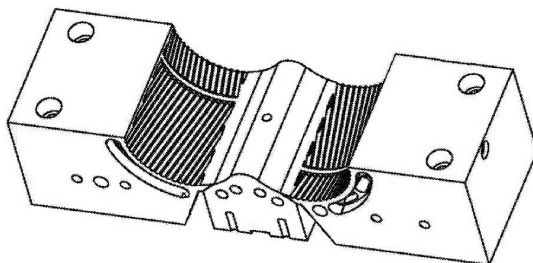


Рис. 4.24. Змішувальна камера з похилими поздовжніми рифлями згідно з пат. № CN106042207A та CN205799913U

Змішувальна камера з безперервними поздовжніми рифлями (заявка № US2004/179424A1) не тільки інтенсифікує змішування, але й поліпшує теплообмін композиції зі стінкою змішувальної камери.

Змішувальна камера у вигляді двох паралельних циліндрів, що частково перетинаються, при цьому її верхня частина має більший діаметр і оснащена штирями, які інтенсифікують процес змішування (заявка № DE4127211A1).

Аналогічні змішувальні штирі встановлено по всьому периметру змішувальної камери, а в роторах для вільного проходу штирів виконано кільцеві проточки (пат. № JPS5919525A).

Змішувальна камера у вигляді двох паралельних циліндрів, що частково перетинаються, при цьому робочі поверхні верхнього й нижнього затворів мають не традиційну опуклу (пат. № GB1463684A), а увігнуту форму, що полегшує перерозподіл суміші між півкамерами (заявка № CN206216942U).

Змішувальна камера у вигляді двох паралельних циліндрів, що частково перетинаються, розташованих у вертикальній площині (пат. № CN206216942U).

Змішувальна камера у вигляді двох паралельних і таких, що частково перетинаються, правильних призм (пат. № UA34562U). Під час обертання

роторів величина проміжку між гребенями роторів і стінкою змішувальної камери безперервно змінюється, що поліпшує змішування в цьому проміжку.

У змішувальній камері у формі кругового циліндра один над одним розташовано два горизонтальні ротори, між якими змонтовано додатковий ротор меншого діаметра (пат. № CN204955179U). Недолік змішувача – можливість утворення застійних зон у діаметральній горизонтальній площині змішувальної камери. Також розроблено аналогічний змішувач без додаткового ротора (пат. № CN205364268U).

У змішувальній камері, що має форму циліндричного сегмента з плоскою основою, у горизонтальній площині розміщено два ротори (пат. № CN207273610U). Недолік змішувача – можливість утворення застійних зон вздовж нижніх торців змішувальної камери.

Незважаючи на те, що останнім часом у деяких технологічних лініях для приготування композицій на основі полімерів і каучуків стали використовувати вискоєфективні черв'ячні екструдери [15, 29, 41, 47], роторні змішувачі закритого типу завдяки їхнім широким експлуатаційним можливостям ще тривалий час у багатьох випадках залишатимуться незамінним обладнанням.

4.5. Ущільнення роторів змішувачів закритого типу для пластичних мас і гумових сумішей

Основним підготовчим обладнанням технологічних ліній для великотоннажного виробництва виробів з пластичних мас і гумових сумішей є роторні змішувачі закритого типу. Відмінною особливістю зазначених змішувачів є закрита змішувальна камера з двома фігурними роторами, що обертаються назустріч один одному, об'єм яких перевищує половину об'єму змішувальної камери. Класичним представником змішувачів цього типу є змішувач Бенбері, розроблений і запатентований англійським інженером Ф. Х. Бенбері (Fernley Hore Banbury) 1916 року [10, 11, 30, 47, 49, 61, 62].

Одним з чинників, що впливають на надійність роботи змішувачів закритого типу, є ефективність ущільнення шийок роторів у місцях їх проходів крізь боковини змішувальної камери. У процесі роботи композиція, що перебуває в змішувальній камері під тиском, який розвивається верхнім затвором змішувача й самою композицією, що деформується між роторами й стінкою змішувальної камери, крізь кільцеві проміжки між вікнами боковини й шийками роторів прагне видавитися із змішувальної камери. При цьому наявність у композиції твердих частинок наповнювача, а також високі температура й швидкість перероблення призводять до інтенсивного зношування елементів ущільнень [10, 11].

Аналіз конструктивного виконання ущільнень роторів змішувачів закритого типу дає змогу запропонувати їх класифікацію (рис. 4.25).

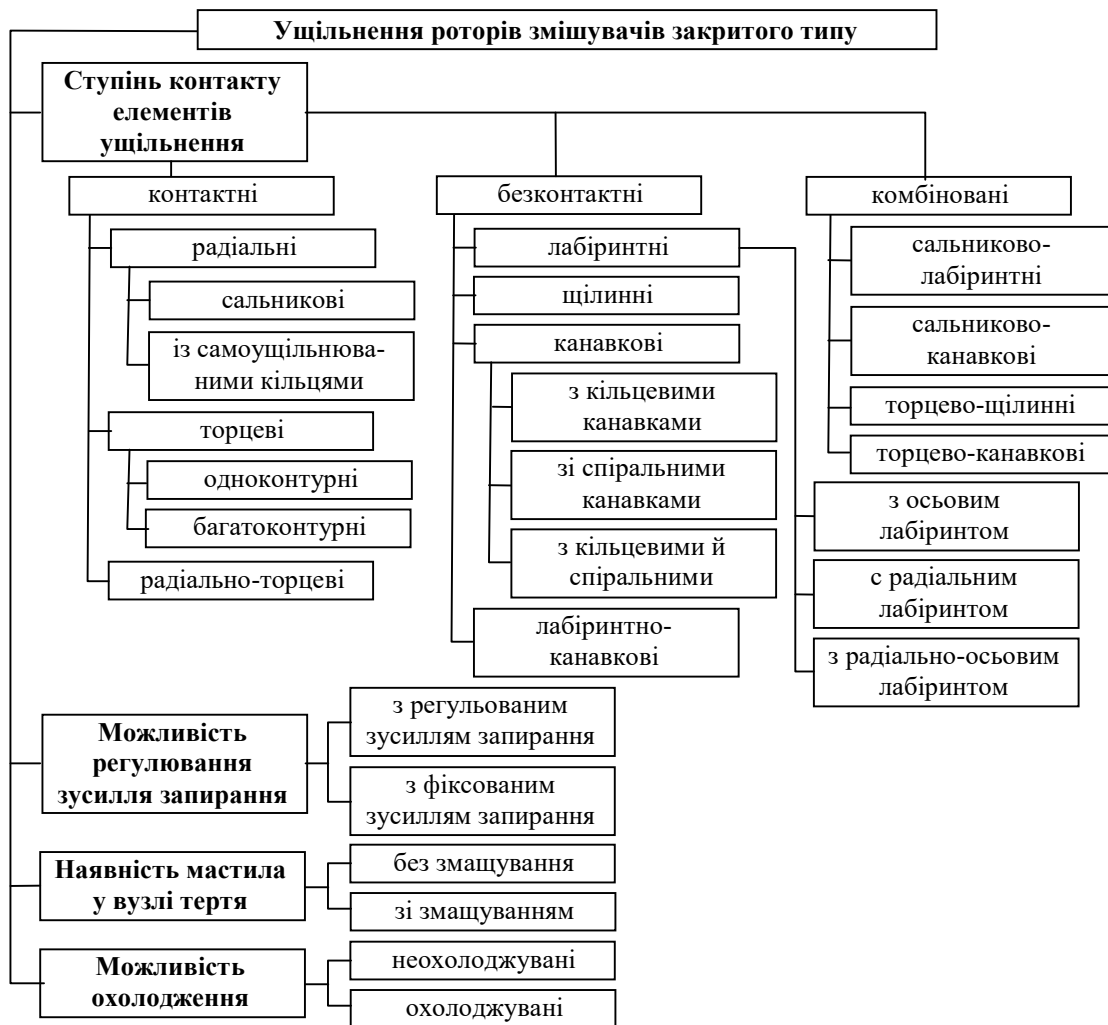


Рис. 4.25. Класифікація ущільнень роторів змішувачів закритого типу

За ступенем контакту елементів ущільнення розрізняють контактні, безконтактні й комбіновані ущільнення.

Контактні ущільнення бувають радіальними, торцевими й радіально-торцевими (комбінованими контактними).

Радіальні ущільнення можна поділити на сальникові ущільнення та ущільнення із самоущільнювальними кільцями.

Сальникові ущільнення, що набули широкого поширення в перших конструкціях роторних змішувачів, є найбільш матеріало- та енергоємними ([10]). Як ущільнювальний матеріал цих пристроїв зазвичай використовуються метали та сплави (мідь, бабіт), полімери (політетрафторетилен), а також композиційні матеріали (метало-графітні, металополімерні [26, 27]).

Сальниковий ущільнювальний пристрій з виконаними на роторі та втулці в зоні розташування сальникової набивки кільцевими канавками для потрапляння в них стисненої сальникової набивки й підвищення надійності ущільнення (пат. № CN203566878U; рис. 4.26).

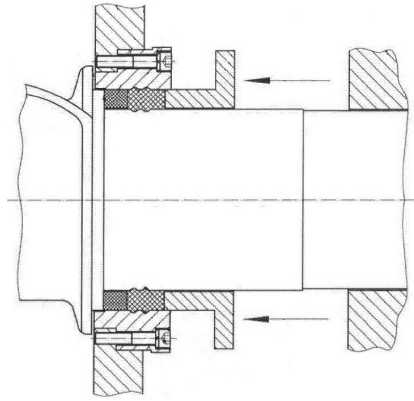


Рис. 4.26. Контактний ущільнювальний пристрій сальникового типу згідно з пат. № CN203566878U

У сальниковому ущільнювальному пристрої сальникова набивка взаємодіє не безпосередньо з ротором, а з антифрикційним кільцем, розташованим у пазу ротора (пат. № CN202946670U). Таке рішення не тільки знижує силу тертя, але й підвищує зносостійкість сальникової набивки.

Загальний недолік сальникових ущільнень – інтенсивне зношування сальникової набивки, а також значна витрата енергії на подолання тертя сальникової набивки об шийку ротора.

Також через інтенсивне зношування не отримали широкого поширення й контактні пристрої з самоущільнюваними кільцями, які притискаються до ротора й боковини змішувальної камери під дією тиску з боку змішуваної композиції (пат. № GB904256A та CN203571056U).

Торцеві ущільнення можна поділити на одно- і багатоконтурні, або одно- і багатоступінчасті (тобто з ущільненням по одній або кількох поверхнях, відповідно).

Одноконтурне торцеве ущільнення забезпечує контроль величини зносу контактного елемента – втулки – навіть у процесі роботи змішувача (пат. № UA7332U; рис. 4.27). Цей ущільнювальний пристрій оснащено регулювальними гвинтами з наскрізним осьовим отвором, що дає змогу за допомогою глибиноміру визначати довжину втулки ущільнювача, а значить і величину її зносу.

Аналогічне рішення для контролю величини зносу контактного елемента торцевого ущільнення у вигляді індикаторного стрижня, що виступає за межі змішувальної камери (пат. № CN201333765Y).

Ефективні торцеві ущільнення з широкими можливостями регулювання їхніх параметрів описано в пат. № CN200967249Y та PL155130B1.

Механічні ущільнення з гідравлічним (пат. № KR20100075402A та JP2010149292A) або пружинним (пат. № CN201442319U, CN206694558U, CN207327350U, CN207403022U, CN207578769U, CN207999501U та US2963308A) притисканням елементів вузла тертя один до одного.

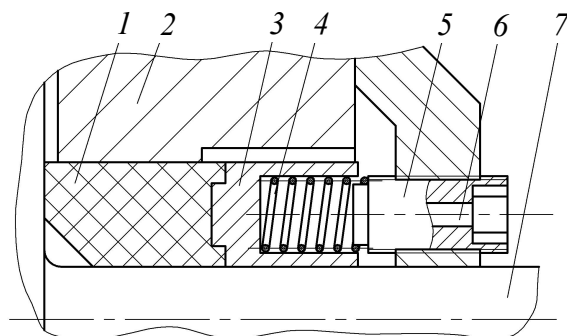


Рис. 4.27. Одноконтурне торцеве ущільнення згідно з пат. № UA7332U:
 1 – ущільнювальна втулка; 2 – боковина; 3 – натискна втулка; 4 – пружина;
 5 – регулювальний гвинт; 6 – наскрізний отвір; 7 – шийка ротора

У торцевому ущільненні фрикційне кільце виконане з неметалевого зносостійкого композиційного матеріалу (пат. № CN200967249Y).

У двоконтурному торцевому ущільненні до поверхонь тертя під тиском подається запірно-змащувальна паста, яка не тільки знижує силу тертя, а й підвищує герметичність ущільнення (пат. № CN201950742U).

Радіально-торцеві (комбіновані контактні) ущільнення поєднують переваги як радіальних, так і торцевих ущільнень.

Радіально-торцеве ущільнення виконане у вигляді закріплених на шийках роторів втулок з гвинтовою нарізкою (а. с. № SU1265056A1), при цьому нарізки розташованих навпроти один одного відповідних втулок роторів виконано зі взаємним зачепленням зустрічно обертовими черв'яками [30, 63]). Не зважаючи на самоочищення нарізок втулок від композиції, що видавлюється зі змішувальної камери, ущільнення характеризується громіздкістю, а також складністю монтажу й демонтажу.

Безконтактні ущільнення бувають щілинними, лабіринтними, канавковими й лабіринтно-канавковими (комбінованими безконтактними).

Найбільш простими, але й найменш ефективними є щілинні ущільнення, конструктивно оформлені у вигляді гладких кільцевих і осевих проміжків між ротором і стінкою змішувальної камери. Наприклад, в змішувачі з тріступінчастим щілинним ущільненням роторів по краях робочої частини кожного ротора виконано циліндричні виступи, що утворюють зі стінкою змішувальної камери перший ступінь щілинного ущільнення – вузькі кільцеві проміжки, що перешкоджають видавлюванню змішуваної композиції (пат. № CA941819A). Третій ступінь щілинного ущільнення реалізовано у вигляді аналогічних кільцевих проміжків між шийками роторів і боковинами змішувальної камери, а другий ступінь – у вигляді осевих проміжків між заплечиками ротора та площинами боковин змішувальної камери.

Лабіринтні ущільнення можна поділити на ущільнення з осевим лабіринтом, радіальним лабіринтом, а також радіально-осевим лабіринтом.

Ущільнення з осьовим (горизонтальним) лабіринтом внаслідок складності їх монтажу та експлуатації використовуються рідше, ніж ущільнення з радіальним (вертикальним) лабіринтом (нерухоме лабіринтне кільце осьового лабіринту зазвичай виконується складовим з декількох сегментів). Висока ефективність радіальних лабіринтних ущільнень забезпечується не тільки високим гідравлічним опором, але й виникненням у них ефектом Вайссенберга (ефекту нормальних напружень), що сприяє руху композиції по радіусу в напрямку осі ротора, тобто поверненню композиції в змішувальну камеру [64].

В ущільненнях з радіально-осьовим лабіринтом ділянки з одним або декількома радіальними та осьовими лабіринтами розташовуються послідовно одна за одною ([10]; рис. 4.28).

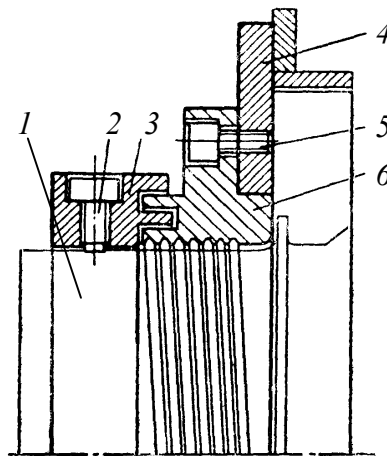


Рис. 4.28. Ущільнення з послідовним радіально-осьовим лабіринтом [10]: 1 – шийка ротора; 2 – стопорний гвинт; 3 – рухома втулка; 4 – боковина; 5 – притискний гвинт; 6 – нерухома втулка з осьовою гвинтовою канавкою й радіальним кільцевим лабіринтом

Загальним недоліком лабіринтних ущільнень є можливість забивання змішуваною композицією лабіринту, що призводить до додаткової витрати енергії приводу ротора, а в разі приготування гумових сумішей – їх перегріву й вулканізації і, як наслідок, до можливого заклинення й руйнування елементів ущільнень.

Канавкові ущільнення можна поділити на ущільнення з кільцевими канавками, спіральними (гвинтовими) канавками, а також кільцевими та спіральними канавками.

У безконтактних ущільненнях канавкового типу, які є одними з найпростіших ущільнювальних пристроїв, кільцеві або спіральні канавки виконуються на шийці ротора або на втулці, що її охоплює. При цьому для примусового повернення змішуваної композиції в змішувальну камеру спіральні канавки доцільно виконувати з напрямком нарізки, протилежним напрямку обертання ротора (пат. № JP11170251A, заявка № WO2008/005138A1).

На відміну від найбільш поширених ущільнень канавкового типу з канавками постійної глибини, ширини та кроку [10] розроблено конструкцію канавкового ущільнення з об'ємом канавок, що поступово збільшується, за ходу руху суміші (з глибиною та/або шириною канавок, що збільшується; пат. № JP6087119A та JPH0687119A).

В ущільнювальному пристрої канавкового типу з двома протилежно спрямованими спіральними канавками по краях рухомої втулки й кільцевою канавкою збільшеного об'єму між ними напрямок ближньої до змішувальної камери спіральної канавки збігається з напрямком обертання ротора (пат. № JP8128535A). Під час обертання ротора змішувана композиція транспортується першою спіральною канавкою, потрапляє в кільцеву канавку та утримується в ній завдяки другій (відбійній) спіральній канавці, забезпечуючи герметизацію ущільнення.

Аналогічне технічне рішення запропоновано у пат. № US5090711A, а з канавками, виконаними на нерухомій втулці, що охоплює шийку ротора, – у пат. № US4471963A.

Лабіринтно-канавкові (комбіновані безконтактні) ущільнення поєднують переваги як лабіринтних, так і канавкових ущільнень.

Лабіринтно-канавкове ущільнення виконане у вигляді радіального лабіринту з кільцевими канавками на горизонтальних поверхнях гребенів лабіринту (пат. № UA58962U).

Комбіновані ущільнення бувають сальниково-лабіринтними, сальниково-канавковими, торцево-щілинними, а також торцево-канавковими й поєднують переваги та недоліки як контактних, так і безконтактних ущільнювальних пристроїв.

Сальниково-лабіринтне ущільнення містить послідовно розташовані сальник і радіальний лабіринт (пат. № CN108547953A та CN208417540U).

Лабіринтно-сальникове ущільнення містить послідовно розташовані осьовий лабіринт і сальник (пат. № CN207437777U).

Наприклад, наведений на рис. 4.26 контактний ущільнювальний пристрій може бути перетворений на сальниково-канавкове ущільнення в результаті виконання канавок на внутрішній поверхні притискного фланця (грундбукси). При цьому безконтактна ділянка канавкового або лабіринтного типу зазвичай розташовуються після контактної сальникової ділянки.

Канавково-сальниковий ущільнювальний пристрій з послідовно розташованими на роторі втулкою з кільцевими канавками, а також вузлом ущільнення сальникового набивкою (пат. № CN205416076U).

Торцево-щілинні ущільнення містять гладку кільцеву втулку, що охоплює шийку ротора й підтискується до торця його робочої зони, при цьому зовнішня поверхня втулки з боку вікна боковини змішувальної камери утворює запірну щілину (пат. № JP2002018263A та JP2008230250A).

Торцево-канавкове ущільнення містить кільцеву втулку, що охоплює шийку ротора й підтискується до його заплечика, при цьому на зовнішній поверхні втулки з боку вікна боковини змішувальної камери виконано кільцеві клиноподібні канавки (пат. № JP2002018262A). Композиція, що потрапила в канавки, завдяки їх клиноподібній формі утримується в них і надійно герметизує змішувальну камеру.

Канавково-торцевий ущільнювальний пристрій містить закріплену на шийці ротора кільцеву втулку з кільцевими канавками на її зовнішній поверхні, а також розташований за ним вузол торцевого ущільнення (пат. № CN205388151U).

За можливістю регулювання зусилля притискання розрізняють ущільнення з регульованим і фіксованим зусиллям замикання.

Більшість ущільнень належить до пристроїв з фіксованим зусиллям замикання, однак розроблено конструкцію канавково-лабіринтного ущільнення з примусовим подаванням запірно-змащувальної пасти у двосторонній лабіринт. Зазначений пристрій призначено для змішувачів, які працюють за підвищеного (до 1 МПа) тиску в змішувальній камері ([10]; рис. 4.29).

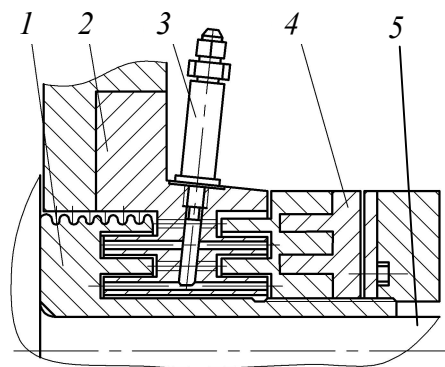


Рис. 4.29. Двосторонній лабіринт канавково-лабіринтного ущільнення [10]:
1, 2 – рухома та нерухома лабіринтні втулки; 3 – маслянка; 4 – гайка; 5 – шийка ротора

Проміжки лабіринту в радіальному напрямку становлять 0,5...0,6 мм, а в осьовому – близько 1 мм (див. рис. 4.29). Запірно-змащувальна паста, що подається в лабіринти, разом з композицією, яка видавлюється з змішувальної камери, утворює пробку та одночасно змащує поверхні тертя, підвищуючи зносостійкість ущільнювального пристрою. Масова витрата змішуваної композиції, що виходить із змішувальної камери крізь ущільнення, не перевищує 0,1 кг/год. Недоліком пристрою є складність його виготовлення та обслуговування.

Одноконтурне контактне торцеве ущільнення містить бронзову й чавунну втулки, з'єднані між собою гвинтами. Бронзова втулка по ковзній посадці проходить крізь вікно в боковині й підтискається до заплечика ротора

змішувача штовхачем, що є двоплечим важелем, встановленим одним кінцем на центральній опорі, а іншим – на підпружиненій опорі. Під дією пружини важіль через чавунну втулку підтискає бронзову втулку до ротора, при цьому величину зусилля притиску можна змінювати за допомогою регулювального болта [10].

Аналогічні торцеві ущільнення з регульованим зусиллям притиску ущільнювальних втулок, які охоплюють шийки роторів і встановлені з можливістю осьового переміщення у вікнах боковин змішувальної камери, при цьому переміщення кожної з ущільнювальних втулок забезпечується індивідуальним (пат. № US3570820A, CN201505994U та JPH06134752A) або спільним (а. с. № SU1183379A1) гідроприводом.

У торцевих ущільненнях аналогічної конструкції зусилля на вилці забезпечується не гідроциліндром, а регульованою пружиною жорсткості (пат. № US4291888A та CN202462680U).

Торцеве ущільнення з регульованим зусиллям притискання ущільнювальних втулок, що охоплюють шийки роторів і встановлені у вікнах боковин змішувальної камери з можливістю осьового переміщення (а. с. № SU1183379A1).

За наявності мастила у вузлі тертя розрізняють ущільнення без мастильного матеріалу та з мастильним матеріалом.

Ущільнення без мастильного матеріалу (ущільнення сухого тертя) простіші у виготовленні та експлуатації, проте характеризуються підвищеною енергоємністю та зниженою зносостійкістю.

Ущільнювальні мастила (ущільнення мокрого тертя) не тільки зменшують споживання енергії в процесі змішування, а й частково охолоджують вузол тертя (пат. № EP2810756A1, JP2010162689A, JP2013154487A, JP2016078297A, JP2016078347A, JP2016155260A, JPH09286023A, CN201950742U, CN202746591U та CN206361153U).

У торцево-щілинному ущільненні мастильний матеріал подається як у запірну радіальну щілину між ротором і боковиною змішувальної камери, так і на торцеву ділянку ущільнення (пат. № JP2014151498A та CN104428116A). Недолік конструкції – можливість потрапляння мастильного матеріалу до змішувальної камери.

За можливістю охолодження розрізняють ущільнення без охолодження та з охолодженням його елементів.

Ущільнювальний пристрій з охолодженням його елементів не тільки подовжує термін служби ущільнення, але й підвищує його надійність, тому що за умови зниження температури змішуваної композиції, що потрапила в ущільнення, зростає її в'язкість і відповідно гідравлічний опір ущільнення (пат. № CN204585604U).

Лабіринтне ущільнення з каналом для охолодження корпусу, який має дві протилежно спрямовані гвинтові канавки, що сходяться до центральної кільцевої порожнини (пат. № US4471963A; рис. 4.30). Під час обертання ротора змішувана композиція транспортується першою гвинтовою канавкою до зазначеної порожнини, в якій утримується другою гвинтовою канавкою, забезпечуючи герметизацію ущільнення.

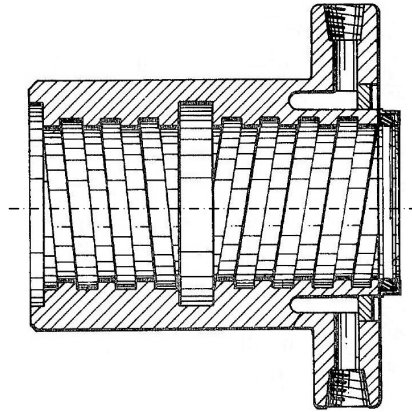


Рис. 4.30. Охолоджуване лабіринтне ущільнення згідно з пат. № US4471963A

Незважаючи на різноманіття конструкцій ущільнювальних пристроїв роторів пласто- і гумозмішувачів закритого типу проведений аналіз доводить, що майже жодний з них не може виключити видавлювання одержуваної композиції зі змішувальної камери змішувача під час його роботи. Тому залишається актуальним завдання розробки ущільнень, які за мінімального витoku змішуваної композиції вирізнялися б простотою виготовлення та експлуатації, а також високою зносостійкістю й надійністю [65].

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Багаторічний досвід промислової експлуатації змішувального устаткування довів високу ефективність традиційних видів змішувачів сипких, рідких і пластичних матеріалів у різних галузях промисловості: хімічній, гірничорудній, нафтопереробній, нафтохімічній, мікробіологічній, харчовій, переробній та інших.

Проте поява на ринку принципово нових текучих середовищ, передусім полімерних і гумових композицій з прогнозованими властивостями, а також технологічних процесів їх оброблення, спричинює потребу в розробленні й нових типів змішувального устаткування.

Для підвищення ефективності роботи змішувачів можна рекомендувати такі заходи:

- широко застосовувати прості та ефективні гравітаційні змішувачі для оброблення сипких матеріалів;

- споряджати мішалки, призначені передусім для оброблення ньютонівських рідин помірної в'язкості, додатковими засобами, зокрема пристроями для зміни температури перемішуваного середовища: нагрівниками та холодильниками;

- споряджати робочі органи змішувачів, призначених для оброблення високов'язких неньютонівських рідин, додатковими змішувально-диспергувальними елементами.

- під час розроблення нових зразків високоефективного змішувального устаткування застосовувати як нові технічні рішення в галузі матеріалознавства й нових технологій, зокрема адитивні технології, так і засоби математичного моделювання складних гідромеханічних процесів.

Наведені в монографії численні інноваційні конструкції змішувачів для сипких, рідких і пластичних матеріалів, здебільшого запатентовані в провідних країнах світу, а також їхня ґрунтова класифікація може стати у пригоді конструкторам і винахідникам технологічного обладнання хімічних, харчових, мікробіологічних і переробних виробництв.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва : Химия, 1973. 754 с.
2. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. Москва : Химия, 1981. 812 с.
3. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. Москва : Химия, 1992. 416 с.
4. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты. Москва : Химия, 1995. 368 с.
5. Мікульонок І. О. Механічні, гідромеханічні і масообмінні процеси та обладнання хімічної технології. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 340 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38169> (дата звернення: 23.01.2022).
6. Мікульонок І. О. Механічні та гідромеханічні процеси, апарати і машини хімічної технології. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. 172 с.
7. Макаров Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. Москва : Машиностроение, 1973. 216 с.
8. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. Ленинград : Госхимиздат, 1963. 416 с.
9. Васильцов Э. А. Ушаков В. Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Ленинград : Машиностроение, 1979. 271 с.
10. Рябинин Д. Д., Лукач Ю. Е. Смесительные машины для пластмасс и резиновых смесей. Москва : Машиностроение, 1972. 272 с.
11. Смешение полимеров / В. В. Богданов, Р. В. Торнер, В. Н. Красовский, Э. О. Регер. Ленинград : Химия, 1979. 192 с.
12. Мікульонок І. О. Інтелектуальна власність. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 248 с.
13. Мікульонок І. О. Інтелектуальна власність та патентознавство. 3-тє вид., переробл. та доповн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. 244 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31664> (дата звернення: 13.12.2021).
14. Mikulionok I. O. Classification of gravity mixers of bulk materials (survey of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. Vol. 56, N 1–2. P. 157–164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00884-2>
15. 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>

16. Процессы и аппараты химической технологии. В 5 т. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / Д. А. Баранов, В. Н. Блиничев, А. В. Вязьмин и др.; под ред. А. М. Кутепова. Москва : Логос, 2002. 600 с.
17. Mikulionok I. O. Liquid mixers with magnetic stirrers (survey of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 49, N 3–4. P. 246–250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9733-5>
18. Mikulionok I. O. Designs of rotary disk mixers (a survey of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 49, N 5–6. P. 308–313. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9746-0>
19. Mikulionok I. O. Classification of Rotary mixers with an adjustable working surface (review of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. Vol. 56, N 3–4. P. 237–244. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00764-1>
20. Mikulionok I. O. Classification of N-Line Static Cavitation Mixers (Survey of Designs) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, N 1–2. P. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01058-4>
21. История развития и современное состояние гидродинамических роторных смесителей / Е. А. Николаев, С. П. Иванов, Е. В. Боев и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 8. С. 14–16.
22. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях: теория, эксперимент, практика / А. А. Долинский, Б. И. Басок, С. И. Гулый и др. Киев : ИТТФ НАНУ, 1996. 208 с.
23. Накорчевский А. И., Басок Б. И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. Київ : Наук. думка, 2001. 348 с.
24. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии. Київ : Наук. думка, 2008. 381 с.
25. Долинский А. А., Ободович А. Н., Борхаленко Ю. А. Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация. Харків : Вірованець А.П. «Апостроф», 2012. 184 с.
26. Мікульонюк І.О. Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі. Класифікація та загальні відомості // Хімічна промисловість України. 2005. № 5. С. 30–39.
27. Микульёнок И. О. Классификация термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы, 2012. № 9. С. 29–38.
28. Mikulionok I. O. Classification of Disc Stirrers of Tank Equipment for Liquid Media Processing (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, N 3–4. P. 334–341. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01096-y>

29. 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>
30. 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: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-9990-6>
31. 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 (дата звернення: 26.01.2022).
32. Mikulionok I. O. Classification of Stirrers in the Form of Geometric Shapes of Revolution for Stirring Liquids (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, N 3–4. P. 342–347. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01097-x>
33. Mikulionok I. O. Classification of the Heat-Exchangers of Vessels with Rotary Mixers (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 57, N 11–12. P. 1049–1057. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01045-9>
34. Mikulionok I. O. Stabilization of the temperature of the working medium in the equipment of chemical plants (a survey of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51, N 5–6. P. 324–327. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-015-0046-8>
35. Тимонин А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справочник. Т. 1. Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2002. 852 с.
36. Mikulionok I. O. Use of Polymer Materials in Heat Exchangers (Review of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. Vol. 55, N. 7–8. P. 687–695. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-019-00680-z>
37. Schenkel G. Plastics Extrusion Technology and Theory. The design and operation of screw extruders for plastics. London : Liffé Books Ltd., 1966. 477 p.
38. Ким В. С., Скачков В. В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки полимеров. Москва : Химия, 1988. 240 с.
39. Rauwendaal C. Understanding Extrusion. Munich : Carl Verlag, 1998. 190 p.
40. Todd D. B. Improving incorporation of fillers in plastics. A special report // Advances in Polymer Technology. 2000. Vol. 19, N 1. P. 54–64. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2329\(20000117\)19:1<54::AID-ADV6>3.0.CO;2-%23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2329(20000117)19:1<54::AID-ADV6>3.0.CO;2-%23)
41. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2014. 934 p. URL: https://www.academia.edu/42835189/Rauwendaal_Polymer_Extrusion

42. Mikulenok I. O. Intensification of Fabrication of Extruded Polymeric Shapes // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 50, No. 7–8. P. 483–488. DOI: 10.1007/s10556-014-9927-5
43. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
44. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084> (дата звернення: 04.12.2021).
45. Сокольський О.Л., Мікульонок І.О. Моделювання обладнання і процесів перероблення полімерних матеріалів методом екструзії. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 252 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37481>
46. Активирующее смешение в процессах получения и модифицирования полимерных композиционных материалов / В. П. Бритов, В. В. Богданов, О. О. Николаев, А. Е. Туболкин // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77, Вып. 1. С. 122–127.
47. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини. Київ: НТУУ «КПІ», 2009. 264 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/28259>
48. Mikulionok I. O., Radchenko L. B. Screw Extrusion of Thermoplastics: I. General Model of the Screw Extrusion // Russian Journal of Applied Chemistry. 2012. Vol. 85, N 3, P. 489–509. DOI: 10.1134/S1070427211030305
49. Tadmor Z., Gogos C. G. Principles of polymer processing. 2nd ed. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2006. 962 p. URL: [https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Courses/Properties/Books/Zehev%20Tadmor,%20Costas%20G.%20Gogos%20-%20Principles%20of%20Polymer%20Processing-Wiley-Interscience%20\(2006\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Courses/Properties/Books/Zehev%20Tadmor,%20Costas%20G.%20Gogos%20-%20Principles%20of%20Polymer%20Processing-Wiley-Interscience%20(2006).pdf)
50. Торнер Р. В., Акутин М. С. Оборудование заводов по переработке пластмасс. Москва : Химия, 1986. 400 с.
51. Микулёнок И. О., Петухов А. Д. Производство полимерных сеток. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38183>
52. Говша А. Г., Бастрыгин В. В., Остроухов А. В. Состояние, перспективы применения и развития одночервячных резиноперерабатывающих машин : обзор. информ. Москва : ЦИНТИхимнефтемаш, 1986. 44 с. (Серия ХМ-2 «Оборудование для переработки пластмасс и резины»).
53. Мікульонок І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 419 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/2061> (дата звернення: 04.12.2021).

54. Mikulionok I. O. Pretreatment of Recycled Polymer Raw Material // Russian Journal of Applied Chemistry. 2011. Vol. 83, N 6. P. 1105–1113. DOI: 10.1134/S1070427211060371
55. Лукач Ю. Е., Петухов А. Д., Сенатос В. А. Оборудование для производства полимерных пленок. Москва : Машиностроение, 1981. 224 с.
56. Mikulionok I. O. Classification of Extruder Filters for Processing Polymeric Materials and Rubber Mixtures (Survey of Designs) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, N 3–4. P. 248–255. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-022-01082-4>
57. Классификация конструкций насадок колонных аппаратов и методов интенсификации в них процессов тепломассообмена / А. С. Пушнов, И. О. Микулёнок, А. С. Севрюков, М. Г. Беренгартен // Химическая технология. 2014. № 4. С. 244–250.
58. 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
59. Mikulionok I. O. Ring packing contact elements of mass transfer devices (review of patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2018. Vol. 54, N 1–2. P. 125–129. DOI: 10.1007/s10556-018-0450-y
60. Переработка каучуков и резиновых смесей (реологические основы, технология, оборудование) / Е. Г. Вострокнутов, М. И. Новиков, В. И. Новиков, Н. В. Прозоровская. Москва : Максипресс, 2005. 369 с.
61. Mikulionok I. O. Simulation of Processing the «Power» Composition in a Mixer with Oval Rotors // Russian Journal of Applied Chemistry. 2010. Vol. 83, N 12, P. 2229–2239. DOI: 10.1134/S107042721012030X
62. Mikulionok I. O. Classification of the Structures of Closed-Type Rotary Mixers for Plastics and Rubber Mixtures (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2021. Vol. 57, N 5–6. P. 437–444. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-021-00956-3>
63. Mikulionok I., Gavva O., Kryvoplias-Volodina L. Modeling the process of polymer processing in twin-screw extruders // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 4/5 (94). P. 35–44. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.139886
64. Микулёнок И. О. Уплотнительные устройства шеек роторов смесителей для резины и пластмасс // Химическая промышленность. 2013. Т. 90, № 1. С. 21–27.
65. Mikulionok I. O. Classification of the Rotor Seals of Internal Mixers for Plastics and Rubber Compounds (Survey of Patents) // Chemical and Petroleum Engineering. 2022. Vol. 58, N 1–2. P. 165–172. DOI: 10.1007/s10556-022-01070-8

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Перелік умовних позначень і скорочень.....	4
1. Проблематика розроблення змішувального устаткування хімічної технології.....	5
1.1. Дослідження ретроспективи конструктивно-технологічного оформлення змішувального устаткування хімічної технології.....	5
1.2. Методика дослідження конструктивно-технологічного оформлення змішувального устаткування хімічної технології.....	5
2. Змішувачі сипких матеріалів.....	7
2.1. Формування класифікаційних ознак змішувачів сипких матеріалів.....	7
2.2. Особливості конструктивного виконання змішувачів сипких матеріалів.....	7
3. Змішувачі рідких середовищ.....	18
3.1. Формування переліку змішувачів рідких матеріалів.....	18
3.2. Проточні статичні кавітаційні змішувачі.....	18
3.3. Роторно-дискові змішувачі.....	26
3.4. Змішувачі з магнітними мішалками.....	33
3.5. Мішалки змінюваної робочої поверхні.....	38
3.6. Дискові мішалки.....	54
3.7. Мішалки у вигляді тіл обертання.....	63
3.8. Теплообмінні пристрої змішувачів з роторними мішалками.....	69
4. Змішувачі пластичних матеріалів.....	79
4.1. Формування переліку змішувального устаткування пластичних матеріалів.....	79
4.2. Змішувальні елементи черв'ячних екструдерів.....	79
4.3. Фільтри екструдерів.....	90
4.4. Роторні змішувачі закритого типу для пластичних мас і гумових сумішей.....	104
4.5. Ущільнення роторів змішувачів закритого типу для пластичних мас і гумових сумішей.....	115
Висновки та рекомендації.....	124
Перелік посилань.....	125

ДЛЯ НОТАТОК

[illegible]

Наукове видання

Мікульонок Ігор Олегович

ІННОВАЦІЙНІ ЗМІШУВАЧІ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Монографія

В авторській редакції

Мікульонок Ігор Олегович



1986 року з відзнакою закінчив факультет хімічного машинобудування Київського ордена Леніна політехнічного інституту імені 50-річчя Великої Жовтневої соціалістичної революції за спеціальністю «Машини та апарати хімічних виробництв» та одержав кваліфікацію інженера-механіка.

1995 року здобув другу вищу освіту (патентознавець-маркетолог).

Натепер працює на посаді професора кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Доктор технічних наук (2010), професор (2011), старший науковий співробітник (2015).

Заслужений винахідник України (2009), відмінник освіти (2015).

Відзначений нагрудними знаками «Винахідник СРСР» (1990) і «Творець» (2009), медаллю Всесвітньої організації інтелектуальної власності «За винахідництво» (2016).

Автор і співавтор тисячі двохсот винаходів і корисних моделей, понад двадцяти монографій, а також близько сотні підручників, навчальних посібників і навчально-методичних матеріалів.