

УДК 66.021.1:532.5

УКПП

№ держреєстрації 0117U003931

Інв. №

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
40007, м. Суми, вул. Р–Корсакова, буд. 2;  
тел. (0542) 33-41-08/33-40-49

ЗАТВЕРДЖУЮ

проректор з наукової роботи

д-р.фіз.-мат.наук, професор

А.М. Чорноус

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

Розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних  
пристроїв для нафтогазового обладнання

ПЕРЕДПРОЕКТНА ПІДГОТОВКА

(проміжний)

Начальник НДЧ

канд.фіз.-мат. наук., с.н.с

Д. І. Курбатов

Керівник НДР

д-р. техн. наук, доцент

О.О.Ляпощенко

26.12.2017

2017

Рукопис закінчено 24 грудня 2017 р.

Результати цієї роботи розглянуті науковою радою, протокол від 29.11.2017 р. №2

**СПИСОК АВТОРІВ**

Керівник НДР головний науковий співробітник д-р. техн. наук.	О.О.Ляпощенко 26.12.2017 (реферат, вступ, висновки)
Відповідальний виконавець науковий співробітник	М.М.Дем'яненко 26.12.2017 (вступ, розд.1-2)
Старший науковий співробітник канд. техн. наук	О.В.Литвиненко 26.12.2017 (розд.1-2)
Старший науковий співробітник канд. техн. наук	В.О.Іванов 26.12.2017 (підрозд.1.2, 1.3)
Старший науковий співробітник канд. техн. наук	Р.О.Острога 26.12.2017 (підрозд.1.2, 1.3)
Науковий співробітник канд. техн. наук	А.В.Литвиненко 26.12.2017 (підрозд.1.1, розд.2)
Молодший науковий співробітник канд. техн. наук	І.В.Павленко 26.12.2017 (розд.2)
Молодший науковий співробітник канд. техн. наук	І.М.Дегтярьов 26.12.2017 (підрозд.1.3)

Інженер

О.Ю.Маренок

26.12.2017 (розд.1)

Інженер

О.Є.Старинський

26.12.2017 (підрозд.1.1, 1.2, 2.1)

Технік

В.В. Ковтун

26.12.2017 (підрозд.1.1, 1.2, 2.2)

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 55 с., 14 рис., 1 табл., 53 джерел.

ВОДА, ГІДРАВЛІЧНИЙ ОПІР, ЕФЕКТИВНІСТЬ, КОНДЕНСАТ, КРАПЛІ,  
НАФТА, ПРИРОДНИЙ ГАЗ, СЕПАРАЦІЯ, СЕПАРАТОР, ЧАСТКИ.

Об'єкт дослідження – процеси сепарації гетерогенних систем та сепараційне обладнання.

Мета роботи – вдосконалення технології інерційно-фільтруючої сепарації двофазних потоків, моделювання динамічних процесів сепарації гетерогенних систем з аналізом впливу вібрації (акустичних коливань) та сполученого тепломасообміну, розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних пристроїв.

Методи дослідження. В основу теоретичних досліджень покладено методи теорії подібності, а також моделі, що ґрунтуються на фундаментальних положеннях механіки рідини і газу, класичних положеннях теорії гідродинаміки та гідроаеропружності, базових принципах технологічної підготовки виробництва і технологій хімічного та нафтогазового машинобудування.

На підставі проведеного аналітичного огляду тенденцій розвитку технологій та техніки для розділення двофазних багатокомпонентних сумішей визначено основні способи підвищення енергоефективності і ступеня розділення модульних сепараційних пристроїв. Систематизовано варіанти конструювання багатофункціонального модульного сепараційного обладнання. Розроблено конструкторсько-технологічну класифікацію уніфікованих модулів сепараційних пристроїв. Розширено уявлення про теоретичні основи процесів сепарації газодисперсних систем в апаратах з інтенсивними гідродинамічними режимами, зокрема, фізичні умови утворення та моделі формування газодисперсних систем, механіку та динаміку турбулентних газодисперсних потоків. Окреслено теоретичні і практичні проблеми механіки суцільних середовищ та процесів сепарації газодисперсних систем.

## ЗМІСТ

	с.
Вступ.....	6
1 Аналітичний огляд сучасних тенденцій і шляхів розвитку технологій (методів) та техніки для розділення двофазних багатокomпонентних сумішей.....	7
1.1 Основні способи підвищення енергоефективності і ступеня розділення в модульних сепараційних пристроїв.....	7
1.2 Систематизація існуючих компонок сепараційного обладнання і розробка класифікації уніфікованих модулів сепараційних пристроїв на основі конструкторсько-технологічних характеристик.....	16
1.3 Конструкторсько-технологічна класифікація уніфікованих модулів сепараційних пристроїв.....	21
2 Теоретичні основи процесів сепарації газодисперсних систем в апаратах з інтенсивними гідродинамічними режимами.....	24
2.1 Фізичні умови утворення та моделі формування газодисперсних систем.....	24
2.2 Механіка та динаміка турбулентних газодисперсних потоків.....	32
2.3 Теоретичні і практичні проблеми механіки суцільних середовищ та процесів сепарації газодисперсних систем.....	42
Висновки.....	48
Перелік джерел посилання.....	49

## ВСТУП

Процеси сепарації фаз є супутніми при протіканні більшості з основних процесів переробки вуглеводнів, зокрема, підготовки нафти і газу до транспортування та переробки в промислових машинах та апаратах. На сьогоднішній день набув розповсюдження спосіб розділення гетерогенних систем, що передбачає встановлення в корпусі апарата послідовно розташованих сепараційних пристроїв різного типу.

Для створення нових вискоелективних модульних сепараційних пристроїв науковцями Сумського державного університету використані принципово нові підходи. У випадку інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв фільтруючі елементи було розташовано в зонах потенційного вторинного унесення з інерційних сепараційних каналів, що дозволило досягти зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації у широких діапазонах навантажень та співвідношення фаз. Ще одним не традиційним методом підвищення ефективності розділення є застосування автоматичного регулювання гідравлічного опору, де регулюючою дією є пружні сили. Газорідинний потік, що містить краплинну рідину, направляють в сепараційний пакет, який містить пружні консольно закріплені пластини, які під дією динамічного тиску потоку змінюють свою форму, а отже і поперечний переріз для проходження потоку. Саме за рахунок цього відбувається регулювання гідравлічного опору. Підсумовуючи вищесказане, необхідно відмітити, що для розроблення інженерних методик розрахунку нових типів сепараційних модулів необхідно виявляти основні керуючі фактори у кожному випадку та враховувати взаємодію з іншими модулями, що входять в сепараційний апарат.

Отже, метою даної роботи є вдосконалення технології інерційно-фільтруючої сепарації двофазних потоків, моделювання динамічних процесів сепарації гетерогенних систем з аналізом впливу вібрації (акустичних коливань) та сполученого тепломасообміну, розробка та впровадження енергоефективних модульних сепараційних пристроїв.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ І ШЛЯХІВ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ (МЕТОДІВ) ТА ТЕХНІКИ ДЛЯ РОЗДІЛЕННЯ ДВОФАЗНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ

## 1.1 Основні способи підвищення енергоефективності і ступеня розділення в модульних сепараційних пристроях

Основними параметрами при оцінці ефективності роботи будь-якого сепараційного пристрою є ступінь розділення (коефіцієнт ефективності сепарації)  $\eta$ , для визначення якого використовуються два основні співвідношення [1], [2].

Першим та найбільш застосованим співвідношенням являється, визначення даного параметру як відношення кількості відділеної дисперсної фази до її кількості у багатоконпонентній суміші на вході до сепаратора [1] - [3]:

$$\eta = \frac{G_1 - G_2}{G_1} = \frac{G_3}{G_1}, \quad (1)$$

де  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  – масова витрата дисперсних часток (краплин), що потрапили до сепаратора, залишилися в потоці суцільної фази на виході сепаратора, а також видалені в сепараційному апараті або пристрої відповідно,  $кг/с$ .

Другим застосовуваним співвідношенням для визначення коефіцієнту ефективності розділення гетерогенних сумішей є значення фракційної ефективності  $\eta_\phi$ , тобто використання ступеня очищення від часток визначеного розміру [2]:

$$\eta = \sum \eta_\phi c_\phi, \quad (2)$$

де  $c_\phi$  – вміст часток даної фракції у суміші.

На сьогоднішній день набув розповсюдження спосіб розділення гетерогенних систем, що передбачає встановлення в корпусі апарату послідовно розташованих високоефективних модульних сепараційних пристроїв різного типу.

До переваг даного підходу відноситься: зменшення металоємності та об'ємів обладнання, поєднання в одному модулі декількох технологічних процесів, що спрощує розробку та впровадження автоматизованих систем управління та підвищує якість підготовки продукту.

Ефективність таких апаратів визначається за наступною залежністю [2]:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_i), \quad (3)$$

де  $\eta_1, \eta_2, \eta_i$  – коефіцієнти ефективності окремих ступенів сепарації відповідно.

Але поряд з перерахованими вище перевагами даного підходу є наступні труднощі при його використанні, а саме створення якісних інженерних методик які б могли враховувати технологічні та керуючі фактори протікання процесів розділення.

Оскільки в апаратах з модульними пристроями використовуються різні методи розділення необхідно розглядати не тільки кожен процес окремо, а і їх комбінацію.

Загальним важливим показником при використанні будь якого з методів розділення являється гідравлічний опір. При зростанні коефіцієнту ефективності сепарації починаючи з певного моменту мало помітне підвищення ефективності сепарації супроводжується суттєвим підвищенням гідравлічного опору. Це пов'язано з тим, що на початковій стадії розділення, у вхідних сепараційних пристроях відділяється крупнодисперсна фракція, яка складає більшу масову долю дисперсної фази. На даному етапі зазвичай застосовуються процеси гравітаційно-інерційного розділення та відповідні сепараційні пристрої, які характеризуються незначним гідравлічним опором та забезпечують ефективність сепарації  $\eta=30-70\%$ . Порівняння розподілу



дисперсних часток на вході до модульних сепараційних пристроїв та на виході після первинної та основної сепарації показує, що у потоці залишається високодисперсна фракція, яка складає незначну масову долю дисперсної фази відносно її початкового значення. На наступних стадіях сепарації виникає необхідність вловлювати все більш дрібніші частки, що спонукає до застосування інших методів розділення. На цих стадіях сепарації застосовують процеси розділення у полі відцентрових сил і процеси фільтрування, які реалізують у відповідних сепараційних пристроях, що мають високий гідравлічний опір та ступінь розділення  $\eta=99,5-99,9\%$ . Отже, при сепарації кожної наступної високодисперсної складової двофазного потоку питомі витрати на основний процес перевищують витрати на його реалізацію.

Основними шляхами вдосконалення внутрішніх пристроїв сепараційного обладнання є [4] встановлення насадок для коалесценції та фільтруючих насадок або їх тонкошарових модулів, застосування для них змочуваних або не змочуваних матеріалів, створення регулярно-структурованих елементів з організованим відведенням рідини [5] - [8]. Науковцями Сумського державного університету при створенні нового окремого класу сепараційних пристроїв - інерційно-фільтруючих, які поєднують переваги та уникають основні недоліки, притаманні окремим типам сепараційних пристроїв (відцентрових, насадкових, сітчастих, фільтрів), використані принципово нові рішення організації руху та взаємодії двофазних потоків. Розташуванням фільтруючих елементів на стінках жалюзей в зонах потенційного руйнування структури плівки вловленої рідини та вторинного унесення газовим потоком бризок з інерційних сепараційних каналів в комплексі з застосуванням відокремлених дренажних каналів у подвійних жалюзях досягається одночасне зниження гідравлічного опору та підвищення ефективності сепарації у широких діапазонах навантажень та співвідношення фаз [5]. Конструкція модулю, в якому реалізований інерційно-фільтруючий метод розділення вказаний на рисунку 1.1.

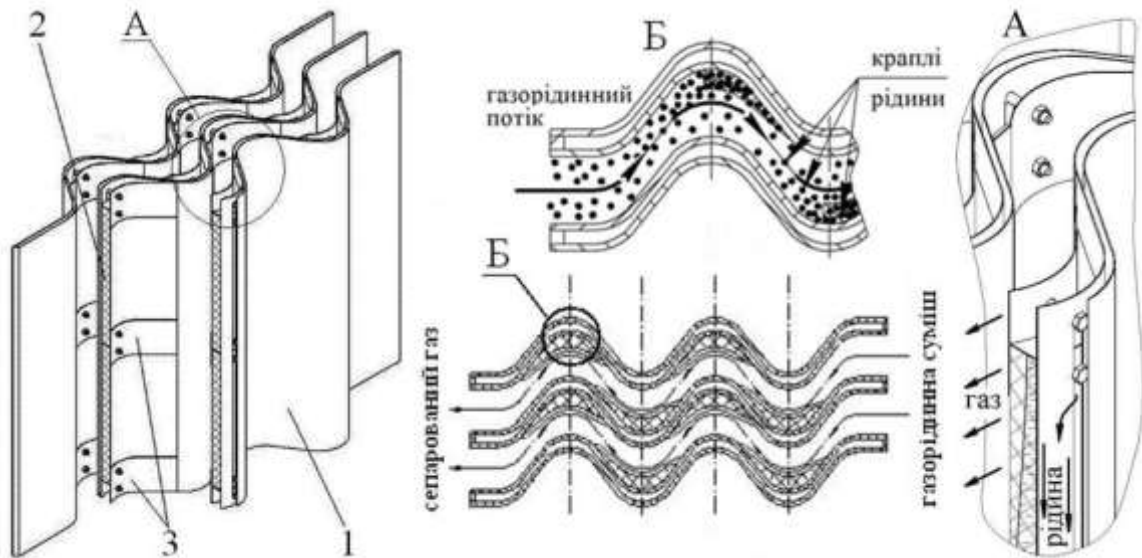


Рисунок 1.1 – Інерційно-фільтруючий модуль

1 – подвійні гофровані пластини; 2 – фільтрувальні елементи (смуги волокнистого матеріалу); 3 – жолоби для сепарованої рідини

Ще одним не традиційним методом підвищення ефективності розділення є застосування автоматичного регулювання гідравлічного опору, де регулюючою дією є пружні сили [9].

Газорідинний потік, що містить краплинну рідину, направляють в сепараційний пакет, який містить пружні пластини, консольно закріплені, які під дією динамічного тиску (швидкісного напору) потоку та внутрішніх напружень, що виникають в пластинах, змінюють свою форму, а отже і поперечний переріз для проходження потоку, а отже і гідравлічний опір. Краплинна рідина, яка міститься в газорідинному потоці під дією сил інерції відхиляється від скривленої лінії струму газорідинного потоку, який огинає пластини, що набули іншої форми та осаджується на їх внутрішній поверхні, з наступною коагуляцією і утворенням плівки рідини, яка стікає вздовж внутрішній поверхні пластини. При зростанні швидкості газорідинного потоку, зростає динамічний тиск (швидкісний напір) потоку та внутрішні напруження в пластині, збільшується прогин пластин, відповідно і площа прохідного перерізу, а отже зменшується гідравлічний опір. При зменшенні швидкості газорідинного потоку, зменшується динамічний тиск (швидкісний напір)

потоків та внутрішні напруження в пластині, зменшується прогин пластин, відповідно і площа прохідного перерізу, а отже зменшується гідравлічний опір [10], [11]. Конструкції динамічних сепараційних елементів наведені на рисунку 1.2. Різниця між двома елементами наведені в таблиці 1.1.

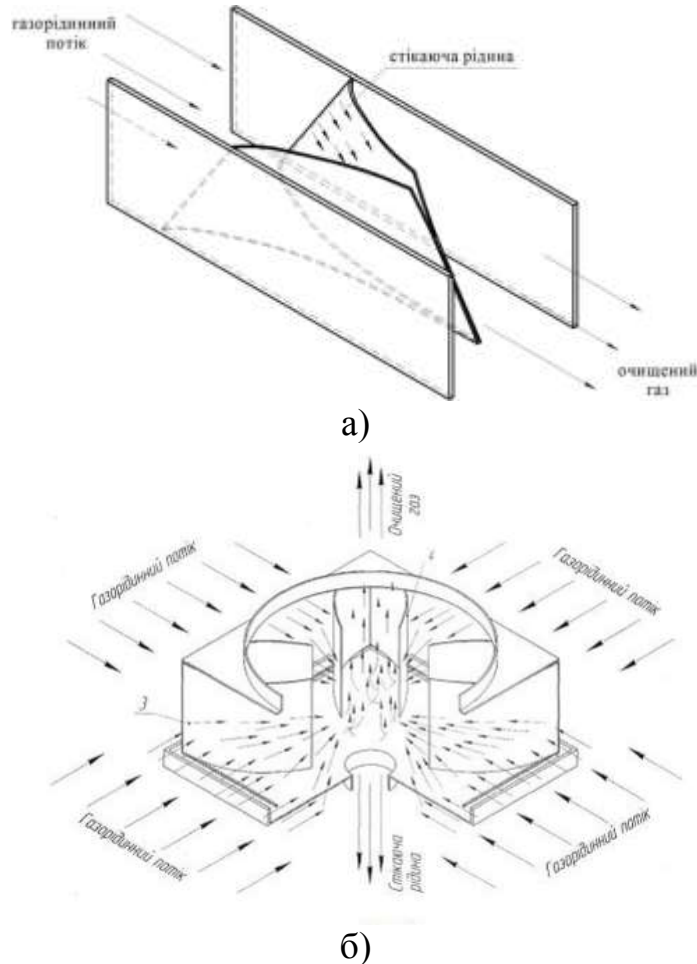
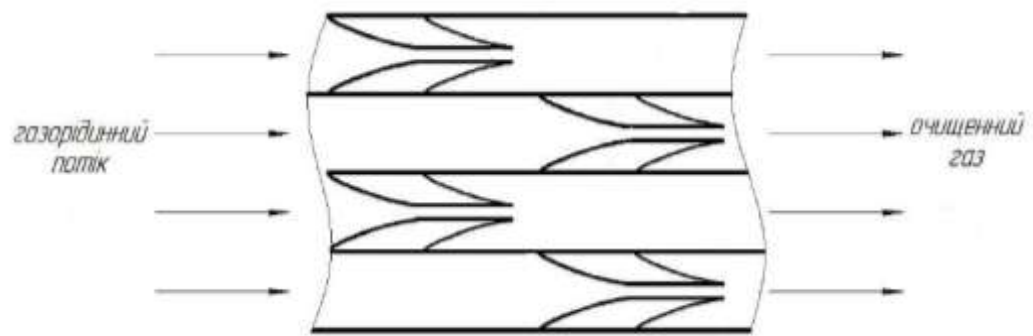


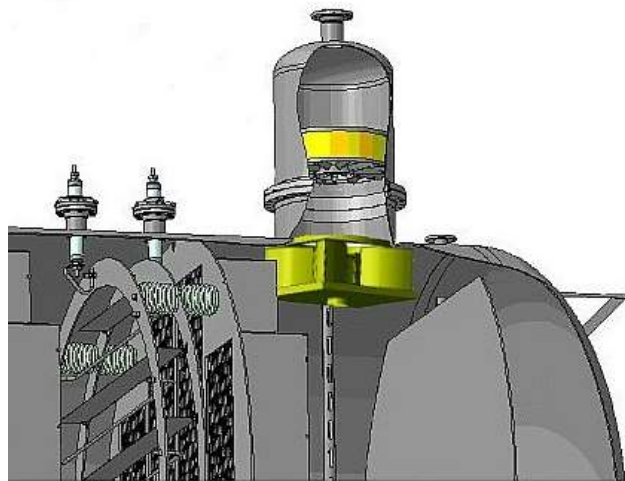
Рисунок 1.2 – Конструкції модульних динамічних сепараційних пристроїв

Таблиця 1.1 - Різниця між двома конструкціями модульних динамічних сепараційних пристроїв

Параметр	Конструкція А	Конструкція Б
Кількість входів	1	4
Форма лопаткових елементів	зрізаний похилий параболічний напівцилінд	прямокутні
Розташування	Рисунок 1.3 а	Рисунок 1.3 б



а)



б)

Рисунок 1.3 - Розташування модульних динамічних сепараційних пристроїв в апаратах

Конструкцію, яка вказана на рисунку 1.2 а можна встановлювати, як самостійні сепараційні елементи, які планується розташовувати в шаховому порядку в горизонтальних апаратах, або як допоміжний ступінь очистки попутного нафтового газу в апаратах типу «Heater-Treater»[12] в повздовжньому напрямку руху газу.

Конструкцію, яка вказана на рисунку 1.2 б можна встановлювати, як допоміжний пристрій, наприклад в апараті типу «Heater-Treater»[12], як вказано на рисунку 1.2 б.

Саме такі конструкції зможуть вирішити проблему с великим коливанням навантажень по рідині в газорідинній суміші. Підтримання її якісної очистки на заданому рівні являється дуже важливим оскільки очищений газ

використовується для підігріву нафти в цьому апараті (очищений газ подається на пальники).

Підсумовуючи розглянуті основні методи розділення двофазних багатокомпонентних сумішей на підставі комплексного підходу визначено основні способи підвищення ефективності сепарації і шляхи удосконалення модульних сепараційних пристроїв (апаратів з інтенсивними гідродинамічними режимами) та багатофазних сепараторів (фазних розділювачів), рис.1.4-1.5 [4]. Підвищити продуктивність можна лише у випадку підвищення ефективності за рахунок зменшення вторинного унесення, а це в свою чергу передбачає удосконалення внутрішніх пристроїв (встановлення коалесцюючих та фільтруючих насадок або їх тонкошарових модулів, застосування для них змочуваних або не змочуваних матеріалів, створення регулярно-структурованих елементів з організованим відведенням рідини, застосуванням елементів, що працюють як системи автоматичного регулювання гідравлічного опору), при цьому може бути розширене функціональне призначення апаратів (об'єднання функцій сепарації та розподілу суцільної фази, часткова первинна сепарація або фільтрація для зниження масового співвідношення фаз) і цей процес має ітераційно-циклічний характер, бо перелічені фактори безпосередньо пов'язані та впливають один на одного [13]. На підставі аналізу можливих шляхів удосконалення існуючого сепараційного обладнання в основу пропонованих способів сепарації покладено більшість з основних сформульованих способів підвищення ефективності сепарації.

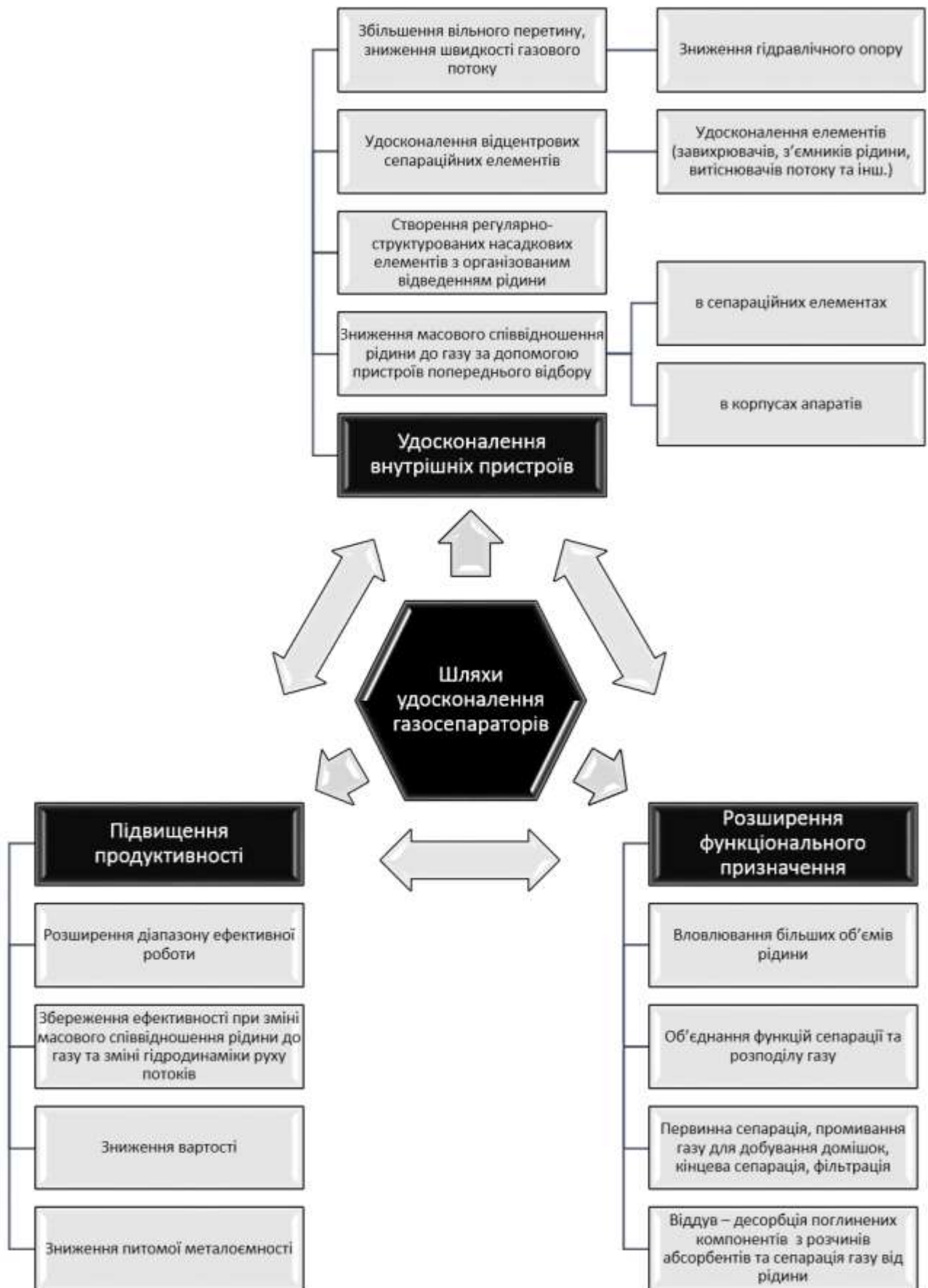


Рисунок 1.4 – Способи підвищення ефективності газосепараторів [5]

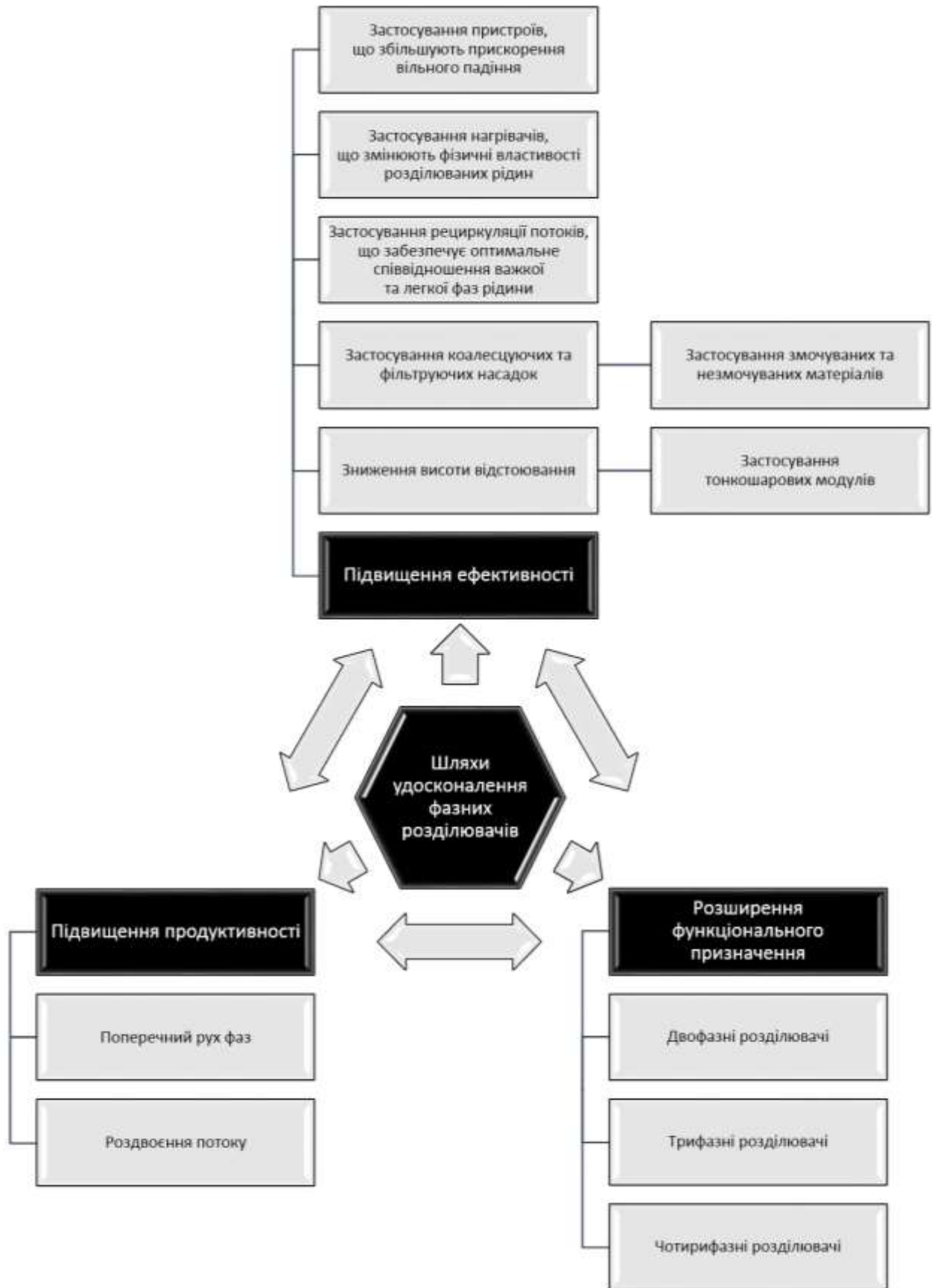


Рисунок 1.5 – Способи підвищення ефективності багатофазних сепараторів [5]

## 1.2 Систематизація існуючих компоновок сепараційного обладнання і розробка класифікації уніфікованих модулів сепараційних пристроїв на основі конструкторсько-технологічних характеристик

На сьогоднішній день велика кількість виробників застосовують модульний підхід для створення сепараційних елементів, в залежності від призначення апарату, продуктивності, необхідної кількості ступенів розділення для забезпечення заданої ефективності очищення чи сепарації фаз, компонентного та дисперсного складу вихідних сумішей і отримуваних продуктів, фізико-хімічних властивостей компонентів, співвідношення фаз, припустимого гідравлічного опору застосовують різні варіанти компоновки сепараційних вузлів та пристроїв. Нижче наведені найбільш часто засновані компоновки.

Для розділення високодисперсної суміші застосовують жалюзійні сепаратори (рисунок 1.5), де на стадії початкової сепарації можуть встановлюватись сітчасті коагулятори Sulzer KnitMesh™ та високопродуктивні вхідні розподільники Shell Schoepentoeter™ для відділення крупнодисперсних часток, а у якості основного сепараційного пристрою встановлюють жалюзійні блоки Sulzer Mellachevron™ (рисунок 1.5 б), в якому попередньо відділяються порівняно крупні краплі (ефективність сепарації до 80%).

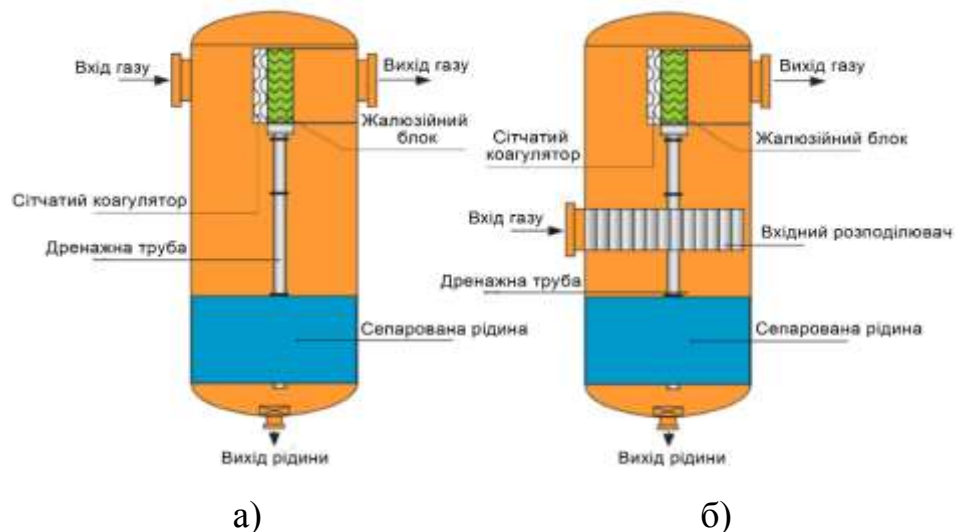


Рисунок 1.5 - Високопродуктивні жалюзійні сепаратори [14]



Жалюзійні сепараційні блоки розташовуються у горизонтальних та вертикальних сепараторах наступним чином (рисунок 1.6):

- з горизонтальним рухом газорідинного потоку крізь вертикальний жалюзійний блок, перехресно до плівки рідини, що стікає по стінках жалюзей (рисунок 1.6 а, б, д);

- з рухом газорідинного потоку з низу в гору крізь горизонтальний жалюзійний блок, протитечійно до плівки рідини, що стікає по стінках жалюзей (рисунок 1.6 в, г);

- з перехресним рухом газорідинного потоку і плівки вловленої рідини, що стікає по стінках жалюзей V-подібного подвійного жалюзійного блоку (рисунок 1.6 е).

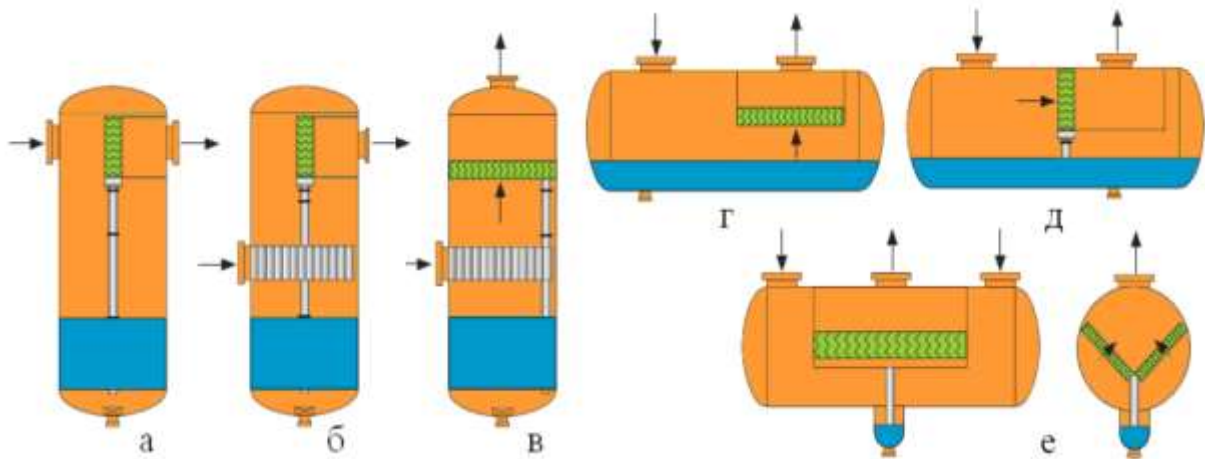


Рисунок 1.6 - Варіанти компоновання жалюзійних сепараційних блоків у горизонтальних та вертикальних сепараторах [14]

У жалюзійно-сітчастих сепараторах (рисунок 1.7) у якості вхідного сепараційного пристрою встановлюється жалюзійний розподільник-краплевловлювач Shell Schoerpentoeter™ та горизонтальний або вертикальний сітчастий тумановловлювач Sulzer KnitMesh™, які забезпечують високу ефективність та дозволяють ефективно вловлювати високодисперсні краплі рідини [14].

Відомо, що локальні швидкості руху газового потоку в пристінкових шарах суттєво менше від швидкості газу в ядрі потоку, тому плівка сепарованої рідини з сітчастих відбійників без руйнування стікає по стінці корпуса

вертикального апарату до збірника рідини жалюзійно-сітчастого сепаратора (рисунок 1.7 а) [1, 15, 16].

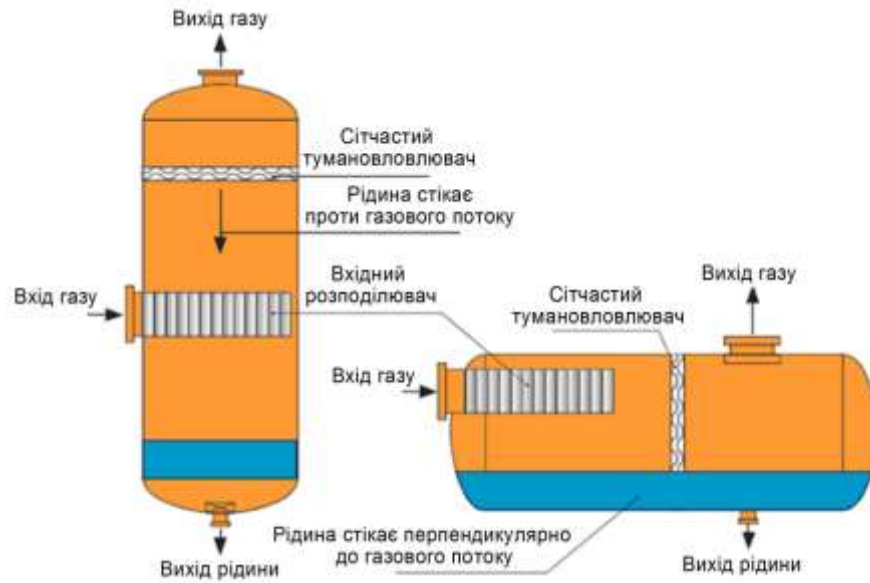


Рисунок 1.7 - Високоєфективні жалюзійно-сітчасті сепаратори [14]

Високопродуктивні та високоєфективні багатоступеневі комбіновані сепаратори (Shell SVS™, SMS™, SMSM™, SMMSM™ (рисунок 1.8)), в порівнянні з сітчастими сепараторами за однакових масогабаритних характеристик забезпечують високу ефективність сепарації (до 99%) та підвищення до 2,5 рази продуктивності по газу [14].

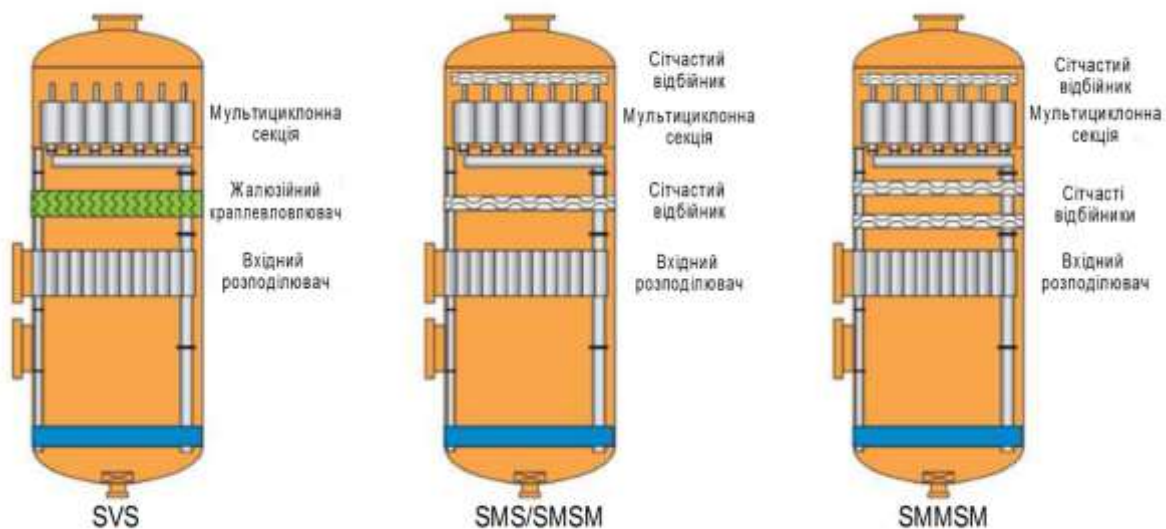


Рисунок 1.8 - Високоєфективні жалюзійно-сітчасті сепаратори

Характерною загальною рисою таких апаратів є застосування в якості вхідного пристрою високопродуктивних жалюзійних розподільників-краплевловлювачів Shell Schoepentoeter™ або Schoepentoeter Plus™ (S). Горизонтальні сітчасті відбійники Sulzer KnitMesh™ виконують функції коагулятора або сепаратора в залежності від витрати та швидкості газового потоку (M). Сітчасті відбійники Sulzer KnitMesh™ можуть бути поєднані в апаратах у декілька ступенів (MM), в тому числі виконуватися з різними волокнистими наповнювачами та з шарами з різним діаметром волокон, чим по-перше досягається підвищення ефективності сепарації, а по-друге представляється можливим окреме відділення з двофазних багатокомпонентних сумішей (систем типу газ/рідина/рідина) краплин рідини. Основним сепараційним пристроєм в апаратах є мультициклонна секція Swirldeck (S). В конструкціях високопродуктивних SMS™/SMSM™/SMMSM™-сепараторів над мультициклонними секціями Swirldeck, як правило, встановлюється горизонтальний сітчастий відбійник Sulzer KnitMesh™, призначений для вторинної сепарації газу від бризок та туману, які утворюються внаслідок високо інтенсивних гідродинамічних режимів у прямотечійно-відцентрових елементах Shell Swirltube™. Сітчасті відбійники Sulzer KnitMesh™ можуть бути замінені на горизонтальні секції насадкових жалюзійних краплевловлювачів Sulzer Mellachevton™ з утворенням SVS-сепараторів.

Модульний підхід для створювання розділювачів застосовується не тільки для розділення газорідинних сумішей, а й для розділення більш складних систем таких, як газ/вода/нафта. Прикладом застосування даного підходу може слугувати розроблений науковцями Сумського державного університету фазний розділювач (підігрівачах-деемульсаторах типу «Heater Treater») [12], який застосовують для розділення газорідинних сумішей та розшарування емульсій у якості вхідного вузла встановлений поличковий дефлектор, для початкового розділення суміші та перешкоджанню піноутворення та зменшення вхідної швидкості потоку. У секції відстоювання, у якості основних сепараційних пристроїв послідовно рівномірно розміщені пакети пластичної та

листової насадки, у кількості п'яти штук, для прискорення процесу розділення емульсії. На вихідному штуцері для газового потоку встановлений інерційний краплеловлювач та сітчастий відбійник. На рисунку 1.9 наведена конструкція даного апарату.

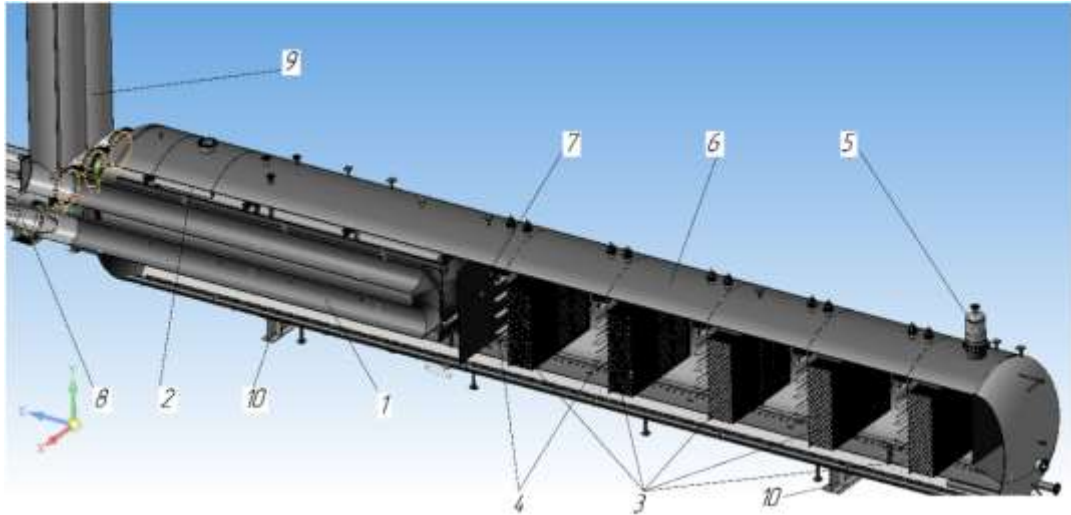


Рисунок 1.9 - Блочний горизонтальний сепаратор нафтогазорозділювач типу «Heater Treater» (підігрівач-деемульсатор)

1 – U-подібні жарові труби; 2 – поличний дефлектор; 3 – жалюзійна насадка; 4 – електродні решітки; 5 – газосепаратор; 6 – корпус; 7 – перегородка; 8 – інжекційні пальники з вбудованим калорифером; 9 – димові труби; 10 – опори

Підсумовуючи вище розглянуті компоновки сепараційного обладнання можна виділити за конструктивними та технологічними особливостями наступні групи модульних сепараційних пристроїв:

- вхідні модулі, що виконують функції початкового розділення фаз, за принципом дії дані пристрої можуть бути гравітаційно-інерційними, відцентровими та газодинамічними;

- основні сепараційні модулі, які за принципом дії можуть бути інерційно-фільтруючими, відцентровими, газодинамічними, дані модулі забезпечують більш високий ступінь розділення ніж на попередній секції;

- вихідні сепараційні модулі, що забезпечують найбільш тонке розділення газорідного потоку, дані модулі зазвичай являється інерціно-фільтруючими та фільтруючими.

### **1.3 Конструкторсько-технологічна класифікація уніфікованих модулів сепараційних пристроїв**

На рисунку 1.10 у верхньому блоці наведена конструкторська класифікація сепараційних модулів.

Існуюча класифікація модульних сепараційних пристроїв (МСП) лише за конструкторськими ознаками не відображає технологічні аспекти, які особливо важливі при проектуванні та виготовленні не тільки модульних сепараційних пристроїв, а й пристосувань для їх виготовлення [17]. Тому у новій класифікації необхідно розглянути, як конструкції МСП, так і урахувати технологічні аспекти їх виробництва.

На основі комплексного аналізу МСП, та їх основних технологічних ознак, запропоновано конструкторсько-технологічну класифікацію (рисунок 1.9), у якій враховано всі можливі конструкції МСП.

За типом обробки МСП можна розділити на ті МСП деталі яких у своїй більшості підлягають механічній обробці різанням, МСП, що виготовляються за допомогою слюсарних операцій, та МСП, що виготовляються за допомогою адитивних технологій, які не потребують механічної обробки, а лише складання.

Деталі МСП можуть бути виготовлені, як із металів, наприклад сталей, так і неметалів, а також у комбінації металів та неметалів, тобто бути комбінованими. Це впливає на вибір різального інструменту та режимів різання при механічній обробці деталей МСП.

За формою поперечного перерізу сепараційних каналів МСП поділяються на МСП з округлих деталей та деталей плоскої або складної форми, що з технологічної точки зору допомагає орієнтуватися на тип обладнання на якому буде виконуватись обробка деталей МСП.

За масою МСП класифікуються на легкі (менше 10 кг), середні (10–100 кг) та важкі (більше 100 кг), що також визначає в певній мірі технологічні характеристики верстатів, на яких буде виконуватися механічна обробка.

За габаритними розмірами МСП відповідно поділяються на малі (менше 100x100x100 мм), середні (100x100x100–1000x1000x1000 мм) та великі (більше 1000x1000x1000 мм), що визначає габаритні розміри верстатних пристроїв у яких будуть виготовлятися деталі МСП та необхідний робочий простір верстата.

Розроблено конструкторсько-технологічну класифікацію МСП, що включає в себе конструкторські та технологічні ознаки їх виготовлення. На основі даної класифікації планується запропонувати структурний код вибору МСП для конкретних виробничих задач, а також здійснювати автоматизоване проектування технологічних процесів виготовлення та складання деталей МСП [18] у вузли на основі бібліотек МСП, що може застосовуватись у інформаційно-пошукових системах та дозволить скоротити терміни конструкторської та технологічної підготовки виробництва.

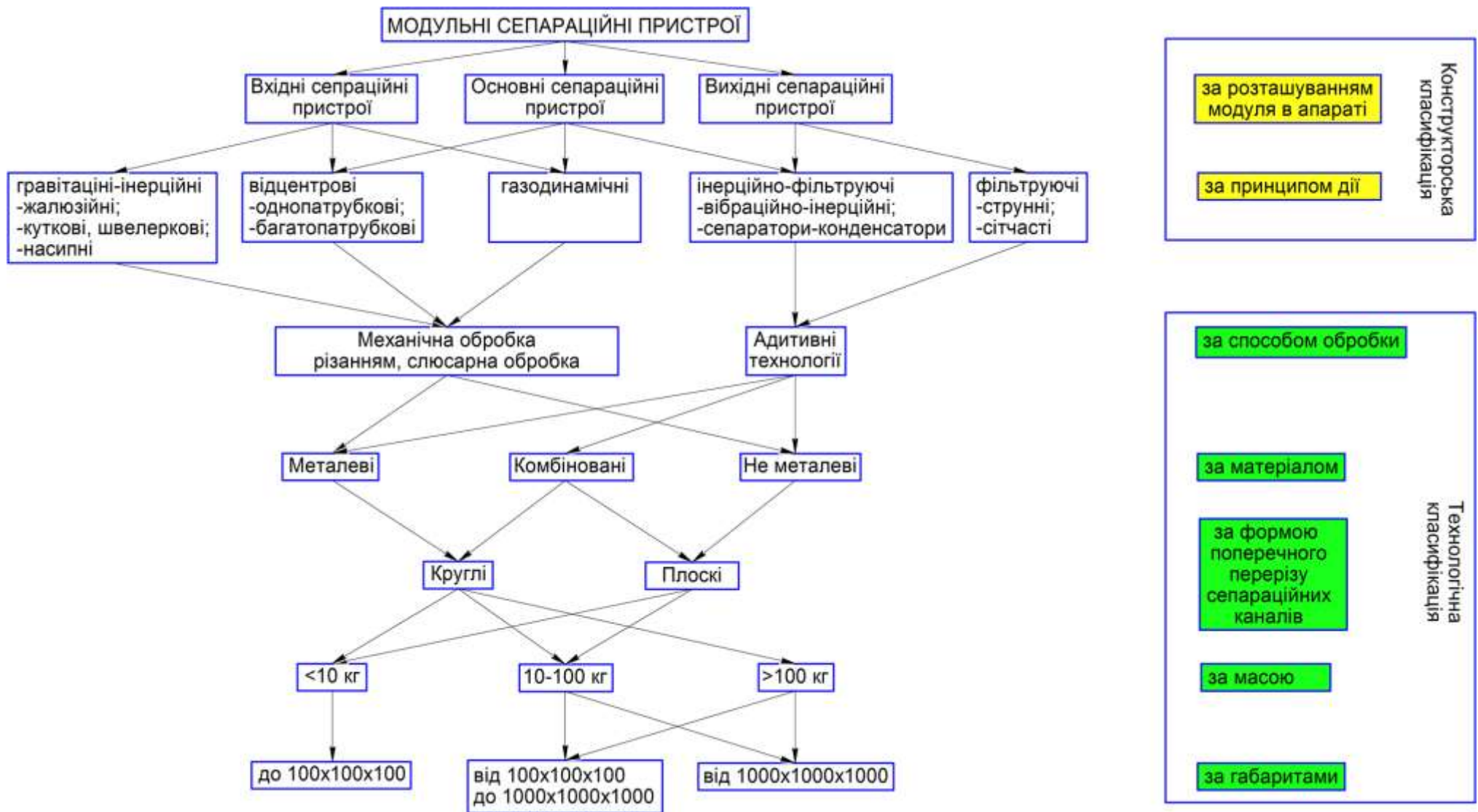


Рисунок 1.10 – Конструкторсько-технологічна класифікація модульних сепараційних пристроїв (МСП)

## **2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ СЕПАРАЦІЇ ГАЗОДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ В АПАРАТАХ З ІНТЕНСИВНИМИ ГІДРОДИНАМІЧНИМИ РЕЖИМАМИ**

### **2.1 Фізичні умови утворення та моделі формування газодисперсних систем**

Утворені природою дисперсні системи завжди є полідисперсними внаслідок безперервного протікання процесів коагуляції та руйнування краплин рідини, конденсації та випаровування [19]. У експериментальних роботах з дослідження гідродинамічних процесів у турбулентних двофазних потоках, які проводяться в умовах полідисперсних систем, розподіл часток за розмірами або зовсім не вивчається, або визначається досить грубо, що пояснюється складністю таких експериментів та високою вартістю відповідних вимірювальних пристроїв [14]. Розглянувши утворення краплин рідини за рахунок різних механізмів формування, представляється можливим провести якісну оцінку вказаних параметрів [2].

Рекомендовані інтервали доцільного застосування сепараційного обладнання різного типу визначено на основі класифікації газорідинних та запилених потоків за розмірами дисперсних часток. Слід зазначити, що застосування нових способів сепарації та відповідних пристроїв для їх здійснення надає перспективи для ефективного розділення газорідинних систем у широкому діапазоні розмірів дисперсних часток від краплин (брязок) і мряки до туману [14].

Основним способом утворення газодисперсних систем є процеси конденсації та диспергування, а основними механізмами формування крапель у турбулентному потоці газу за відсутності конденсації є процеси подрібнення та коагуляції, які відбуваються одночасно [20]. Тому на вході та виході з сепараційних пристроїв встановлюється деякий рівноважний полідисперсний розподіл з краплин за розмірами  $n(R)$ , що має вигляд логарифмічно



нормального розподілу, та характеризується об'ємним вмістом рідкої фази  $C_L$ , середнім радіусом крапель  $R_c$  та дисперсією розподілу  $\sigma_1^2$  [21]:

$$n(R) = \frac{n_* R_1}{\sigma_1 R} \exp\left(-\frac{\ln^2(R/R_1)}{2\sigma_1^2}\right), \quad (4)$$

$$n_* = 3\tilde{N}_L \exp(-2,5\sigma_1^2) / 4\pi\sqrt{2\pi}R_c^4, \quad (5)$$

$$R_1 = R_c \exp(-0,5\sigma_1^2), \quad (6)$$

де  $R$  – радіус краплин, м;  $n(R)$  – функція щільності розподілу дисперсного складу краплин у газорідному потоці (імовірності випадкової величини  $R$ );  $C_L$  – об'ємний вміст рідкої фази у газорідному потоці,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $R_c$  – середній радіус краплин ( $R_c = d_{32}/2$ ), м;  $d_{32}$  та  $d_{50}$  – середній діаметр краплин по Заутеру (зважений по питомій поверхні) та середній масовий діаметр краплин відповідно, м;  $\sigma_1^2$  – дисперсія розподілу.

Відомо, що краплі в потоці газу подрібнюються, якщо їх радіус перевищує деякий критичний  $R_{кр}$ , а краплі меншого радіусу можуть тільки коагулювати [21]. Середній радіус часток варто брати рівним критичному радіусу  $R_c = R_{кр}$ , оскільки у дійсності процеси коагуляції та подрібнення носять випадковий характер та більш коректно зазначити, що ймовірність подрібнення краплі радіусом менше критичного  $R < R_{кр}$  малою. Дисперсні частки з радіусом більше критичного  $R > R_{кр}$  з великою вірогідністю подрібняться з утворенням двох приблизно однакових за розмірами «дочірніх» краплин та кілька високодисперсних сателітів, які будуть укрупнюватись до тих пір, поки їх розмір не досягне критичного  $R_{кр}$ . Отже, при оцінці середнього розміру краплин можна його приймати рівним критичному  $R_c = R_{кр}$ . Подрібнення краплин в турбулентному потоці газу відбувається за рахунок різниці густини рідини та газу, а також за рахунок швидкості турбулентних пульсацій, які обтікають краплю з різних боків. При цьому подрібнення краплі відбувається за рахунок деформації її поверхні. Динамічний напір є основним фактором, що

впливає на процес подрібнення краплі, і крапля не подрібнюється до тих пір, поки умова рівноваги краплі не порушиться (динамічний напір врівноважений силою поверхневого натягу) [21]:

$$\frac{0,5\rho_L^{2/3}\varepsilon_0^{2/3}R^{2/3}}{\rho_G^{2/3}} = \frac{2\sigma}{R}, \quad (7)$$

виходячи з якої, критичний радіус краплі  $R_{кр}$ , тобто радіус, при перевищенні значення якого крапля з великою вірогідністю подрібниться:

$$R_{\varepsilon\delta} = d_e C_D^{-3/5} We^{-3/5} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{2/5}, \quad (8)$$

де  $\rho_L$  та  $\rho_G$  – густина дисперсної та суцільної фаз відповідно, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_0$  – питома дисипація енергії, Дж/(м<sup>3</sup>·с);  $\sigma$  – поверхневий натяг, Н/м;  $d_e$  – ефективний (еквівалентний) гідравлічний діаметр потоку, м;  $C_D$  – коефіцієнт опору обтіканню частки газовим потоком;  $We$  – число Вебера (відношення сил інерції до сил поверхневого натягу).

$$We = \frac{\rho_G w^2 d_e}{\sigma}, \quad (9)$$

Розглядаючи коагуляцію краплин в турбулентному потоці виділяють два основних механізми: інерційний механізм та механізм турбулентної дифузії. В основі інерційного механізму лежить припущення про те, що турбулентні пульсації не повністю захоплюють краплю, тому відносні швидкості краплин залежать від їх маси. Різниця пульсаційних швидкостей краплин різних розмірів обумовлює їх зближення і збільшує вірогідність зіткнення. В основі механізму турбулентної дифузії лежить припущення про повне захоплення краплин турбулентними пульсаціями того масштабу, який відіграє основну

роль у механізмі зближення краплин. Хаотичний рух краплин під дією турбулентних пульсацій схожий з явищем дифузії і може бути охарактеризований турбулентним коефіцієнтом дифузії.

При інерційному механізмі коагуляції в турбулентному потоці, число зустрічей  $K$  краплі радіусом  $R_1$  з краплями радіусом  $R_2$  в одиницю часу  $t$  визначається залежністю [21]:

$$K = \pi(R_1 + R_2)^2 (R_1^2 - R_2^2) \frac{\rho_L \epsilon_0^{3/4}}{\rho_G \nu_G^{5/4}} n_1, \quad (10)$$

де  $\nu_G$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості суцільної фази,  $m^2/s$ ;  $n_1$  - число крапель радіусом  $R_1$  в одиниці об'єму.

Швидкість коагуляції краплин можна наближено оцінити з урахуванням залежності за рівнянням балансу числа краплин  $n$ , при цьому при підрахунку числа зіткнень взаємодія однакових краплин враховується двічі:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{1}{2} \pi R_n^4 \frac{\rho_L w^{9/4}}{\rho_G \nu_G^{5/4} d_e^{3/4}} n^2, \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{R_n}{R_n^0} \right) = \frac{C_w}{8} \left( \frac{R_n}{R_n^0} \right)^2 R_n^0 \frac{\rho_L w^{9/4}}{\rho_G \nu_G^{5/4} d_e^{3/4}}, \quad (12)$$

де  $w$  – швидкість краплі,  $m/s$ ;  $R_n^0$  - початковий радіус крапель,  $m$ .

Процес коагуляції краплин може значно збільшитись у часі, оскільки вказані вище залежності для визначення швидкості коагуляції краплин за інерційним механізмом не враховують розподіл краплин за розмірами, а також гідродинамічний опір руху краплин та сили міжмолекулярної взаємодії. У момент наближення краплин на відстань, меншу у порівнянні з їх розмірами, відбувається їх коагуляція під дією молекулярних сил Ван-дер-Ваальса. При наближенні краплин, радіус яких менше внутрішнього масштабу турбулентності, істотними є сили в'язкого опору, оскільки пульсації, які менше

або дорівнюють масштабу турбулентності, мають в'язкий характер. Зі зменшенням відстані між поверхнями краплин сила в'язкого опору збільшується.

Отже, розглянута фізична модель інерційного механізму коагуляції справедлива для взаємодії полідисперсних краплин. Для краплин порівняно однакових розмірів основним механізмом коагуляції є турбулентна дифузія [21]. Для з'ясування, які пульсації можуть змусити зблизитися краплі радіусами  $R_1$  та  $R_2$  пропонується розглянути два граничних випадки (без урахування опору суцільної фази) [21]:

$$R_2 \ll R_1, \quad (13)$$

$$R_2 \approx R_1. \quad (14)$$

У першому випадку зблизитися краплі змусять турбулентні пульсації  $\lambda$  масштабу

$$\lambda \approx L - R_1, \quad (15)$$

а в другому турбулентні пульсації

$$\lambda \approx L, \quad (16)$$

де  $L$  - відстань між центрами краплин радіусами  $R_1$  та  $R_2$ , м.

Використовуючи граничні співвідношення (13)-(16), а також умову симетрії

$$\lambda(L, R_1, R_2) = \lambda(L, R_2, R_1), \quad (17)$$

отримаємо залежність для оцінки масштабу турбулентних пульсацій  $\lambda$ , які можуть зблизити краплі радіусами  $R_1$  та  $R_2$  [21]:

$$\lambda \approx L - R_1 - R_2 + \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2)}{R_1^2 + R_2^2 - R_1 R_2}. \quad (18)$$

Частота зіткнень краплин радіусом  $R_2$  з краплями радіусом  $R_1$  дорівнює дифузійному потоку  $J_t$ , що визначається з розв'язання стаціонарного рівняння дифузії, яке в сферично симетричному випадку має вигляд [21]:

$$\frac{1}{L^2} \frac{d}{dr} \left( L^2 D_t \frac{dn_2}{dL} \right) = 0, \quad (19)$$

де  $D_t$  - коефіцієнт турбулентної дифузії (без урахування стисненості руху краплин),  $m^2/c$ [21].

$$D_{to} = \frac{\mu_G}{\rho_G \lambda_0^2} \lambda^2, \quad (20)$$

де  $\mu_G$  - коефіцієнт динамічної в'язкості газового потоку, Па·с;  $\lambda_0$  – внутрішній масштаб турбулентності.

$$\lambda_0 = \frac{d_e}{Re^{3/4}}, \quad (21)$$

Граничними умовами для розв'язання рівняння (19) [21] є умови миттєвого поглинання краплею радіусом  $R_1$  краплин радіусом  $R_2$  при їх торканні

$$n_2 = 0 \text{ при } L = R_1 + R_2, \quad (22)$$

та умови постійності концентрації краплин радіусом  $R_2$ , віддалено від краплі радіусом  $R_1$

$$n_2 = n_{20} \text{ при } L \rightarrow \infty, \quad (23)$$

$$J_t = 4\pi \left( L^2 D_t \frac{dn_2}{dL} \right)_{L=R_1+R_2} = 4\pi \left( \int_{R_1+R_2}^{\infty} \frac{dL}{L^2 D_t(L)} \right), \quad (24)$$

Для краплин однакового розміру ( $R_1=R_2$ ):

$$J_t = 96\pi n_{20} R_2^3 \left( \frac{w^3}{v_G d_e} \right)^{1/2}. \quad (25)$$

Аналізуючи вищевказані механізми коагуляції можна стверджувати, що адекватні моделі, які б комплексно враховували сили гідродинамічної та міжмолекулярної взаємодії краплин, гідродинамічний опір руху краплин, полідисперсність потоку та зміну розподілу краплин за розмірами за рахунок процесів коагуляції і подрібнення з урахуванням осадження та унесення краплин на межі розрахункової області руху газорідного потоку (на стінці каналу), на жаль відсутні [22]-[24].

Утворення газоконденсатних систем можливе за рахунок зміни температури та тиску газу під час проходження через пристрої (дросель, теплообмінник, турбодетандер), що розміщуються перед сепаратором. Так наприклад, за дроселюючим пристроєм, внаслідок процесу адіабатичного розширення газової суміші, за якого одночасно збільшується об'єм суміші, понижується тиск пари та температура, відбувається утворення рідкої фази у газі. Тиск насиченої пари знижується зі зменшенням температури та призводить до збільшення пересичення пари [25].

Ступінь пересичення ( $S$ ) - відношення тиску пари в газі  $p$  до тиску насиченої пари  $p_{\infty}$  над плоскою поверхнею тієї ж рідини [21]:

$$S = \frac{p}{p_{\infty}}, \quad p_{\infty} = \exp\left(C - \frac{0,12M_L r}{T}\right), \quad (26)$$

де  $T$  – абсолютна температура, К;  $C$  – постійна;  $M_L$  – молекулярна маса пари,

що конденсується, кг/кмоль;  $r$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

Гомогенна конденсація (утворення крапель в результаті конденсації пари на зародках) складається з наступних етапів: утворення пересиченої пари, створення зародків, конденсації пари на поверхні зародків та їх зростання. Гетерогенна конденсації (утворення крапель відбувається на ядрах конденсації) проходить за наявності ядер конденсації. За гомогенної конденсації у газовій суміші під тиском, більшим ніж тиск насичення, з'являються та поступово укрупнюються зародки рідкої фази. Необхідною умовою утворення конденсованої фази є наявність таких процесів, за яких підвищується пересичення суміші.

Конденсація пари починається лише при критичному пересиченні  $S_{кр}$  [21]:

$$S_{кр} = \exp\left(1,74 \cdot 10^7 \frac{M_L}{p_L} \left(\frac{\sigma}{T}\right)^{3/2}\right). \quad (27)$$

Швидкість процесу конденсації на поверхні краплі визначається дифузією пари до цієї поверхні, тому за великих значень швидкості пересичення швидкість дифузії може стати недостатньою для вирівнювання тиску пари в усьому об'ємі. При цьому тиск пари у поверхні крапель може сильно відрізнятись від тиску пари в об'ємі.

Таким чином, в залежності від співвідношення між швидкістю пересичення та чисельною концентрацією крапель, можливі два випадки: швидкість дифузії пари незначна, пересичення перевищує критичне значення та відбувається інтенсивне зародкоутворення; швидкість дифузії пари до поверхні краплі значна, і пересичення не досягає критичного значення, відповідно зародки не утворюються.

## 2.2 Механіка та динаміка турбулентних газодисперсних потоків

Гідродинамічні процеси в двофазних турбулентних газодисперсних потоках в сепараційному обладнанні складні та представляють суттєві труднощі при побудові їх математичних моделей, які б враховували комплекс фізичних явищ міжфазного обміну масою, імпульсом та енергією, специфіку конкретних процесів та сепараційних пристроїв. Адекватні теорії руху двофазних газодисперсних потоків, які б враховували полідисперсний склад дисперсної фази та її концентрацію, взаємодію часток між собою та з сепараційними елементами, турбулентні пульсації середовища, процеси подрібнення та коагуляції, фазові переходи відсутні [26]. Причому виникають труднощі як фізичного, так і математичного характеру. Одночасно постає протиріччя між необхідністю детального опису процесів, які відбуваються з окремою часткою (краплею), та доцільністю їх врахування в загальній динаміці газодисперсної суміші, що вимагає прийняття додаткових гіпотез та спрощуючих припущень при побудованні моделей динаміки і масообміну окремої частки та газодинаміки суміші в цілому. Це пояснюється тим, що дослідження взаємодії суцільної та дисперсної фаз з урахуванням процесів, що відбуваються в краплі та на її поверхні (тепломасообмін, конденсація або випаровування, внутрішня циркуляція і т.д.) потребують складних методів газодинаміки, термодинаміки та фізико-хімічної кінетики. В додаток, розглядаючи двофазні (багатофазні) багатокомпонентні системи з великою кількістю зв'язків та взаємодії різної природи, більша частина з яких має вірогідно-стохастичний характер, їх математичний опис виявляється значно ускладненим у порівнянні з моделями однофазних потоків або низькоінтенсивних (ламінарних) гідродинамічних режимів [26].

Розглядаючи механіку газодисперсних систем слід відзначити, що сили взаємодії між краплинами у більшості випадків значно менші зовнішніх сил та



опору середовища, тому ними можна знехтувати і розглядати рух часток незалежно одна від одної. Отже, дослідження механіки газодисперсних систем може бути спрощене до вивчення руху окремих часток під дією різних зовнішніх сил у суцільному середовищі, а потім за необхідності вводиться поправка на взаємодію між частками [21], [26].

Основні найпростіші випадки руху часток з розділу механіки (динаміки) газодисперсних систем розглянуті в фундаментальних роботах [26]:

- прямолінійний рівномірний рух дисперсних часток (Стоксове осадження);
- прямолінійний нерівномірний рух дисперсних часток (при малих та великих числах  $Re$ );
- криволінійний рух дисперсних часток (осадження часток в ламінарних потоках; інерційне осадження у пористих середовищах);
- броунівський рух та дифузія в дисперсних сумішах (дифузійне осадження в нерухомому середовищі, дифузійне осадження в ламінарному потоці);
- конвективна та турбулентна дифузія часток в газорідних сумішах (осадження при конвекції та перемішуванні, дифузія та осадження часток в турбулентному потоці);
- пульсаційний рух та турбулентна міграція часток;
- взаємодія часток в турбулентному потоці (коагуляція та подрібнення).

Розглядаючи рух суцільної фази в криволінійних сепараційних каналах та порожнинах фільтруючих елементів інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв слід зазначити, що теорія руху рідини (газу) базується на двох основних рівняннях гідродинаміки: рівнянні нерозривності і динамічному рівнянні руху рідини (рівняння Нав'є-Стокса) [15], [16], [27] - [29].

Рівняння нерозривності потоку відображає закон збереження маси, згідно до якого зміна маси визначеного елементарного об'єму газів компенсується відповідною зміною його густини [15], [16]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_z v_z)}{\partial z} = 0, \quad (28)$$

де  $\rho$  – густина середовища (газів), кг/м<sup>3</sup>;  $t$  - час, с;  $v$  – швидкість потоку, м/с;  $x$ ,  $y$  та  $z$  – напрямки осей координат.

Рівняння Нав'є-Стокса визначає систему сил, що діють у рідині (газах), та за напрямками осей координат для елементарного об'єму рідини може бути представлено у вигляді [15], [16]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p_x}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) = \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right); \\ -\frac{\partial p_y}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) = \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right); \\ -\rho g - \frac{\partial p_z}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) = \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \end{cases} \quad (29)$$

де  $p$  – тиск у розглядаємій крапці потоку, Н/м<sup>2</sup>;  $\mu$  – динамічна в'язкість середовища (газів), Па·с.

Розв'язок вказаної системи диференціальних рівнянь в частинних похідних представляє одне з найважливіших завдань гідродинаміки. Диференціальні рівняння, виведені Бассе, Бусінеском, Осеемом та узагальнені Ченом [26], описують найпростіші випадки руху дисперсних часток з потоком суцільної фази, які у випадку одномірного нерівномірного руху окремо взятої кулеподібної частки під впливом різних зовнішніх зусиль, що на неї діють в турбулентному потоці, представляються у вигляді [30]:

$$\begin{aligned} \frac{4\pi}{3} R^3 \rho_L \frac{dw}{dt} = 6\pi \mu_G R (v - w) - \frac{4}{3} R^3 (\rho_L - \rho_G) \frac{dw}{dt} - \\ - \frac{2\pi}{3} R^3 \rho_G \left( \frac{dv}{dt} - \frac{dw}{dt} \right) + 6R^2 \sqrt{\pi \rho_G \mu_G} \int_{t_0}^t \left( \frac{dv}{dt'} - \frac{dw}{dt'} \right) \frac{dt'}{\sqrt{t - t'}} + F', \end{aligned} \quad (30)$$

де  $t_0, t, t'$  – початковий і поточний момент часу та тривалість руху частки до поточного моменту часу відповідно,  $c$ ;  $F$  – сума зовнішніх сил, що діють на частку,  $H$ .

При дослідженні взаємодії гідродинаміки потоку та його взаємодії зі стінками каналу, в вібраційно-інерційних модульних сепараційних пристроях необхідно вирішувати складну задачу міждисциплінарного аналізу - аерогідропружності. Оскільки, постановка та характер досліджуваних проблем, які відносяться до механіки деформівного тіла, з однієї сторони, та рідини і газу з іншої мають різко виражені особливості. Тому розв'язання задачі аерогідропружності, що включає «зв'язані» рівняння різних типів, складає певні труднощі.

Взагалі деформація елементів, що обтікаються потоком рідини або газу, на протязі довгого часу викликає інтерес та є об'єктом дослідження інженерів. Особливо гостро дані проблеми постають перед авіаційною промисловістю, а саме дослідження таких явищ, як флатер, бафтинг та дивергенція.

Існує багато аеропружних явищ, але найбільший інтерес представляють наступні два явища, що пов'язані з коливальним рухом, коли суттєву роль грають як пружні та аеродинамічні сили, так і сили інерції.

Флатер - явище динамічної нестійкості пружного тіла в потоці рідини у випадку, коли сили, що викликають це явище, виникають виключно в наслідок прогину пружної конструкції по відношенню до свого нездеформованого стану. Якщо поведінка системи лінійна, то її стійкість по відношенню до нескінченно малих збурень повністю характеризують схильність системи до флатеру. В цьому випадку питання про походження сили, що викликає збурений рух, не грає ролі. Якщо з іншої сторони система не лінійна, так що її динамічна стійкість залежить від величини пружної деформації, то ясно, що походження збурюючої сили і її величина грають велику роль. Явище збільшення величини сили зі збільшенням амплітуди руху, що викликані цією силою, називають само збуренням.

Бафтинг - пружні коливання конструкції під дією сил, що в малій степені залежить від руху тіла. Такі сили (наприклад, змінні сили, що супроводжуються появою вихрової доріжки за погону обтічним тілом) можуть являться прямим наслідком того, що тіло знаходиться в потоці рідини. Проте до тих пір, поки ці сили не залежать від виникаючих при цьому пружних деформацій, такі явища будуть розглядатись як вимушені коливання.

Основоположними були наступні багаточисельні натурні та лабораторні спостереження за поведінкою кругових циліндрів, лопатей крильчаток та тонких лопаток турбомашин підтвердили існування для цих тіл з різними профілями явища коливання. Пензін [31], Озкер [31] та Уівер [31] розглядають коливання циліндрів як самовироджені, тоді як Бісплінгхофф [31] та інші трактують їх як вимушені коливання з резонансною частотою конструкції. Лабораторні дослідження Гонгуера [32], Кривцова [32] та Хескеседа [32] показали, що загальний характер збуджуваних потоком рідини коливань пружних тіл у формі лопатей підкоряється залежностям, що зображені на рисунку 2.1. Тут показані криві залежності частоти і амплітуди коливань від швидкості вільного потоку. Іппен та інші [33], які проводили в Массачусетському технологічному університеті перші дослідження вихрових слідів за плоскими пластинами, вказали, що при зростанні швидкості вільного потоку від нуля є три повторюваних діапазони з різними характеристиками гідропружної поведінки:

I. Область постійного числа Струхаля і зростаючої частоти.

II. Область великих амплітуд і практично постійної частоти в межах широкого діапазону швидкостей.

III. Область різкого зниження амплітуд та зростання частоти до значення, відповідного числу Струхаля.

Цей взаємний вплив частоти та амплітуди коливань біля резонансу наштовхує на думку про наявність згаданого вище самозбурення. Тобес [34] та Мерріс [34] висловили припущення про існуванні механізму самозбурення, що грає роль негативного демпфування.

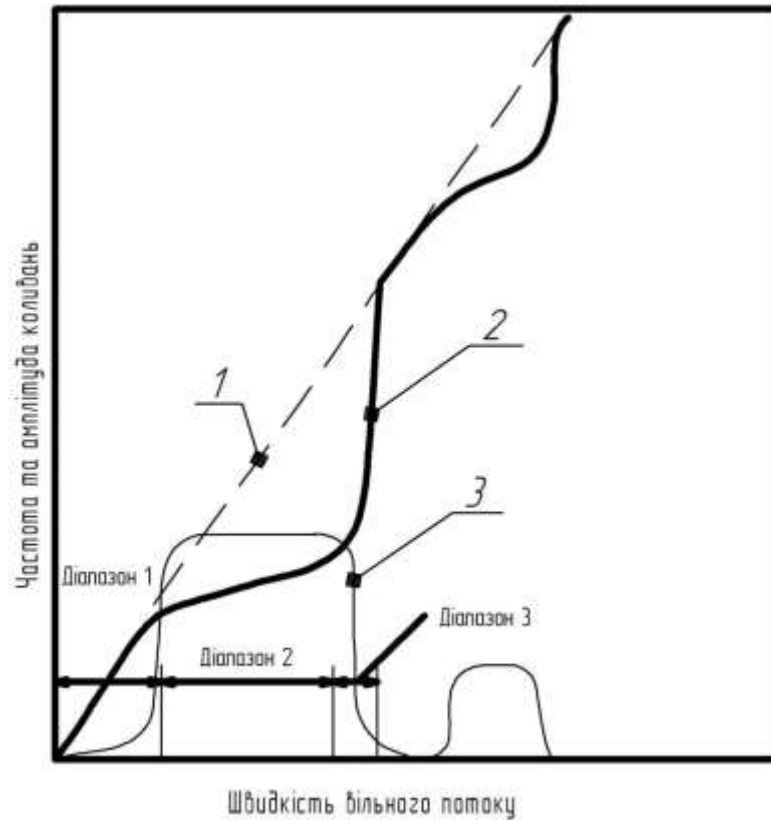


Рисунок 2.1 – Якісний характер поведінки при коливаннях

1 – постійні значення числа Струхаля, які відповідають нерухомому тілу; 2 – залежність частоти від швидкості; 3 – залежність амплітуди від швидкості

Дослідження коливань елементів, кількісний опис механізмів збурення та виявлення адекватних розрахункових критеріїв, використання яких допомагає запобігти збурених потоком коливань з великими амплітудами приведено в роботі Іглсона та Дейлі [34]. В роботі [34] введені наступні спрощення та допущення:

- 1) пластина має безкінечно малу товщину з довжиною хорди  $2b$ ;
- 2) система має одну ступінь вільності, яка відповідає крутильним коливанням;
- 3) положення осі може обиратись довільно, покладемо що дана вісь співпадає з передньою кромкою пластини;
- 4) середній кут атаки пластини рівний нулю;
- 5) покладемо систему лінійною.

На рисунку 2.2 зображена схема системи.

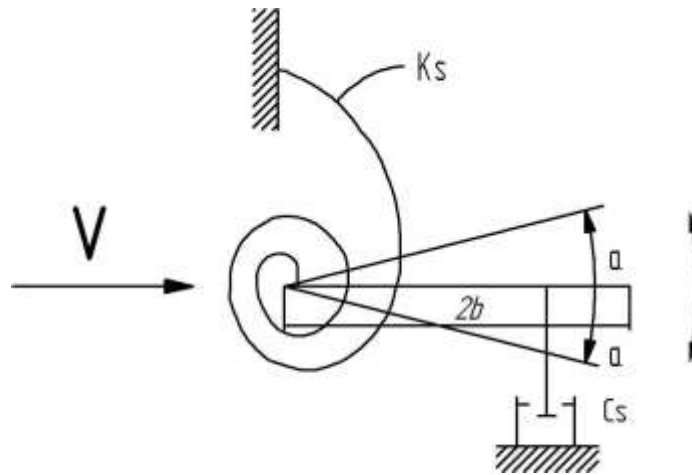


Рисунок 2.2. – Схематичне представлення коливальної системи

Рівняння руху пластинки в такому разі записується у вигляді

$$I_S \ddot{\alpha} + c_S \dot{\alpha} + K_S \alpha = M_t \quad (31)$$

де  $\alpha$  – кутове переміщення пластинки, рад;  $I_S$  – момент інерції пластинки відносно осі обертання;  $c_S$  – коефіцієнт тертя в системі;  $K_S$  – коефіцієнт жорсткості пружини;  $M_t$  – повний момент гідродинамічних сил, що діють на пластинку, покладемо, що його можна представити у вигляді трьох складових.

Покладемо, що момент гідродинамічних сил  $M_t$  можна представити у вигляді суми трьох складових:

$$M_t = M_p + M_v + M_f, \quad (32)$$

де  $M_p$  – момент, який визначають по теорії потенційної течії і виникає в наслідок коливань пластинки в ідеальній рідині;  $M_v$  – момент сил в'язкості (додатковий (демпфуючий) момент, який виникає в наслідок коливань пластинки в реальній рідині);  $M_f$  – момент, що викликає рух пластинки.

Розглянемо кожен з трьох моментів окремо:

1) Теодерсеном було запропоновано теорію потенціального обтікання, по якій можна визначити підйомну силу і момент, що діють на пласку нескінченно тонку пластину при довільних коливаннях з малою амплітудою в однорідному

поточі нестискуваної рідини. Не дивлячись на реалістичне обмеження, що відповідає вимозі про нехтування малої товщини несучих поверхонь, і на пов'язані з лінеаризацією вимогу про малість амплітуд руху, це дослідження витримало випробування часом та практикою і навіть в наш час становить основу для розрахунку динамічної стійкості в аеродинаміці нестискуваної рідини. Бісплінгрофф показав, що для крутильних коливань відносно передньої кромки цей момент дорівнює:

$$M_p = -1.125\pi\rho b^4 H\ddot{\alpha} - 1.5\pi\rho b^3 HV[1 + C(K)]\dot{\alpha} - \pi\rho b^2 HV^2 C(K)\alpha, \quad (33)$$

де  $H$  – ширина пластинки;  $V$  – швидкість вільного потоку в навколишньому середовищі;  $C(K) = F(K) - iG(K)$  – функція Теодерсена (рисунок 2.3) ( $K$  – приведена частота);  $f_\alpha$  – частота коливань пластинки, цикл/с;  $\rho$  – густина рідини.

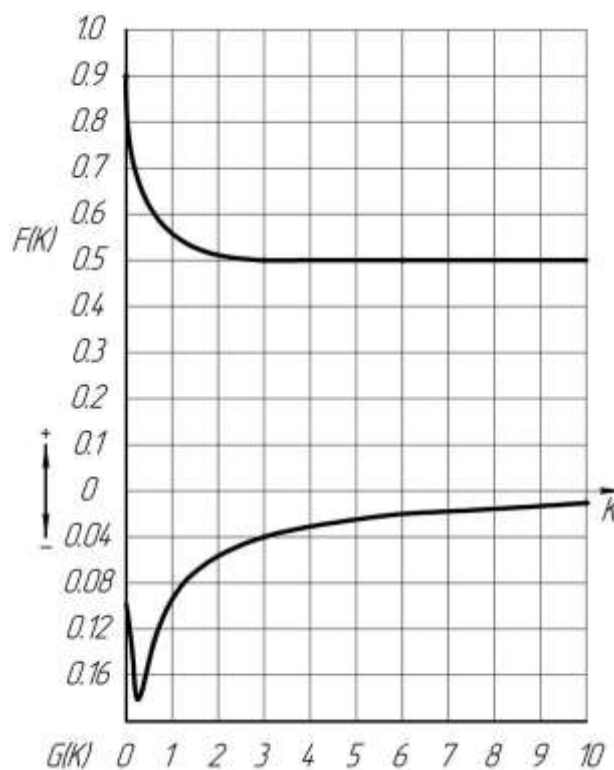


Рисунок 2.3 – Функція Теодерсена

Перший член у виразі  $M_p$  це не циркуляційний член (він не залежить від  $V$ ), який згідно з трактуванням [34], відповідає віртуальній інерції. Другий член

враховує демпфування і відповідає вкладу в підйомну силу завихреності, що утворюється за рахунок руху пластинки. Третій член при  $K=0$  співпадає з відомим виразом Круту для підйомної сили, що діє на нерухомий тонкий профіль. Таким чином, можна вважати, що цей член співпадає з дією «гідродинамічної пружини».

2) Використовуючи далі припущення про лінійність, можна записати вираз для демфуючого моменту сил в'язкості у вигляді

$$M_v = -c_v \dot{\alpha}, \quad (34)$$

де  $c_v$  – коефіцієнт в'язкого тертя.  $M_f$  – момент, що викликає рух пластинки.

3) Момент збурюючої сили пов'язаний з наявністю флуктацій розподілення тиску на пластині. Ці флуктації виникають внаслідок відриву потоку на задній кромці і тому суттєво визначаються кінцевою товщиною пластини. Покладаючи течію двомірною, можна записати:

$$M_f = m_f \frac{1}{2} \rho H (2b)^2 V^2, \quad (35)$$

де  $m_f$  – безрозмірний коефіцієнт моменту, для випадку періодичних флуктуацій тиску, відповідний групуванню вихрів на дискретних частотах;

$$m_f = m_{f0} e^{i(2\pi f_v t + \phi)}, \quad (36)$$

де  $f_v$  – частота зриву вихрів з однієї сторони пластини;  $t$  – час;  $\phi$  – фазовий кут між  $M_f$  та  $\alpha$ .

Для визначення невідомих коефіцієнтів виразів 31 – 36, в роботі [34], приведені експериментальні дані. Експерименти проводились на установці розімкнутого типу з закритою гідротрубою, робоча ділянка якої мала прямокутний поперечний переріз. Досліджувались пластинки виготовлені з



алюмінію, з постійним значенням відношення хорди до товщини, рівним восьми. Випробовувані пластинки встановлювались на шарикопідшипниках у вертикальному положенні з нульовим кутом атаки таким чином, що б вісь обертання співпадала з віссю напівциліндричної передньої кромки. Перемінне пружне обмеження руху забезпечувалось змінними трубчатими торсіонними пружинами. Останні кріпились до кінця осі, що виступав за границі верхнього шарикопідшипника. На пружині встановлювались тензодатчики. По її електричним сигналам можна визначити амплітуду та частоту коливань. Всі ущільнення були виконані зовнішніми по відношенню до пружини та підшипника.

При вимірюванні швидкості вільного потоку використовувались в якості витратоміра ділянка труби, що звужується. Флуктація повного напору вимірювалась на початковій ділянці вихрової доріжки (тільки вздовж середньої лінії робочого перерізу) за допомогою п'єзоелектричного керамічного датчика, який встановлювався на рухомому зонді. Середньоквадратичні значення визначались за допомогою вольтметра.

Серйозною працею по дослідженню взаємодії газорідного потоку та гнучких елементів являється монографія Річарда Грібоса [35]. Особлива увага в цій роботі відведена коливанню труб викликаних потоком, оскільки кожухотрубні теплообмінники, основним компонентом, яких є пучок труб, що омиваються зовні, широко поширені. Саме руйнування цих пристроїв і спонукало інтерес до їх дослідження, підвищення надійності розрахунків.

В роботі [35] описана взаємодія потоку та труб, а саме розглядаються методика знаходження власних частот та форм коливань, реальної функції прогину, якщо коливання прямої труби викликані внутрішнім потоком, як стаціонарним так і змінним в часі; якщо коливання криволінійної труби викликано потоком, що плавно змінюється; коливання пучка труб викликане потоком, який направлений поперечно до осі труб; коливання вилиті турбулентним потоком. Також в даній роботі досліджуються процеси коливання, як стохастичні.

### 2.3 Теоретичні і практичні проблеми механіки суцільних середовищ та процесів сепарації газодисперсних систем

Як видно з підрозділу 2.1 та 2.2 рівняння, що описують рух гетерогенних сумішей процеси їх розділення в комбінація з процесами, що їх супроводжують є достатньо складними, тому отриману систему рівнянь вирішити без введення спрощень та допущень найчастіше не можливо [36]-[39]. В зв'язку з цим широко впроваджено в кінці XX – початку XXI століття у інженерну практику інформаційних технологій проектування та комп'ютерного моделювання на основі фізичних, математичних та чисельних методів обчислювальної гідродинаміки (Computational Fluid Dynamics, CFD) [40] - [43].

Слід відмітити, що для вирішення задач динаміки рідини можна використовувати наступні модулі ANSYS: FLUENT Flow та CFX. В найбільш загальному випадку обидва модулі базуються на основних залежностях динаміки рідини [40] - [43], такі як:

1) рівняння нерозривності (збереження маси)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (37)$$

де  $\rho$  - густина газорідинного потоку;  $\vec{V}$  – вектор швидкості потоку;

2) рівняння кількості руху (збереження імпульсу)

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \vec{\tau} + \vec{S}_M, \quad (38)$$

де  $\vec{S}_M$  - «джерело» для імпульсу;  $\vec{\tau}$  - тензор напружень, який має вигляд

$$\vec{\tau} = \mu \left[ \nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{V} \right], \quad (39)$$

де  $\delta$  – дельта функція Кронекера

3) рівняння енергії (збереження енергії)

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{h}_{\text{сум}})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \mathbf{h}_{\text{сум}}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{V} \cdot \vec{\tau}) + \vec{V} \cdot \vec{S}_M + \vec{S}_E, \quad (40)$$

де  $\vec{S}_E$  - «джерело» для енергії;  $T$  – температура;  $p$  – тиск;  $h_{\text{сум}}$  – сумарна ентальпія, що визначається формулою

$$h_{\text{сум}} = h_{\text{стат}} + \frac{\vec{V}^2}{2}, \quad (41)$$

де  $h_{\text{стат}}$  – статична ентальпія  $h_{\text{стат}} = h_{\text{стат}}(T; p)$ .

4) рівняння стану  $\rho = \rho(T; p)$ .

Обидва модулі засновані на методі скінченних об'ємів (МСО). Це числовий метод інтегрування системи диференціальних рівнянь в частинних похідних.

Першим кроком методу контрольного об'єму є інтегрування основних рівнянь для кожного контрольного об'єму. Визначальні рівняння можна записати у вигляді

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi \mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_\phi, \quad (42)$$

де  $\phi$  - властивість рідини і  $\Gamma$  - коефіцієнт дифузії.

Якщо рівняння (42) проінтегрувати по контрольному об'єму, то загальне рівняння переносу буде мати вигляд

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \text{div}(\rho\phi u) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int_{CV} S_\phi dV. \quad (43)$$

Використавши властивість дивергенції за теоремою Гаусса, отримаємо

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{CV} (\rho\phi) dV \right) + \int_A n \cdot (\rho\phi u) dA = \int_A n \cdot (\Gamma \text{grad}\phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV. \quad (44)$$

Для стаціонарного потоку нестационарним членом рівняння (44) можна нехтувати:

$$\int_A n \cdot (\rho\phi u) dA = \int_A n \cdot (\Gamma \text{grad}\phi) dA + \int_{CV} S_\phi dV. \quad (45)$$

Для нестационарного процесу рівняння (44) можна проінтегрувати за часом і отримати загальне рівняння переносу у вигляді

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{CV} (\rho\phi) dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A n \cdot (\rho\phi u) dA dt = \int_{\Delta t} \int_A n \cdot (\Gamma_\phi \text{grad}\phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{CV} S_\phi dV dt. \quad (46)$$

На зважаючи на схожість модулів все ж таки присутній ряд відмінностей:

- вирішувач ANSYS CFX використовує числові значення у вузлах решітки для дискретизації області, ANSYS Fluent – числові значення в центрах комірок, які входять до решітки;

- в ANSYS Fluent має найбільші можливості для моделювання багатозфазних потоків;

- для вирішення міждисциплінарних задач можливе використання System Coupling в ANSYS Fluent, на відміну від CFX.

Саме використання System Coupling дозволяє проводити розрахунки у випадку вібраційно інерційної сепарації, оскільки саме цей модуль програмного

комплексу ANSYS Workbench є найбільш універсальним для проведення міждисциплінарного аналізу [17].

Проводити розрахунки процесів диспергування та сепарації з подальшою розробкою відповідного розпилювального та сепараційного обладнання, яке працює в умовах високо інтенсивних гідродинамічних режимів, можливо лише маючи ґрунтовні уявлення про механіку рідини і газу взагалі [15], [16], [44], [45] та, зокрема, гідродинаміку двофазних потоків (механіку дисперсних систем), взаємодію часток (краплин) одна з одною та плівкою рідини, закономірностях тепломасообмінних процесів, що супроводжують основний процес розділення (конденсація, випаровування, абсорбція, ректифікація і т.п.). Одночасно, як вже було зазначено вище, процеси сепарації фаз мають місце та є основними або супутніми (вторинними) при реалізації більшості механічних, гідромеханічних та тепломасообмінних процесів в основному технологічному обладнанні технологічних ліній і комплексів хімічних, нафтогазопереробних, харчових виробництв та багатьох інших галузей промисловості [1], [3].

Теоретичні і практичні проблеми механіки суцільних середовищ та сепарації дисперсних систем розглядали в своїх фундаментальних роботах Вальдберг А.Ю., Медніков Є.П., Сінайський Е.Г., Сугак Є.В., та інші [14], [16], [21], [26], [30]. Одночасно слід відмітити, що дисперсним системам та, зокрема, механіці дисперсних систем, враховуючи її впливове практичне значення, продовжує приділятися суттєва увага і на початку 2000-х років, з яких у історії інженерної діяльності починається епоха вирішення актуальних проблем підвищення рівня енергоефективності, ресурсозбереження та екологічної безпеки технічних систем у галузі процесів та обладнання хімічної технології [2], [44]-[47]. Але у більшості випадків відповідні матеріали розкидані по численних монографіях та публікаціях у періодичних виданнях за матеріалами дисертаційних досліджень, які відносяться до різних галузей науки і техніки, мають вузько прикладний характер та тільки в окремих випадках представляють зацікавленість для теорії [14], [48], [49]. Такі роботи важко використовувати для перевірки наукових результатів та висновків, а також для

знаходження нових теоретичних закономірностей, тому що розрахунки швидкості турбулентного осадження в трубах та каналах пропонується здійснювати за допомогою чисто емпіричних залежностей, які витікають з результатів експериментальних досліджень та чисельних моделювань окремих дослідників [50]-[53].

Представляє окремі труднощі вивчення закономірностей руху суцільної (дисперсійне середовище) та дисперсної (частки) фаз в умовах інтенсивних гідродинамічних режимів, що обумовлено підвищеними вимогами до технічних характеристик та експлуатаційних показників обладнання (продуктивності, ефективності і т.д.). Турбулентний режим руху неоднорідних гетерогенних дисперсних систем відрізняється від ламінарного режиму руху наявністю флуктуацій, нерегулярних пульсацій випадкового хаотичного характеру з моментальною зміною напрямку та значення істинних (локальних) швидкостей і, як наслідок, інтенсивним перемішуванням елементарних об'ємів суцільної (несучої) фази між собою [15], [16], [21], [30]. Як відомо, при цьому профіль розподілу фіктивних (осереднених за часом) швидкостей у поперечному перетині потоку більш рівномірний, але в пристінкових шарах спостерігається різке зменшення значення швидкості руху [15], [16]. Високодисперсні частки, які мають незначні розміри, порівняно з масштабом пульсацій, та масу інерційно захоплюються з деяким відставанням по фазі та амплітуді в пульсаційний турбулентний рух суцільної фази та разом з нею здійснюють інтенсивне дифузійне пересування по потоку. В таких випадках, при описі механіки дисперсних систем пропонується розглядати рух дисперсної фази з двох складових, що пояснюється градієнтом та зсувом осередненої і пульсаційної складових швидкості суцільної (несучої) фази в ядрі потоку та пристінкових шарах:

- рух дисперсних часток повздовж та відносно потоку суцільної фази зі швидкістю, наближеною до значення осередненої швидкості руху суцільної фази (конвективна та турбулентна дифузія часток) [30];

- міграція дисперсних часток в поперечному перетині до руху потоку

суцільної фази зі швидкістю, наближеною до значення швидкості турбулентних пульсацій суцільної фази (турбулентна міграція часток) [30].

Таким чином, всі ці розглянуті фізичні явища суттєво змінюють траєкторії руху зважених часток в двофазних потоках, роблять їх більш складними в порівнянні з відомими моделями прямолінійного (рівномірного і нерівномірного) та криволінійного руху дисперсних часток аеродисперсних систем при малих числах Рейнольдса  $Re$  в процесах їх гравітаційного та інерційного осадження [30]. З цих же причин розподіл та концентрація дисперсної фази в поперечному перетині високотурбулізованого двофазного потоку суттєво відрізняється від аналогічного розподілу в ламінарному потоці при гравітаційно-інерційному осадженні [21]. Іншим парадоксальним явищем турбулентності є факт різкого підвищення інтенсивності осадження дисперсних часток з високотурбулізованого потоку замість унесення їх зі стінок труб та каналів, що пояснюється саме міграційною моделлю, при цьому швидкість осадження дисперсних часток на граничних повздовжніх стінках каналів зростає зі збільшенням швидкості руху потоку суцільної фази, що свідчить про інерційну природу явища, яке в механіці дисперсних систем отримало назву турбулентного (турбулентно-інерційного) осадження [30].

Підсумовуючи вищесказане, необхідно відмітити, що для розроблення інженерних методик розрахунку нових типів сепараційних модулів необхідно виявляти основні керуючі фактори у кожному випадку та враховувати взаємодію з іншими модулями, що входять в сепараційний апарат.

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано доцільність використання модульних сепараційних пристроїв для розділення двофазних багатокомпонентних сумішей, визначено основні способи підвищення енергоефективності і ступеня розділення шляхом створення інерційно-фільтруючих та динамічно-регульованих модульних сепараційних пристроїв.
2. Розширено уявлення про теоретичні основи процесів сепарації дисперсних систем та розв'язання задачі аерогідропружності в апаратах з інтенсивними гідродинамічними режимами та динамічно-регульованими пружними відбійними сепараційними елементами.
3. Розроблено конструкторсько-технологічну класифікацію уніфікованих модулів сепараційних пристроїв на основі конструкторсько-технологічних характеристик, систематизовано варіанти компоновки багатофункціонального сепараційного обладнання.
4. Отримані у роботі результати можуть бути використані для розробки нових способів газодинамічної, інерційно-фільтруючої, вібраційно-інерційної сепарації та нових конструкцій відповідних модульних сепараційних пристроїв, а також у прикладних розробках, зокрема практичних рекомендацій до проектування та інженерних методик для розрахунку багатофункціонального сепараційного обладнання.



**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Perry R.H., Green D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook / R.H.Perry, D.W.Green (ed.). – [8th ed.]. – McGraw-Hill, 2007. – 2640 p.
2. Ляпощенко, О.О. Гідродинаміка інерційно-фільтруючих сепараційних пристроїв очищення природного газу: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / О.О.Ляпощенко. - Суми : СумДУ, 2006. - 152 с.
3. Василевский М.В. Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах / М.В.Василевский, Е.Г.Зыков. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 86 с.
4. Ляпощенко О. О. Теоретичні основи процесів інерційно-фільтруючої сепарації : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології / Олександр Олександрович Ляпощенко ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – 435 с. – Бібліографія: с. 296–345 (425 назв).
5. Пат. на корисну модель 82976 U Україна, МПК (2013.01) B01D45/00 B01D45/04 (2006.01). Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, А.В.Логвин, О.В.Настенко, Д.В. Пономаренко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201301444; заявл. 07.02.2013; опубл. 27.08.2013, бюл. №16.
6. Пат. на корисну модель 85952 U Україна, МПК B01D45/04 (2006.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, О.В.Настенко, О.А.Сердюк (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201306402; заявл. 23.05.2013; опубл. 10.12.2013, бюл. №23.
7. Пат. на корисну модель 88516 U Україна, МПК B01D45/04 (2006.01). Спосіб сепарації конденсацією / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, О.В.Настенко, О.А.Сердюк (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201309181; заявл. 22.07.2013; опубл. 25.03.2014, бюл. №6.

8. Пат. на корисну модель 98926 U Україна, МПК B01D45/04 (2006.01). Пристрій для вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / В.І.Склабінський, О.О.Ляпощенко, О.В.Настенко, Р.Ю.Усик (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201413067; заявл. 05.12.2014; опубл. 12.05.2015, бюл. №9.

9. Appliance of Inertial Gas-Dynamic Separation of Gas-Dispersion Flows in the Curvilinear Convergent-Divergent Channels for Compressor Equipment Reliability Improvement / O.O.Liaposhchenko, V.I.Sklabinskyi, V.L.Zavialov, I.V.Pavlenko, O.V.Nastenko, M.M.Demianenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - Vol.233. - 2017. DOI:10.1088/1757-899X/233/1/012025

10. Пат. на корисну модель №102445 U Україна, МПК B01D45/04 (2006.01). Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / О.О.Ляпощенко, І.В.Павленко, О.В.Настенко, Р.Ю.Усик, М.М.Дем'яненко (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. — № u201505124; заявл. 25.05.2015; опубл. 26.10.2015, бюл. №20.

11. Пат. 111039 U Україна, МПК (2016.01)B01D 45/00. Спосіб вловлювання високодисперсної краплинної рідини з газорідинного потоку / О.О. Ляпощенко, О.В. Настенко, І.В. Павленко [та ін.] (Україна); заявник та патентовласник Сумський держ. ун-т. - № u201605061; заявл. 06.05.2016; опубл. 25.10.2016, бюл. № 20

12. Оптимізаційне проектування багатофункціонального сепараційного нафтогазового обладнання / О.О. Ляпощенко, І.В. Павленко, О.В. Настенко [та ін.] // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2015) : матеріали I Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Дніпропетровськ, 3–5 листопада 2015 р.) : у 2-х ч. – Дніпропетровськ : Український державний хіміко-технологічний університет, – 2015. – Ч. 1, секція «Моделі та методи оптимізації». – С. 226–231.

13. Sklabinskiy V.I., Liaposhchenko O.O., Logvyn A.V., Mustafa Makki Al-Rammahi Hydrodynamics of inertial-filtering (IF) separate sections of gas-separating oil and gas equipment. - Journal of Missan researches. — 2012. — Vol.8. — №16. — P.207-226.

14. Sulzer Gas/Liquid Separation Technology. — Winterthur: Sulzer Chemtech, 2014.— 24 p.

15. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: Гидродинамика. В 10 т. / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. — Т.6. - 5-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 736 с.

16. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: Механика. В 10 т. / Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. — Т.1. - 5-е изд., стереот. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 224.

17. Ivanov V., Dehtiarov I., Pavlenko I. et al. Numerical Simulation of the System “Fixture – Workpiece” for Levers Machining. – The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2017. - Volume 91. - Issue 1. - P. 79–90, DOI:10.1007/s00170-016-9701-2.

18. Ляпощенко А.А., Яхненко С.М., Маренок В.М., Смирнов В.А. Компонентно-ориентированные интегрированные технологии автоматизированного проектирования в химическом машино- и аппаратостроении. - Автоматизированное проектирование в машиностроении. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – №2. – С.74-81.

19. Кусак Р. Сепарация жидкость-жидкость. Свежий взгляд на основные принципы в проектировании коагуляторов, применяемых в процессе переработки нефти / Р.Кусак // Нефтегазовые технологии. – 2009. - №10. – С.85-92.

20. Liaposhchenko O. Analysis of the conditions of phase equilibrium and influence of the united heat and mass transfer on the effectiveness of separation in the inertial-filtering separator / O.Liaposhchenko, O.Nastenko // Chemistry & Chemical Technology. – 2015. – Volume 9, number 1. – P. 125–130. DOI:10.23939/chcht09.01.125 WOS:000219796900019

21. Синайский Э.Г. Сепарация многофазных многокомпонентных систем / Э.Г.Синайский, Е.Я.Лапига, Ю.В.Зайцев. — М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. — 621 с.

22. Sklabinskyi V.I., Liaposhchenko O.O., Logvyn A.V., Mustafa Makki Al Rammahi Gas Flow Formation in the Inertial Filtering (IF) Gas Separators Curvilinear Channels. - Journal of Engineering. — 2014. — Vol.10. — №5. — P.160-169.

23. Ляпощенко А.А., Настенко О.В. Интегрированные технологии автоматизированного проектирования с динамическим моделированием работы сепарационного и теплообменного оборудования в составе промышленных установок и комплексов. - Прогрессивные технологии и процессы. — Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. — Т.1. — С.353-357.

24. Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Настенко О.В. Методика та стратегія оптимізаційних досліджень при динамічному моделюванні процесів інерційно-фільтруючої сепарації у високоефективному енергозберігаючому газосепарацийному обладнанні з застосуванням інтегрованих SCADA програмно-апаратних комплексів. - Інтегровані технології та енергозбереження. — 2014. — №4. — С.89-95.

25. O. Nastenko, L. Broniarz-Press, O. Liaposhchenko Mathematical modelling of separation process by coupled heat transfer in the inertial-filtering gas separator-condenser. - Inżynieria i Aparatura Chemiczna. — 2016. — №2. — С. 62-63.

26. Сугак Е.В. Очистка газовых выбросов в аппаратах с интенсивными гидродинамическими режимами / Е.В.Сугак, Н.А.Войнов, Н.А.Николаев. — 2-е изд.— Казань: Отечество, 2009. — 224 с.

27. Modelling and Design of Inertial – Filtering Gas Separators-Condensers for Compressor Units of Oil and Gas Industry / V.I.Sklabinskyi, A.A.Liaposhchenko, O.V.Nastenko, M.M.Al-Rammahi // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Vol.630. — P.117-123. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.630.117

28. Hydrodynamics modeling of gas separator inertial and filter elements for natural gas fine cleaning / V.Sklabinsky, O.Liaposhchenko, A.Logvyn, M.Al-Rammahi // *Chemistry & Chemical Technology*. — 2014. — Vol.8. — №4. — С.479-485.

29. Liaposchenko O. The model of crossed movement and gas-liquid flow interaction with captured liquid film in the inertial-filtering separation channels / O.Liaposchenko, I.Pavlenko, O.Nastenko // *Separation and Purification Technology*. — 2017. — Vol.173. — P.240-243. DOI:10.1016/j.seppur.2016.08.042

30. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей /Е.П.Медников. — М.: Наука, 1980. — 176 с.

31. De Silva, C. W. (Editor). *Vibration and shock handbook*. Taylor and Francis, CRC Press, Boca Raton, FL, 2005

32. A. Korobkin The mathematical challenges and modelling of hydroelasticity / A. Korobkin, E. I. Parau, J.-M. Vanden-Broeck// *The Royal Society Phil. Trans. R. Soc. A* (2011) 369, 2803–2812.

33. Тобес, Иглсон, «Гидроупругие колебания плоских пластин, связанные геометрией задней кромки», *Техническая механика*, т. 83, №4, серия D, стр. 229, ИЛ.

34. Karintsev I. V. *Hydroaeroelasticity : A Textbook* / I. V. Karintsev, I. V. Pavlenko. – Sumy : Sumy State University, 2017. – 235 P.

35. Ryszard Gryboś, «Drgania Konstrukcji wzbudzone przepływem», Gliwice, 2005.

36. Ляпощенко А.А., Мустафа Аль Раммахи, Логвин А.В. Разработка физической модели движения газокапельных потоков в рабочей полости ИФ – сепараторов. – *Хімічна промисловість України*. — 2012. — №6. — С.18-21.

37. Ляпощенко А.А., Настенко О.В., Логвин А.В., Аль Раммахи М.М. Физическая модель формирования высокодисперсных систем в турбулентном потоке газа. - *Сборник научных трудов SWorld. «Современные направления теоретических и прикладных исследований ‘2013»*. – Выпуск 1. Том 7. – Одесса. – 2013 – С.70-75.

38. Liaposhchenko O.O., Nastenko O.V., Logvyn A.V., M. M. Al-Rammahi Physical conditions and mechanisms for separation condensate systems. - International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. — Болгария, Варна, 2013. — Т.1. — С.81-83.

39. Liaposhchenko O.O., Nastenko O.V., Logvin A.V., Al - Rammahi M.M. Physical model of high-disperse gas-condensate systems formation in turbulent gas flow. - E-Journal // Modern scientific research and their practical application, edited by Alexandr G. Shibaev, Alexandra D. Markova.Vol.J21310 (Kupriyenko SV, Odessa, 2013) — URL: <http://www.sworld.com.ua/e-journal/J21310.pdf> (November 2013) — J21310-046.

40. Ferziger J.H. Computational Methods for Fluid Dynamics / Joel H. Ferziger / Milovan Peric. — [3rd rev. ed.] — Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002. — 426 p.

41. Hoffman K.A. Computational Fluid Dynamics / Klaus A. Hoffmann, Steve T. Chiang. — [4th ed.] — Engineering Education System, 2000. — 3 Volumes.

42. Lomax H. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics / H.Lomax, T.H.Pulliam, D.W.Zingg. – Berlin: Springer, 1999. – 267 p.

43. Pletcher R.H. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer / Richard H. Pletcher, John C. Tannehill, Dale Anderson. — [3rd ed.] — CRC Press Taylor & Francis Group, 2012. — 774 p.

44. Мустафа Аль Раммахи. Гидродинамические характеристики инерционно-фильтрующих сепараторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Аль Раммахи Мустафа Макки Мохаммедали; наук. кер. В.І.Склабінський. — Сумы: СумГУ, 2014. — 208с.

45. Склабинский В.И., Ляпощенко А.А., Настенко О.В., Аль-Раммахи М.М. Моделирование и проектирование инерционно-фильтрующих газосепараторов-конденсаторов для компрессорных установок нефтегазовой промышленности. - Проблемы теории и практики центробежных машин: монография, под ред. И.Б.Твердохлеба, А.В.Загорулько, С.Н.Гудкова. – Сумы: ООО «ПД «Папирус», 2014. – 418 с. - с.111-120.

46. Сафонов С.Г. Сепарация взвешенных частиц в инерционных пыле- и туманоуловителях: автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.17.08 / С.Г.Сафонов. — М., 2010. — 18 с.

47. Смирнов Д.Е. Совершенствование процесса сепарации частиц в инерционно-центробежном пылеуловителе-классификаторе : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Д. Е. Смирнов. — Ярославль, 2011. — 16 с.

48. Фалей Е.А. Исследование закономерностей и разработка технических решений турбулизационной центробежной сепарации минерального сырья: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.13 / Фалей Екатерина Александровна. – Екатеринбург, 2014. – 175 с.

49. Филонов, А.Г. Влияние режимных и конструктивных параметров сепараторов судовых опреснителей на эффективность процессов тонкой очистки пара: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.08.05 / А.Г. Филонов. – Калининград, 2000. – 22 с.С.70-75.

50. Kharoua N. CFD Modelling of a Horizontal Three-Phase Separator: A Population Balance Approach / N. Kharoua, L. Khezzer, H. Saadawi // American Journal of Fluid Dynamics. — 2013. — №3(4). — P.101-118.

51. Koch J. Better separation with combined materials / Jörg Koch, Daniel Egger // Sulzer Technical Review. — 2013. — №2. — P.13-15.

52. Koch-Glitsch FLEXICHEVRON® Mist Eliminators for Flue Gas Desulfurization. — Wichita: Koch-Glitsch, 2007. — 12 p.

53. Збаращенко О.В. Гідродинаміка вертикального потоку газу з твердими частками і його теплообмін зі стінкою : автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.14.06 / О.В.Збаращенко. — К., 2004. — 20 с.