

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

На правах рукопису

Примірник № _____

РИЖКОВ
РОСТИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 629.12.03

СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ТУРБОІМПАКТНОГО
СЕПАРАТОРА СТИСНУТИХ ГАЗІВ ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ
УСТАНОВОК

Спеціальність 05.05.03 – Двигуни та енергетичні установки

Дисертаційна робота
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Науковий керівник:
Сербін Сергій Іванович,
д-р техн. наук, професор

м. Миколаїв, 2015 р.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, індексів і скорочень.....	5
Вступ.....	6
1. Проблеми очистки стиснутих газів для газотурбінних установок.....	15
1.1. Джерела забруднення стиснутих газів для ГТУ.....	16
1.2. Основи очищення стиснутих газів гідродинамічними методами.....	22
1.3. Сучасний підхід для очищення стиснутих газів енергетичних установок.....	27
Основні результати і висновки по розділу 1.....	39
2. Методи досліджень процесів та інтенсифікації очищення стиснутих газів для ГТУ.....	40
2.1. Обґрунтування напрямків наукового дослідження.....	40
2.2. Методи теоретичних досліджень процесів турбоімпактного переносу.....	45
2.3. Узагальнена математична модель турбоімпактного сепаратора стиснутих газів для ГТУ.....	46
2.4. Методи експериментальних досліджень. Оцінка похибок експерименту.....	51
2.5. Експериментальні стенди для дослідження робочих процесів сепараторів стиснутих газів.....	53
Основні результати і висновки по розділу 2.....	57
3. Теоретичні дослідження гідродинамічних характеристик турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ.....	59
3.1. Розробка узагальненої схеми комплексної турбоімпактної інтенсифікації очищення стиснутих газів.....	59
3.2. Розробка схемних рішень турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ.....	61

3.3. Розробка конструктивних схем турбоімпактних сепараторів паливного газу ГТУ.....	64
3.4. Теоретичні дослідження гідродинаміки струминного модуля попередньої очистки стиснутого газу.....	69
3.5. Теоретичні дослідження особливостей гідродинаміки гофрованого сепараційного модуля	77
3.6. Теоретичні дослідження гідродинаміки сепаратора очистки паливного газу.....	81
Основні результати і висновки по розділу 3.....	88
4. Тривимірні дослідження гідродинамічних особливостей турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ.....	90
4.1. Розробка тривимірних розрахункових моделей першого ступеня очистки сепараторів.....	90
4.2. Розробка тривимірної розрахункової моделі уніфікованого сепаратора паливного газу для ГТУ.....	93
4.3. Дослідження ефективності роботи сепаратора стиснутих газів для ГТУ.....	96
4.3.1. Дослідження ефективності очищення в турбоімпактному струминному модулі.....	96
4.3.2. Дослідження ефективності очищення в гофрованому сепараційному модулі.....	101
4.3.3. Дослідження ефективності очищення в уніфікованому сепараторі паливного газу.....	107
Основні результати і висновки по розділу 4.....	117
5. Експериментальні дослідження ефективності турбоімпактних сепараторів стиснутих газів. Впровадження результатів роботи.....	118
5.1. Розробка конструкції сепаратору паливного газу для ГТУ.....	118

5.2. Результати експериментальних досліджень турбоімпаکتного сепаратора паливного газу для ГТУ.....	122
5.3. Розробка та експериментальні дослідження турбоімпаکتного масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу.....	130
5.4. Впровадження результатів дисертаційної роботи.....	134
5.4.1. Створення практичних рекомендацій з проектування проточних частин турбоімпактних сепараторів стиснутих газів ГТУ.....	134
5.4.2. Турбоімпактні сепаратори паливних газів для ГТУ.....	136
5.4.3. Турбоімпактні масловіддільники для систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу.....	139
5.5. Розрахунок економічного ефекту.....	142
Основні результати і висновки по розділу 5.....	143
Висновки по дисертаційній роботі.....	146
Додатки.....	150
Список використаних джерел.....	153

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ І СКОРОЧЕНЬ

d – діаметр, характерний розмір, м;
 F – сила, Н;
 G – витрата, кг/с;
 $\vec{g}$ – прискорення вільного падіння, м/с²;
 K – кінетична енергія турбулентності, м²/с²;
 p – тиск, Па;
 R – універсальна газова стала, кДж/кмоль;
 Re – число Рейнольдса;
 St – число Стокса;
 T – температура, К;
 u – швидкість, м/с;
 ρ – масова густина, кг/м³;
 ε – дисипація кінетичної енергії турбулентності, м²/с³;
 τ – час, с;
 σ – число Прандтля;
 η – коефіцієнт вловлювання.

Індекси:

0 – початковий;
 cr – критичний;
 min – мінімальний.

Скорочення:

ГТД – газотурбінний двигун;
 ГТУ – газотурбінна установка;
 ГПТУ – газо-протурбінна установка.

ВСТУП

Актуальність дослідження. В даний час спостерігається підвищений інтерес до вивчення дисперсних двофазних газових середовищ підвищеного тиску. Це пояснюється зростаючим значенням таких середовищ у процесах перетворення та отримання енергії в енергомашинобудуванні, в хімічній і нафтогазовій промисловості та ін. Двофазні газові середовища характеризуються різноманіттям форм руху, обміну енергією і масою. Робочі тіла новітніх газотурбінних двигунів (ГТД), що працюють як по відкритому, так і по закритому газовому циклах, по суті є дисперсними двофазними середовищами підвищеного тиску. В газотурбінних установках (ГТУ) утворення двофазних робочих газових середовищ відбувається на початковій стадії робочих процесів безпосередньо в камерах згоряння при диспергуванні палива, а потім і в ході складних ланцюгових реакцій горіння, що супроводжуються виникненням твердого вуглецю та ін.

Газові середовища - різні за походженням, складом і параметрами, вони є джерелами високо- і низькопотенційної енергії та, в ряді випадків, й дорогих матеріалів. Підвищення якості очищення стиснутих газів дозволяє не тільки зменшити забруднення навколишнього середовища, а й знизити споживання палива утилізацією низькопотенційної енергії газових викидів, скоротити втрати цінних матеріалів. У новому поколінні газоочисних пристроїв необхідно розширити матеріалозберігаючі функції, а також використовувати «непридатні» раніше енергоресурси газових викидів для цілей очищення. Підвищеними потенційними можливостями в цьому напрямку відзначаються паливні гази для ГТД газоперекачувальних агрегатів та електростанцій, а також масляні аерозолі систем суфлювання ГТД. Для систем суфлювання ГТУ як відкритого, так і замкнутого циклів доцільно використовувати масловіддільники-сепаратори, що забезпечують уловлювання дрібних

крапельок масла і повернення їх в систему. У цьому випадку знижуються не тільки викиди в атмосферу, але і втрати масла. Впровадження енергетичних установок нових поколінь - газо - і газо-паротурбінних, а також атомних, зростання загального числа енергетичних установок та розвиток виробництва сприяє зростанню інтересу до проблем очистки двофазних дисперсних середовищ з підвищеним тиском. Особливо гостро стала проблема очищення газів від рідкої фази, оскільки при її підвищених концентраціях знижується економічність, довговічність, а також погіршується експлуатаційні якості енергетичних установок. Створення вискоефективних та економічних сепаруючих пристроїв для стиснутих газів є значним резервом поліпшення ефективності використання паливо-енергетичних ресурсів та підвищення надійності експлуатації ГТУ.

Технічна досконалість сепаруючих пристроїв характеризується масогабаритними показниками, витратами енергії на переміщення робочих середовищ, технологічністю. Інтенсифікація процесів осадження частинок - один з ефективних способів зниження маси і габаритів, підвищення економічності та надійності роботи газоочисного пристрою.

Розглядом різних аспектів цієї проблеми займаються у багатьох університетах, проектних та конструкторських організаціях як у нас в країні: ІТТФ НАНУ, НТУУ «КПІ» (м. Київ), ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект», НУК ім. адмірала Макарова (м. Миколаїв), ДП Запорізьке МКБ «Прогрес», ВАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), Selton (м. Київ) так і закордоном: Центральний котлотурбінний інститут ім. І.І. Ползунова (Росія), Інститут теплообміну (Білорусь), General Electric Company (США), Siemens Westinghouse (Німеччина), British Gas (Великобританія). Результати досліджень із зазначеної проблематики представлено в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених: Страуса В., Райста П., Рижкова С.В., Рижкова С.С., Сербіна С.І., Шевцова А.П., Голікова В.А., Гордон Г.М. та ін. [6,8,11,20,21,23,26,34,35,75,84,86,87,125].

Відмітимо, що при експлуатації сучасних газотурбінних установок, що працюють на газоподібному паливі, наприклад в складі газокompресорних станцій та теплових електростанцій, виникають серйозні проблеми, пов'язані з попаданням газового конденсату в проточну частину двигуна. В ряді випадків це може визвати оплавлення і навіть прогоряння елементів пальникових пристроїв низькоемісійних камер згоряння в результаті локального впливу високих температур, спричинених горінням рідких фракцій вуглеводнів на поверхнях каналів попереднього сумішоутворення. Газовий конденсат в природному газі при певних умовах можуть утворювати фракції вищих вуглеводнів (C5, C6), які характеризуються низькою температурою самозаймання. Відмітимо, що присутність фракцій C6 навіть в малих кількостях в природному газі підвищує точку роси з +1 °C до +25 °C і більше. Найбільш інтенсивне утворення газового конденсату відбувається при тисках 2,0-4,0 МПа, характерних для сучасних камер згоряння ГТД.

При наявності недостатньо ефективної системи підготовки паливного газу і невеликої температури його підігріву можливо попадання рідких фракцій вуглеводнів в пальникові пристрої камер згоряння ГТУ, що спричиняє дефекти в експлуатації. Тому створення вискоефективних турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ є актуальною науковою задачею і значним резервом поліпшення використання паливо-енергетичних ресурсів та підвищення надійності експлуатації установок.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано автором-аспірантом кафедри «Турбін» машинобудівного інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК) в рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні, напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність» відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних робіт НУК за держбюджетною темою № 1894 «Основи турбоімпактної інтенсифікації процесів переносу при очищенні багатofазних сумішей палив підвищеного тиску для енергетичних установок», номер держреєстрації №

0113U000241, та за госпрозрахунковою темою № 1875 «Розробка сепаратора для первинної очищення паливних газів від твердої та рідкої фракцій», номер держреєстрації № 0111U009084, в яких автор брав участь в якості виконавця на посаді молодшого наукового співробітника.

Метою наукового дослідження є створення вискоєфективного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок на основі запропонованих схемних рішень з інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати наступні задачі:

- аналіз ефективних схем очищення стиснутих газів та вибір перспективних напрямки зі створення гідродинамічних сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок;
- адаптація математичних моделей гідродинамічних процесів та переносу полідисперсного середовища в сепараторах стиснутих газів на основі сучасних пакетів обчислювальної гідродинаміки;
- розробка узагальненої схеми комплексної турбоімпактної інтенсифікації очищення стиснутих газів;
- розробка схемних рішень пристроїв турбоімпактної сепарації стиснутих газів та проведення їх теоретичних досліджень на основі адаптованої математичної моделі;
- проведення тривимірних досліджень гідродинамічних особливостей сепараторів стиснутих газів для ГТУ, вибір раціональних конструктивних схем;
- розробка та виготовлення дослідних зразків турбоімпактних сепараторів для очистки паливних газів ГТД та системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу, а також програми їх експериментальних досліджень;
- розробка експериментальних стендів для дослідження процесів в сепараторах стиснутих газів для ГТУ з використанням фотоелектричних лічильників частинок та аналітичних фільтрів;

- проведення експериментальних досліджень ефективності турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ;
- верифікація адаптованої математичної моделі процесів очищення стиснутих газів та розробка рекомендацій з проектування сепараторів;
- розробка робочих креслень на турбоімпактні сепаратори стиснутих газів для ГТУ, впровадження результатів дисертаційної роботи.

Об'єктом дослідження є гідродинамічні процеси в системах очищення стиснутих газів енергетичних систем та установок. **Предмет дослідження** – характеристики процесів турбоімпактної інтенсифікації переносу при очищенні стиснутих газів для газотурбінних установок.

Методи дослідження. Удосконалення характеристик сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок забезпечено теоретико-експериментальним розв'язанням дослідницьких завдань на єдиній методологічній основі. Розв'язання рівнянь математичних моделей турбулентного переносу в ступенях очищення турбоімпактних сепараторів здійснено за допомогою методу контрольного об'єму з використанням сучасного комплексу обчислювальної гідродинаміки Ansys Fluent. Експериментальні дослідження газоочисних апаратів енергетичних систем та установок проведено в Національному університеті кораблебудування на спеціально створених стендах у вигляді аеродинамічних труб відкритого типу з використанням лічильників часток та фотометрів аерозолів; розрахунок концентрацій дисперсної фази здійснено ваговим методом за допомогою аналітичних фільтрів. При постановці дослідів використовувалася загальна теорія моделювання та планування експериментів, а при обробці даних та перевірці гіпотез – статистичний аналіз.

Наукова новизна отриманих результатів, які автор захищає.

Вперше:

1. Розроблено узагальнену багатоступінчасту схему комплексної турбоімпактної інтенсифікації очищення стиснутих газів для газотурбінних установок за рахунок підвищення швидкості та рівня турбулентності

струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу, дифузіофорезу і в відривних зонах; утворення плівки рідини з вловлених крапель з подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння; осадження на сіткових гофрованих коагуляторах за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу та капілярних сил; уловлення скоагульованих крапель, що виносяться потоком, за рахунок сил тяжіння та інерції на другому ступені очистки, де має місце відвід вловленої рідини у вигляді плівки через спеціальні канавки, розташовані на перегородці.

2. Встановлено основні гідродинамічні характеристики запропонованих турбоімпактних сепараторів стиснутих газів різних конструктивних схем (з центральним струменем та з багатоструминними системами перед коагулятором) при варіюванні відстанню між поверхнями осадження та розмірами ступенів очистки: 0,25; 0,5 та 1,0 діаметра входного конфузору, які дозволили визначити найбільш ефективну послідовність здійснення стадій очистки та знайти раціональні геометричні та режимні параметри турбоімпактних сепараторів.

3. Виявлено розподіл швидкості та кінетичної енергії турбулентності у робочих каналах турбоімпактного струминного модуля та гофрованого сепараційного модуля сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок в діапазоні витрат робочого середовища 500–2200 кг/год. Встановлено, що швидкість в окремих ділянках сепаратора збільшується у 2–2,5 рази в порівнянні зі швидкістю потоку на його вході, що дозволяє інтенсифікувати осадження частинок за рахунок турбофоретичних ефектів. Показано, що зі збільшенням витрат робочого середовища для всіх схемних рішень спостерігається збільшення турбулізації потоку та розмірів зон зворотних вихорів та течій, що позитивно впливає на процеси осадження полідисперсних частинок.

4. Встановлено, що коефіцієнт осадження полідисперсної фракції в турбоімпактному струминному модулі першого ступеня сепаратора очистки паливних газів для газотурбінних установок складає 50-60 % і збільшується до

70-80 % після гофрованого сепараційного модулю. Збільшення витрати робочого тіла приводить до збільшення величини коефіцієнту осадження внаслідок інтенсифікації турбулізації потоку та позитивного впливу турбофоретичного ефекту на осадження частинок.

5. Доведено теоретичним шляхом та експериментом, що сумарна ефективність очищення від полідисперсних фракцій в уніфікованому турбоімпакті сепараторі паливних газів для ГТУ без використання гофрованого коагулятора в першому ступені очистки дорівнює 82–88 %, а з його використанням 98–99,5 % при аеродинамічному опорі 0,7-3,2 кПа в діапазоні витрат робочого тіла 500–2200 кг/год.

Отримали подальший розвиток:

1. Підхід до визначення характеристик сепараторів стиснутих газів, заснований на числовому моделюванні робочих процесів, який відрізняється від відомих тим, що враховує особливості дій сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу та дифузійфорезу, а також специфіку турбоімпактних систем підвищеного тиску.

2. Схемні рішення турбоімпактних масловіддільників підвищеного тиску, які містять турбоімпактний та гофрований коагуляційний модулі, для систем суфлювання, що дозволяють використовувати їх в ГТУ замкнутого циклу.

На основі отриманих наукових результатів сформульовано **наукове положення**: для підвищення ефективності очищення стиснутих газів для газотурбінних установок від аерозольних часток ефективним засобом є інтенсифікація **турбоімпактного переносу** на плоских та розвинутих поверхнях осадження за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофорезу і в відривних зонах в послідовно розташованих ступенях очистки з утворенням плівки рідини з вловлених крапель і подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння.

Достовірність результатів досліджень забезпечується застосуванням сучасних розрахунково-експериментальних методів і засобів, адекватністю

прийнятих допущень теплофізичної моделі і реальних процесів, які відтворювалися на спеціальних стендах і вивчалися за допомогою сучасних засобів виміру неконтактного типу, задовільним узгодженням результатів розрахунків з експериментальними даними, а також результатами стендових і натурних випробувань. Отримані в роботі результати є логічними і не суперечать практиці проектування сепараторів газу для газотурбінних двигунів.

Наукове значення роботи полягає в удосконаленні теоретичного підґрунтя використання ефектів інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу для підвищення ефективності сепараторів газів газотурбінних установок, в подальшому розвитку фізичних і математичних моделей комплексної схеми очищення стиснутих газів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці та створенні ефективних, екологічно чистих і ресурсозберігаючих турбоімпактних сепараторів паливних газів для ГТУ стаціонарного типу та масловіддільників систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу, розрахованих на різні витрати газу, а також в розробці практичних рекомендацій з проектування їх проточних частин.

Результати роботи впроваджені: в ДП НВКГ „Зоря-Машпроект” у вигляді дослідних зразків турбоімпактних сепараторів паливного газу та масловіддільників систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу, а також рекомендацій з їх проектування, в Академії наук суднобудування України при проектуванні природоохоронних систем, а також в навчальному процесі і виконанні наукових досліджень в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає біля 150 тис. доларів США.

Особистий внесок здобувача полягає в створенні узагальненої схеми комплексної турбоімпактної інтенсифікації очищення стиснутих газів, в розробці та дослідженні схемних рішень турбоімпактних сепараторів стиснутих газів за допомогою пакетів обчислювальної гідродинаміки в двовимірній та

тривимірній постановці, в результатах теоретичних розрахунків процесів осадження полідисперсних частинок в турбоімпаکتних сепараторах, проведенні стендових випробувань та аналізі результатів експериментальних досліджень сепараторів стиснутих газів. Основні наукові результати теоретичних та експериментальних досліджень отримані автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи апробовані на: 3 і 4 міжнародних науково-технічних конференціях „Проблеми промислової теплотехніки”, м. Київ, 2004 і 2005 р.; 1 міжнародній конференції “Когенерація в промисловості й комунальній енергетиці”, м. Київ, 2004 р.; 3 і 4 міжнародних науково-технічних конференціях „Проблеми енергозбереження та екології в суднобудуванні”, м. Миколаїв, 2002 і 2005 р.; міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів, молодих учених і молодих фахівців «Суднова енергетика: стан і проблеми», м. Миколаїв, 2005 р.; 2 та 4 міжнародних науково-технічних конференціях „Інновації в суднобудуванні та океанотехніці”, м. Миколаїв, 2011 та 2013 р.; 7-10 міжнародних науково-технічних конференціях „Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні”, м. Миколаїв, 2012-2015 р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 32 наукових робіт, із них 7 статей в спеціалізованих наукових виданнях по технічним наукам, які входять в перелік, затверджених ВАК України, і до наукометричних баз, 24 матеріали в збірниках міжнародних конференцій, 1 наукова робота, що отримала Премію Верховної Ради України.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів і висновків. У додатках наведені акти та інші матеріали, що підтверджують впровадження результатів досліджень. Загальний об'єм дисертації становить 165 сторінок, серед яких 150 сторінок основного машинописного тексту, 53 рисунка і 14 таблиць. Бібліографія містить 126 найменувань.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ ОЧИСТКИ СТИСНУТИХ ГАЗІВ ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

1.1. Джерела забруднення стиснутих газів для ГТУ

Стиснуті гази мають широке застосування в якості робочого тіла для камер згоряння газотурбінних установок, а також різних механізмів і автоматичних систем та пристроїв. Кондиціювання стиснутих газів містить комплекси заходів з очищення та осушення, боротьби з шумом і забрудненням навколишнього середовища при вихлопі стиснутого газу в атмосферу. Наприклад, очистка від рідкої фази та твердих частинок паливного газу значно підвищує ресурс камер згоряння газотурбінних установок та зменшує їх відкиди.

Різноманітні забруднення стиснутих газів негативно впливають на характеристики камер згоряння, пневматичних пристроїв та систем. Компонентами забруднень стиснутих газів є конденсат пари: вода, рідка фаза газоподібного палива, масло в рідкому та пароподібному стані, тверді і газоподібні забруднення. Найбільшу частину забруднень стиснутих газів для систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу, що характеризуються підвищеним тиском, складає масло, а для паливних газів ГТД – конденсат палива та тверді домішки. [3,4,9,10,56,68,69,104].

Відмітимо, що при експлуатації сучасних газотурбінних установок, що працюють на газоподібному паливі, наприклад в складі газокompресорних станцій та теплових електростанцій, виникають серйозні проблеми, пов'язані з попаданням газового конденсату в проточну частину двигуна. В ряді випадків це може визвати оплавлення і навіть прогоряння елементів пальникових пристроїв низькоемісійних камер згоряння в результаті локального впливу високих температур, спричинених горінням рідких фракцій вуглеводнів на поверхнях каналів попереднього сумішоутворення. Газовий конденсат в природному газі при певних умовах можуть утворювати

фракції вищих вуглеводнів (C5, C6), які характеризуються низькою температурою самозаймання (477-553 K). Відмітимо, що присутність фракцій C6 навіть в малих кількостях (0,1-0,2 %) в природному газі підвищує точку роси з +1 °C до +15 °C. Найбільш інтенсивне утворення газового конденсату відбувається при тисках 2,0-4,0 МПа, характерних для сучасних камер згоряння ГТД.

З погіршенням властивостей родовищ природного газу у зв'язку з їх виробкою частка вищих вуглеводнів в ньому зростає, що може призвести до підвищення точки роси до +30 °C. На рис. 1.1 наведені фотографії пошкоджень лопаткових апаратів турбін та компресорів при попаданні конденсату в проточну частину (дані фірми Michell Instruments).



Рисунок 1.1 – Дефекти лопаткових апаратів при попаданні конденсату в проточну частину

При наявності недостатньо ефективної системи підготовки паливного газу і невеликої температури його підігріву можливо попадання рідких фракцій вуглеводнів в пальникові пристрої камер згоряння ГТУ, що спричинить дефекти в експлуатації ГТУ. Тому створення високоефективних сепараторів стиснутих газів для ГТУ є актуальною науковою задачею і значним резервом поліпшення використання паливо-енергетичних ресурсів та підвищення надійності експлуатації установок.

Джерелом води, яка міститься в стиснутому повітрі, є водяна пара, всмоктувана компресором ГТД в систему разом із повітрям, або та, що подається в камеру згоряння газопаротурбінних установок (ГПТУ) типу «Водолій» [55]. Іноді вода поступає в лінію нагнітання через відсутність загороджувальних козирків на забірних пристроях в дощову погоду, а також в ГТУ в морських умовах – на суднах та бурових платформах. Вологовміст повітря залежить від температури і відносної вологості пароповітряної суміші. Для атмосферного повітря ці параметри визначаються кліматичними умовами і порою року.

На спеціальних автономних енергетичних об'єктах перспективними є газотурбінні установки закритого циклу для приводу електрогенератора [15,102]. В них робоче тіло циркулює по замкнутому контуру без зв'язку з атмосферою; джерелами теплоти, найчастіше, служать атомні реактори. Замість камер згоряння в таких ГТД використовуються рекуперативні теплообмінники, через які циркулює теплоносій від контурів атомного реактора.

У ГТУ замкнутого циклу важливе значення набуває вирішення двох завдань:

- зведення до мінімуму протікання робочого тіла через кінцеві ущільнення;
- попадання масляного аерозолі в проточну частину турбін.

Ці завдання вирішуються шляхом створення високоефективних контактних ущільнень і газоочисних пристроїв. Контактні ущільнення з

композиційних матеріалів істотно знижують протікання газу, які на порядок менше протікання через лабіринтові ущільнення [102].

Протікання з масляних порожнин містять високодисперсний масляний аерозоль з діаметрами частинок 0,1-0,5 мкм та крупні краплі більше 20 мкм, концентрація може досягати до 30 г/м³ при витраті до 40 м³/год і тиску 0,1-0,5 МПа [102]. Для ГТУ замкнутого циклу можливі два випадки:

- очищене газове середовище повертається в цикл установки через компресор низького тиску;
- очищене середовище скидається в машинне відділення. Другий випадок можливий, коли робочим тілом ГТУ служить повітря.

Повернення очищених газів в цикл доцільно здійснювати у ГТУ замкнутого циклу середнього (1-5 МПа) і високого (більше 5 МПа) тисків. У ГТУ замкнутого циклу низького тиску (менше 1 МПа) очищене повітря системи суфлювання зазвичай відводяться в машинне відділення. Скидання газів в машинне відділення пред'являє жорсткі вимоги до якості очищення, тобто ті ж вимоги, що і в системах кондиціонування. [66,67].

Стиснення повітря, що надійшло в компресор ГТД, супроводжується достатньо значним підвищенням температури. У процесі стиснення вміст вологи в питомому об'ємі повітря збільшується пропорційно зростанню тиску, але при цьому внаслідок підвищення температури його відносна вологість значною мірою знижується. Так, при тиску в системі 0,7 МПа і відносній вологості всмоктуваного повітря 80 % стиснуте повітря на виході з компресора низького тиску ГТД має відносну вологість 6-10 %. При русі по трубопроводах та інших елементах системи повітря охолоджується внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем, відбувається перенасичення повітря водяними парами та їх конденсація.

Здатність стиснутого повітря утримувати пари води зменшується з пониженням температури і з підвищенням тиску. При цьому його відносна вологість зростає, а після досягнення стану насичення ($\phi=1$) відбувається конденсація надлишкової кількості парів і поява води в рідкому стані

(конденсату). Температура, при якій це відбувається, називається точкою роси t_p . При більш високій температурі (і тому ж тиску) конденсація водяної пари не відбувається. Тому точка роси стиснутого повітря часто вказується як міра вмісту в ньому водяної пари.

Джерелами забруднення стиснутого повітря маслом можуть бути масло компресорів і пневматичних пристроїв, масляні фільтри на лінії всмоктування компресорів, пари та розпилене масло в навколишньому повітрі. У стиснутому повітрі масло зазвичай знаходиться в пароподібному та рідкому стані. Гранична концентрація парів масла в повітрі, як і парів води, зменшується з пониженням температури і підвищенням тиску.

Винос в лінію нагнітання масла компресорів зазвичай є основною причиною забруднення стиснутого повітря маслом. У ротаційних і гвинтових маслозаповнених компресорах винос масла в лінію нагнітання в 1,5-2 рази вище, ніж в поршневих, і в середньому може бути прийнятий: для компресорів малої продуктивності 200-300 мг/м³; середньої і великої продуктивності 50-100 мг/м³. У відцентрових і мембранних компресорах винос масла в лінію нагнітання практично відсутній.

Висока температура в поршневому просторі компресорів і на початковій ділянці лінії нагнітання (від 160 до 220°C) призводить до пароутворення і, частково, термічного розкладання масла. В результаті цих процесів до 5-6 % масла окислюється і у вигляді нагару та шлакової плівки осідає на внутрішніх порожнинах компресорів і трубопроводів, а легкі фракції у вигляді пари і дрібнодисперсної фази переносяться повітрям в систему.

Тверді забруднення. Концентрація, дисперсний склад і природа твердих забруднень стиснутих газів і повітря залежить від забрудненості повітряного басейну в зоні всмоктування компресора, стану, режимів експлуатації та обслуговування трубопроводів і пневматичних пристроїв. Основна кількість твердих забруднень вноситься при передачі стиснутого повітря по трубопроводах і з'єднаннях. Ці забруднення на 95-98 % складаються з іржі і окалини. При порушенні технології виготовлення та

монтажу в трубопроводі потрапляють частинки ущільнюючих матеріалів і промисловий пил. Усереднена концентрація іржі й окалини в міжцехових трубопроводах може становити до 25 мг/м^3 повітря, в цехових - до $12,5 \text{ мг/м}^3$.

При хорошому стані трубопроводів концентрація іржі і окалини зазвичай не перевищує $2-4 \text{ мг/м}^3$, однак разові концентрації забруднень в момент початку подачі повітря, при струсах і гідравлічних ударах в трубопроводах можуть бути значно більшими. Металеві частки з'являються в системах в результаті зносу поршневих кілець компресорів і рухомих деталей пристроїв, а стружка, притиральні состави й абразиви - при неправильній підготовці внутрішніх порожнин пневматичних пристроїв. Густина твердих забруднень повітря становить від 0,1 до 8 г/см^3 .

Газоподібні забруднення. Основну частину газоподібних забруднень, які потрапляють в системи разом з атмосферним повітрям, складають димові гази від спалювання палива; гази, що утворюються при хімічних процесах; пари кислот і лугів; розчинники та ін. Найбільш часто в стиснутому повітрі міститься сірчистий газ SO_2 , який при з'єднанні з конденсатом утворює сірчану кислоту і сірчистий ангідрид, що руйнує поряд з іншими розчинами кислот, лугів і озоном поверхні пристроїв і ущільнень.

За мінімальну робочу температуру приймають найменшу з температур: мінімальну температуру стиснутого повітря, або мінімальну температуру навколишнього середовища при експлуатації пневматичних пристроїв і трубопроводів. Забрудненнями вважаються всі сорти масел і мастил при використанні стиснутого повітря в системах, що не потребують внесення мастильних матеріалів при роботі. У стиснутому повітрі для систем живлення, що вимагають внесення мастильних матеріалів при роботі, забрудненнями вважаються всі сорти консервуючих і компресорних масел і мастил.

Незалежно від класу забрудненості стандарт допускає наявність в стиснутому повітрі тільки слідів кислот і лугів, тобто концентрацій, які не надають шкідливого впливу на пневматичні системи і пристрої. Класи забрудненості стиснутого повітря слід вказувати в технічних вимогах до

експлуатації пневматичних систем і пристроїв. Методи вимірювання забрудненості регламентовані СТ СНД 1705-99.

Стиснутий паливний газ для енергетичних установок характеризується полідисперсним складом дисперсної фази та описується ГОСТ 5542-87, ГОСТ 21199-82, ОСТ 51.40-93.

Робоче середовище (природний газ) згідно вимог нормативних документів: ГОСТ 5542-87; ГОСТ 21199-82; ОСТ 51.40-93 повинно мати наступні параметри:

- густину при нормальних умовах - від 0,66 до 0,8 кг/нм³;
- номінальний тиск робочого середовища на вході в сепаратор - 20 ± 5 кгс/см²;
- максимальний тиск робочого середовища на вході в сепаратор – $40 + 5$ кгс/см²;
- температура на вході: - 20 ...+60 °С;
- вміст твердих частинок на вході - не більше 40 мг/кг;
- вміст твердих частинок розміром понад 10 мкм - не більше 6 мг/кг;
- вміст рідких фракцій (газовий конденсат, крапельна волога) - не більше 10 мкм.

Класифікація забруднень стиснутого повітря згідно з DIN ISO 8573-1 [120] наведена в табл. 1.1.

Аналіз даних експлуатації та проведені попередні дослідження [19] свідчать про те, що забруднення стиснутого повітря значно знижують надійність і довговічність пневматичних систем, призводять до порушення технологічних процесів. Через вплив забруднень стиснутого повітря та газів знос пристроїв збільшується в 2-7 разів, а вихід пристроїв з ладу з цієї ж причини складає до 80 % загального числа відмов.

Вплив забруднень на системи та пристрої можна розділити на фізичний, хімічний та електролітичний. Фізичний вплив забруднень полягає в закупорці отворів і сопел вологою, льодом і твердими частинками, в змиванні масла, в пошкодженні робочих поверхонь клапанних пар, мембран, золотників, в зносі

і заклинюванні тертьових деталей та ін. Хімічний і електрохімічний впливи забруднень проявляються в корозії металевих деталей, руйнуванні покриттів і гумових деталей, розчинами кислот, лугів та інших хімічних активних компонентів.

Таблиця 1.1

Класифікація забруднень стиснутого повітря DIN ISO 8573-1

Клас	1. Тверді частки. Максимальний розмір, мкм	2. Максимальна густина часток, мг/м ³	3. Вміст води. Максимальна точка роси, °C	4. Вміст масла. Максимальний вміст масла, мг/м ³
1	0,1	0,1	-70	0,01
2	1	1	-40	0,1
3	5	5	-20	1
4	15	8	+3	5
5	40	10	+7	25
6	-	-	+10	-
7	-	-	Не визначено	-

1.2. Основи очищення стиснутих газів гідродинамічними методами

Для очищення стиснутих газів енергетичних установок використовують різноманітні силові поля – гравітаційне, інерційні, турбофоретичні, електрофоретичні та інші. В схемах очистки та пристроях часто послідовно використовують декілька способів очистки. Силові поля по різному впливають на частинки різної дисперсності, але головним фактором є різниця густини частинок та стиснутого газу. Таким чином силові поля можливо ефективно використовувати для очистки при тисках газів до 10-20 МПа [8,34,35,47].

Для розв'язання питань очищення паливних газів ГТУ від рідких та твердих фракцій необхідно розрізняти дві основні групи фракцій:

- дрібні частки – від зародкових (менш 1 мкм) до 10 мкм;
- великі частки – діаметром більше 20 мкм.

Рух часток першої групи визначається молекулярними законами переносу, другої – макрзаконами. Наприклад, вміст рідкої фракції в робочому

середовищі паливних систем ГТД характеризується наявністю дрібних крапель (до 10 мкм).

Більші аерозольні частинки (≥ 20 мкм) не втягуються в пульсаційні та інші рухи, на них діє тільки аеродинамічна сила, якщо знехтувати гравітацією. У дисперсних двофазних потоках відносний рух часток (крапель) з $d_k > 20$ мкм характеризується числами Рейнольдса $Re_k > 1$ і обтікання частинками виходить за межі чинності закону Стокса. Коефіцієнт аеродинамічного опору частинок в інтервалі Re_k від 1 до 10^3 описується емпіричною формулою [8,50]:

$$\varphi = 24 Re_k^{-1} (1 + 0,17 \cdot Re_k^{2/3}). \quad (1.1)$$

Рівняння руху частинок з урахуванням (1.1) можна подати в безрозмірному вигляді:

$$\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial \bar{\tau}} = St^{-1} (1 + 0,17 Re_k^{2/3}), \quad (1.2)$$

де $\bar{u}_k = u_k / u_0$ – безрозмірна усереднена швидкість частинки;

u_0 – швидкість потоку;

$\bar{\tau} = \tau u_0 / M$ – безрозмірний час;

M – характерний розмір перешкоди;

St – число Стокса; $St = \rho_k d_k^2 u_0 / 18 \mu M$.

В теорії сепарації газових потоків частинка вважається вловленою, якщо траєкторія її центру ваги перетинається з поверхнею обтікання або дотикається до неї. Самим простим способом очистки стиснутих газів є гравітаційний, який дозволяє уловлювати тільки дуже крупні частинки – більш 200 мкм за рахунок різкого збільшення перерізу для зменшення швидкості потоку менше 1 м/с. Інші способи уловлювання за рахунок різноманітних сил представлені на рис. 1.2.

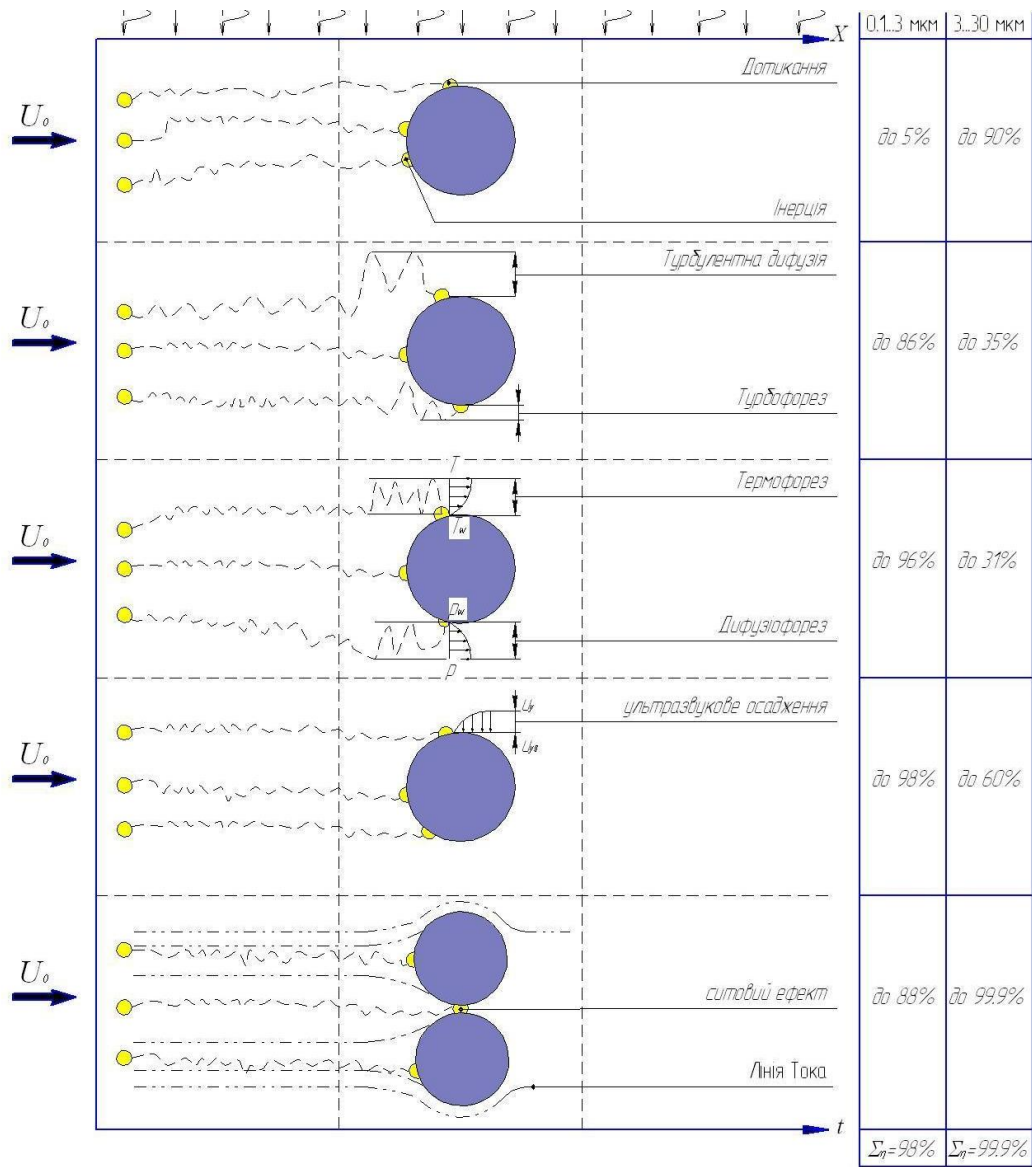


Рисунок 1.2 – Осадження часток за рахунок різних сил та фізичних явищ

Оцінка ефективності елементів, що сепарують, зводиться до розрахунків траєкторії частинок, що переносяться потоком, з урахуванням їх взаємодії з поверхнею елементів.

При цьому вважається, що густина частинок набагато більше (на два-три порядки) густини газу, що їх транспортує. Концентрація частинок (об'ємний зміст) у потоці є такою, що дозволяє знехтувати їхньою взаємодією й розглядати рух частинок незалежно одна від одної. Також вважається, що наявність частинок не впливає на характеристики газового потоку, а розширення потоку незначне. Тому рух частинок можна розглядати як двовимірну задачу.

Проектуючи на вісь X та Y рівняння (1.2), отримуємо систему рівнянь:

$$\frac{\partial^2 \bar{X}_k}{\partial \bar{\tau}^2} = St^{-1} (1 + 0,17 Re^{2/3}) \left(\bar{u}_x - \frac{\partial \bar{X}_k}{\partial \bar{\tau}} \right); \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{Y}_k}{\partial \bar{\tau}^2} = St^{-1} (1 + 0,17 Re^{2/3}) \left(\bar{u}_y - \frac{\partial \bar{Y}_k}{\partial \bar{\tau}} \right), \quad (1.4)$$

де $\bar{X}_k = X_k/d_o$; $\bar{Y}_k = Y/d_o$ – координати частинки в безрозмірному вигляді;
 d_o – характерний розмір перешкоди (для імпактного осадження частинок – діаметр струменя);

$\bar{u}_x = u_x/u_o$; $\bar{u}_y = u_y/u_o$ – безрозмірні швидкості газу.

В роботах [8, 50] аналогічні рівняння використані для дослідження обтікання двофазним середовищем циліндра, сфери, нескінченної пластини та ін. В роботах [26,37,85,100] розв’язані задачі струменевого обтікання пластини вісесиметричним двофазним середовищем.

Після розрахунків траєкторій частинок з діаметрами d_{ki} знаходять коефіцієнти їх вловлювання:

$$\eta_i = 2R_{npi} / d_o, \quad (1.5)$$

де R_{npi} – гранична траєкторія частинок i -го діаметру.

Під граничною розуміють траєкторію частинки, розташовану на такій відстані від осі потоку, при якій частинка ще дотикається до перешкоди (пластини, сфери, циліндра й ін.). Усі частинки, що перебувають на радіусі до граничної траєкторії (тобто $R_i < R_{npi}$) осаджуються на перешкоді, а частки з $R_i > R_{npi}$ зносяться потоком без осадження. При полідисперсному складі частинок у двофазному середовищі сумарний коефіцієнт вловлювання визначається як:

$$\eta_\Sigma = \frac{\sum \eta_i C_{mi}}{\sum C_{mi}}, \quad (1.6)$$

де C_{mi} – масова концентрація частинок діаметром d_{ki} .

Багатьма дослідженнями встановлено існування критичного числа Стокса $St_{кр}$, за якого є неможливим інерційне осадження частинок на перешкоді [45,50,8,50]. Критичні умови осадження аерозолів залежать від форми тіла, що обтікається, та властивостей середовища, в якому вони знаходяться. За критичним значенням числа Стокса можна для конкретної перешкоди визначити мінімальний діаметр частинок, що осаджуються на ній

$$d_{min} = \sqrt{\frac{18\mu St_{кр}}{\rho_k U_0}}. \quad (1.7)$$

Частинки з d_{min} припадають на лінію потоку газу, що проходить через вісь перешкоди, з інших ліній потоку газу вони не осаджуються. Таким чином, $St_{кр}$ – це критерій осадження найменших частинок на перешкоді в цілому. Чим вище $St_{кр}$, тим більше розмір частинок, що не осіли на перешкоді за інших рівних умов. Ефект осадження підсилюється при збільшенні густини частинок, швидкості потоку й зменшення характерного розміру (діаметра) перешкоди. Згідно [21,84] при потенційному обтіканні потоком необмеженої плоскої пластини $St_{кр} = 0,250$. Розрахунки за формулою (1.7) показують, що мінімальний діаметр частинок, що осаджуються при струменевому обтіканні пластини становить для швидкостей u_0 рівних 10; 20; і 30 м/с відповідно 8,7; 6,14 і 5,0 мкм. Ці значення відповідають заданим величинам: $d_0 = 0,008$ м; $\mu = 0,2 \cdot 10^{-4}$ Н·с/м²; $\rho_k = 950$ кг/м³.

Для інтенсифікації інерційного осадження великих частинок необхідно збільшувати швидкості потоку та вибирати перешкоди з мінімальним $St_{кр}$.

Обтікання перешкод може супроводжуватися процесами відриву пристінного шару, що характерно для початкової ділянки потоку [84] та іншими ефектами, наприклад турбулентної дифузії і турбофореzu [31].

Розрахунки турбулентно-дифузійного переносу частинок проводять, найчастіше, на основі першого закону Фіка для турбулентних потоків [84]. В роботах [84, 89] припускають існування поруч з турбулентною дифузією додаткового переносу частинок у пристінній області – турбофореzu. Максимальне значення пульсацій спостерігається на границі в'язкого підшару,

нульові – на стінці. На цьому засновані моделі турбофоретичного переносу частинок.

Для вловлювання частинок у волокнистих і сітчастих фільтрах використовуються ефекти дотикання й коагуляції (рис. 1.2).

Ситовий ефект спостерігається коли діаметри частинок більше прохідних розмірів найменших елементів сітки. Безперервне осадження крапель на дротах сітки призводить до їхнього злиття й утворення плівки. У кутках елементів рідина накопичується під впливом перепадів тисків, що виникають внаслідок утворення ввігнутої поверхні розподілу. Плівка під впливом капілярних сил стягується в кутки елементів, де рідина утворює ввігнуту поверхню зі зниженим тиском. Перепад тиску визначається рівнянням:

$$\Delta p = 2 \sigma / R_{крв}, \quad (1.8)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідини;

$R_{крв}$ – радіус кривизни ввігнутої поверхні рідини в кутках елементів.

Накопичення рідини в кутках елементів розглядається як своєрідна "коагуляція" крапель, що переносяться потоком, який підлягає очищенню (рис. 1.1). Великі обсяги рідини з кутків елементів можуть відводитися на поверхню пластини, або зриватися потоком і нестися в зони їх вловлювання. Важливо відзначити, що ефект коагуляції здійснюється за рахунок капілярних сил без додаткових затрат енергії.

1.3. Сучасний підхід для очищення стиснутих газів енергетичних установок

В енергетичних установках для очищення стиснутого газу знайшли застосування силові поля, фільтрація та сорбція. У схемах і пристроях очищення часто послідовно використовують кілька способів очищення. Область застосування цих засобів і їх ефективність для промислового очищення газів визначаються характеристиками очисних пристроїв, що реалізують зазначені способи [19].

Основними характеристиками очисних пристроїв є: ефективність очищення; гідравлічний (аеродинамічний) опір; витратна характеристика; термін служби.

В даний час не існує єдиного критерію оцінки якості різних пристроїв очищення за цими параметрами. В технічних даних часто вказують пропускну здатність або номінальну витрату газу як параметр, що визначає витрату газу при найбільшому рекомендованому перепаді тиску, або при найбільшій швидкості середовища, яка встановлюється виходячи з умов забезпечення ефективності очищення. Для пристроїв очищення інерційного типу вказують також величину найменшої швидкості потоку, при якій ще забезпечується задана ефективність.

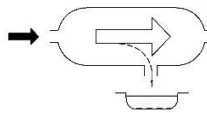
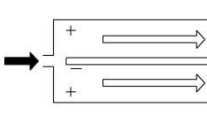
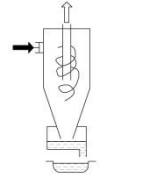
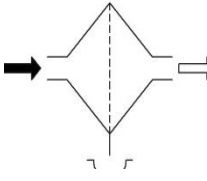
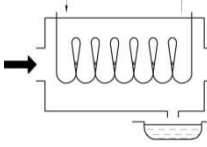
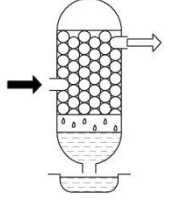
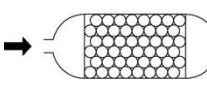
Для подібних пристроїв термін служби пов'язаний з тривалістю роботи до заміни або регенерації фільтроелементів, електродів або адсорбентів. Термостійкість визначає робочі інтервали температури навколишнього середовища і потоку стиснутого газу, в яких гарантується нормальна робота пристроїв очищення та осушення.

Способи очищення мають багато різновидів, ефективність яких може змінюватися в зазначених межах в залежності від конструктивних параметрів, концентрації, дисперсності та виду забруднень. Узагальнено вони наведені в табл. 1.2.

Процес очищення стиснутого газу від забруднень внаслідок їх взаємодії з елементами пористої перегородки називається фільтрацією [8,34,35,50,125]. Фільтруючі матеріали (пористі перегородки) умовно поділяють на два види: поверхневі (частинки утримуються поверхнею фільтруючого матеріалу) та об'ємні (частинки утримуються не тільки на поверхні, але і в товщі фільтруючого матеріалу). До поверхневих фільтруючих матеріалів відносяться сітки, папір, тканини, до об'ємних - картон, металокераміка, кераміка, волок і т.д., а також пакети, що складаються з декількох шарів поверхневих фільтруючих матеріалів.

Таблиця 1.2

Способи очистки стиснутих газів [19]

Спосіб очищення газу	Схема пристроїв, які застосовуються для очищення газу	Ефективність очищення	Гідравлічний опір, Па	Пропускна здатність, м³/хв	Строк служби	Початкова вартість пристроїв, у.о.	Експлуатаційні видатки на 1000 м³ повітря, у.о.												
Застосуванням силових полів: гравітаційний		$\eta = 20 \div 60 \%$; $d_{min} = 60 \text{ мкм}$	50-100	0-500	Не лімітується	500	0,001-0,01												
електростатичний		$\eta = 70 \div 85 \%$; $d_{min} = 0,01 \text{ мкм}$	50-500	0-400	Не лімітується	12000-18000	0,5-0,8												
інерційний		$\eta = 40 \div 70 \%$; $d_{min} = 10 \text{ мкм}$	250-15000	0,04-400	Не лімітується	200-1500	0,01-0,25												
Фільтрація: груба, нормальна, тонка, особливо тонка		<table><tr><th colspan="2">Тонкість фільтрації</th></tr><tr><th>номінальна</th><th>абсолютна</th></tr><tr><td>60</td><td>100</td></tr><tr><td>25-60</td><td>40-80</td></tr><tr><td>5-25</td><td>10-40</td></tr><tr><td>0,2-1</td><td>0,3-5</td></tr></table>	Тонкість фільтрації		номінальна	абсолютна	60	100	25-60	40-80	5-25	10-40	0,2-1	0,3-5	2000-50000	0-16	6000-10000 год (з регенерацією фільтрів)	200-1500	0,01-0,25
Тонкість фільтрації																			
номінальна	абсолютна																		
60	100																		
25-60	40-80																		
5-25	10-40																		
0,2-1	0,3-5																		
Осушення: охолодження		Точка роси 2-10 °С	50-500	0-500	Не лімітується	7500-10000	0,03-0,1												
абсорбція		Точка роси 5-20 °С	4000-8000	0-320	Не лімітується	2800-3800	0,05-0,25												
адсорбція		Точка роси (-10) ÷ (-80) °С	4000-10000	0-100	6 років	9000-16000	0,3-1,2												

Найбільше застосування для очищення стиснутого газу пневматичних систем отримали металокерамічні і волокнисті фільтруючі матеріали.[19] Металокерамічні фільтруючі матеріали застосовують в переважній більшості сучасних конструкцій фільтрів-вологовіддільників, які мають тонкість фільтрації від 5 до 75 мкм. Це пояснюється їх міцністю, температурною стійкістю в широкому діапазоні, можливістю отримання деталей практично будь-якої форми, доброю оброблюваністю, досить високою однорідністю пір. Однак такі фільтри вимагають частої заміни фільтроелементів.

Високою ефективністю вловлювання тонкодисперстних аерозолів мають фільтри з пористих і волокнистих матеріалів. Коефіцієнт вловлювання таких фільтрів визначається пористістю матеріалу, його товщиною й величиною контактної поверхні. Так, наприклад, англійська фірма "Vokes" [65] випускає фільтри різної продуктивності; у якості фільтруючого матеріалу тут застосовується папір, металокераміка, бавовняні волокна, активоване вугілля, синтетичні матеріали, мінеральна вата та ін.

З рекламних матеріалів фірми видно, що за допомогою таких фільтрів можна досить ефективно очищати гази від тонкодисперстного рідкого аерозолу. Істотним їх недоліком є високий аеродинамічний опір, низька ступінь осадження, необхідність регенерації.

Останнім часом з'явилися конструкції фільтрів, у яких передбачається відвід вловлених рідких частинок за допомогою різних конструктивних заходів. Так, у деяких конструкціях [11] вловлений аерозоль під дією градієнта капілярних сил стягується до периферійних зон і стікає по спеціальних канавках. Однак у ряді випадків капілярні сили в місцях, де матеріал фільтру стиснуто, значно перевищують сили тяжіння і краплі в канавки не стікають. Для покращання їх роботи автори [11] пропонують обладнання для струшування фільтра, що зменшує надійність роботи агрегату очищення в цілому, а також ускладнює його конструкцію.

В ряді конструкцій [21] вловлений аерозоль відводиться з фільтруючого матеріалу за допомогою відцентрових сил. Для цього фільтруючий матеріал

закріплюється на роторі, в середину якого подається полідисперсна фаза, що очищається. Проходячи через фільтруючий матеріал, газ очищається від крапельок рідини, яке відцентровими силами відкидається на внутрішню стінку корпусу.

Розроблений в НДІСТ електричний сепаратор типу МВУ-30 [23] при швидкості потоку 2 м/с, напрузі на коронуючих електродах 13,2 кВ і концентрації рідкого аерозолі до фільтра 0,078-0,279 г/м³ забезпечує ефективність вловлювання в середньому 80-90 %. При цьому вловлюється аерозоль, що отримується у результаті конденсації парів середовища. Основні недоліки електричних фільтрів: великі габарити, висока напруга, що вимагає додаткових заходів електробезпеки, закоксовування електроприладів.

Комбіновані сепаратори одержали широке поширення, тому що шляхом об'єднання декількох способів вловлювання аерозолів в одному агрегаті можна вирішувати завдання очищення газів у різних галузях промисловості. Так, у США на двигунах внутрішнього згоряння встановлюється багатоступінчастий сепаратор [23,125], призначений для очищення картерних газів від крапель масла. У цьому сепараторі дрібні краплі коагулюють у волокнистому фільтруючому патроні-коагуляторі, а потім великі краплі вловлюються на спеціальному спіралевидному сепаруючому елементі. Ряд варіантів комбінованих краплевловлювачів запропоновано у роботі [1,2].

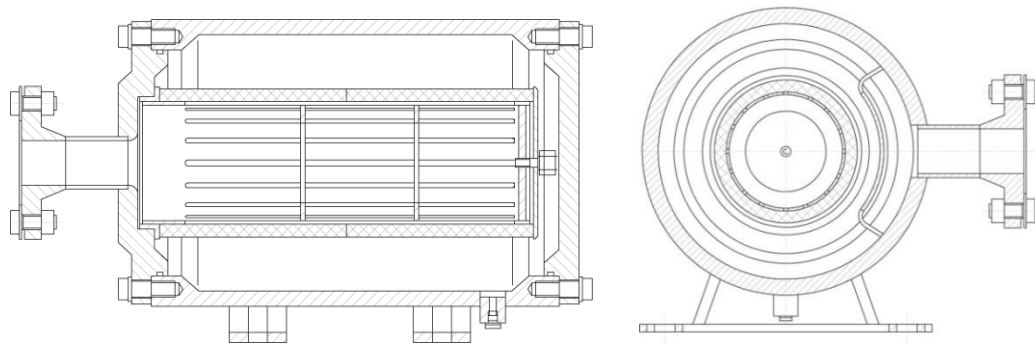
Німецька, іспанська та американська компанії, а саме Pall Corporation, Zander, Contec та Goga, займаються дослідженням та виготовленням сепаруючого обладнання.

Компанія Contec виготовляє сепаратори масляного туману серії SG, RG, DL, SKF/CSF з різноманітними модифікаціями фільтрів.

Сепаратори масляного туману з фільтром зі скловолокна, які мають 2-шарову конструкцію з вбудованою армуючою тканиною, забезпечують постійно високу сепарацію (до 99,99 %) при розмірі крапель 0,1 мкм [34,35].

Фільтри газові ФГ (ТУ У 45.2-13732845-007-2003) призначені для використання в системах газопостачання для очищення природного газу

ГОСТ 5542-87 і інших неагресивних газів від механічних забруднень (пили, іржі, окалини та інших твердих частинок). Фільтр складається з зварного корпусу з приєднувальними патрубками для входу і виходу газу, кришки і заглушки. З боку входу газу всередині корпусу приварений металевий лист, що захищає сітку від прямого попадання твердих часток. Тверді частинки, що надходять з газом, вдаряючись в металевий лист, збираються в нижній частині фільтра, звідки їх періодично видаляють через люк. Усередині корпусу є сітчаста касета, заповнена капроновою ниткою. Тверді частинки, що залишилися в потоці газу, фільтруються в касеті, яка в міру необхідності проčiщується. Для очищення і промивання касети верхню кришку фільтра можна знімати (рис. 1.3).



а)



б)

Рисунок 1.3 – Фільтри очистки паливного газу для ГТУ: а – конструктивні особливості; б – фотографія промислового фільтру ФГ

Для виміру перепаду тиску використовують диференційні манометри, що приєднуються до спеціальних штуцерів. Перед ротаційними лічильниками встановлюють додатковий фільтруючий пристрій - фільтр-ревізію. Умови експлуатації фільтрів повинні відповідати кліматичному виконанню У1 ГОСТ 15150 для роботи при температурі навколишнього середовища від $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Подібні фільтри нашли широке використання в паливних системах сучасних ГТУ, що працюють на газоподібному палива (рис. 1.4) [56,66,68]. Паливна система складається з блока паливних агрегатів, розташованих в окремому укритті, та приладового щита, розміщеного у блоці двигуна. Блок фільтрації паливного газу призначений для очищення від механічних домішок газу, який подається у паливну систему. Він складається з трьох секцій, змонтованих на загальній рамі, і датчика-реле різниці тисків. До складу кожної секції входить газовий фільтр, кульові крани з ручним приводом підведення та відведення газу і клапани.

Відмітимо, що фільтруючі елементи, які забезпечують високий ступінь очищення паливного газу, мають високу ціну та потребують заміни при їх заповненні вловленою фазою – вони не можуть саморегенеруватись. Представляють перспективу механічні фільтри, які використовують для очищення сили гідродинамічної природи в сукупності з сучасними методами інтенсифікації процесів очищення, які мають необмежений ресурс та високу ефективність очистки та надійність.

Одним з перспективних напрямків в розвитку суднових і стаціонарних енергетичних установок є створення газотурбінних установок замкнутого циклу. Доцільність використання в енергетиці ГТУ закритого циклу розглядається у зв'язку появою ефективних високотемпературних газоохолоджуваних реакторів. Виконані попередні дослідження та проектні розробки показали реальну можливість створення ГТУ замкнутого циклу потужністю від 10 до 1000 МВт і більше [56,68].



Рисунок 1.4 – Паливна система ГТУ, що працює на газоподібному паливі:
 1, 13, 14 – датчики-реле різниці тисків; 2 – фільтр газовий; 3 – агрегат керування; 3.1, 3.2, 3.3 – електромагнітні клапани відповідно відкриття стоп-крана, закриття стоп-крана і пускового газу; 4 – стоп-кран; 4.1 – сигналізатор положення; 5 – з'єднувальна коробка паливних агрегатів; 6, 9, 10, 11, 12 – перетворювачі тиску; 7, 8 – регулюючі клапани; 15, 16 – манометричні крани

Основні переваги ГТУ замкнутого циклу перед звичайними ГТУ відкритого циклу: більша агрегатна потужність, менші габарити теплообмінних апаратів, простота регулювання потужності зміною тиску в контурі, відсутність відкладень та ерозії проточних частин турбін і компресорів, стійкість конструкційних матеріалів при високих температурах з-зі відсутності кисню та домішок.

Робоче тіло таких установок (гелій, азот, вуглекислий газ і ін.) не повинно вступати в контакт з маслом системи змащування турбоагрегату в основному робочому контурі. Тому в схемах ущільнення валів ГТУ замкнутого циклу завжди повинні бути передбачені пристрої для очистки робочого тіла від масла (рис. 1.5) [102].

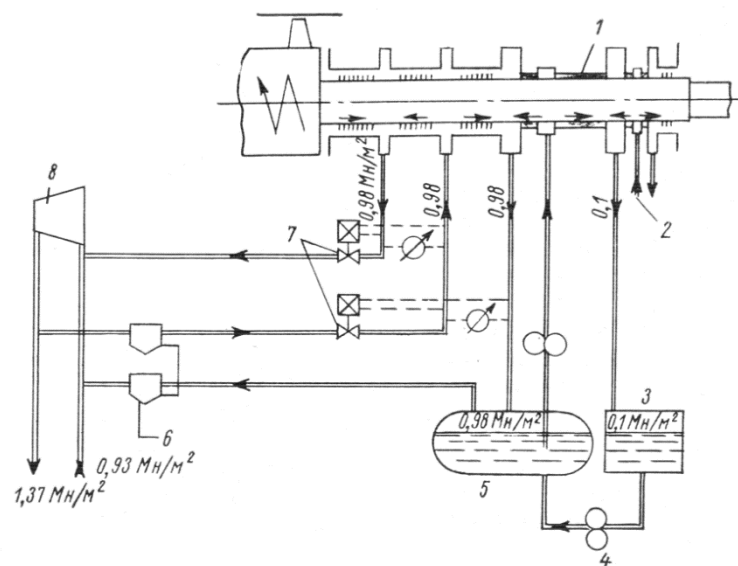


Рисунок 1.5 – Принципова схема ущільнення вала турбіни ядерної ГТУ замкнутого циклу:

- 1 – підшипник з масляним ущільненням; 2 – затвор між гелієм і повітрям;
- 3 – закритий бак з маслом; 4 – масляний насос; 5 – бак з маслом під тиском;
- 6 – очистка гелію; 7 – система регулювання подачі гелію до ущільнення;
- 8 – компресор низького тиску

На відміну від схем суфлювання ГТУ відкритого циклу суміш робочого тіла і масла після ущільнень спрямовується в спеціальний закритий бак під тиском. Наділі відбувається очистка стиснутого газу і відокремлення робочого

тіла від масла, після чого робоче тіло повертається в цикл установки, а масло - в систему змащування турбокомпресорного агрегату.

Відмітимо, що практично відсутні теоретичні і експериментальні дані відносно використання статичних сепараторів-масловіддільників для очистки багатозфазних сумішей в умовах високих тисків, хоча необхідність їх створення для ГТУ замкнутого циклу обумовлена, наприклад, спробами створення подібних установок (схема "Аксамит" [102]) для привода електрогенератора потужністю 3000 кВт. В цій установці для передачі теплоти до штатного повітрянагрівачу (на дизельному пальному) використовувався сплав натрій-калій [102].

Науково-дослідний інститут (НДІ) проблем екології та енергозбереження НУК розробив для систем суфлювання газотурбінних двигунів 2-4 поколінь виробництва ДП НВКГ "Зоря"-“Машпроект” (м. Миколаїв) статичні сепаратори (суфлери) – масловіддільники [85,99,100]. Такі статичні сепаратори знайшли широке застосування в енергетиці (рис. 1.6).

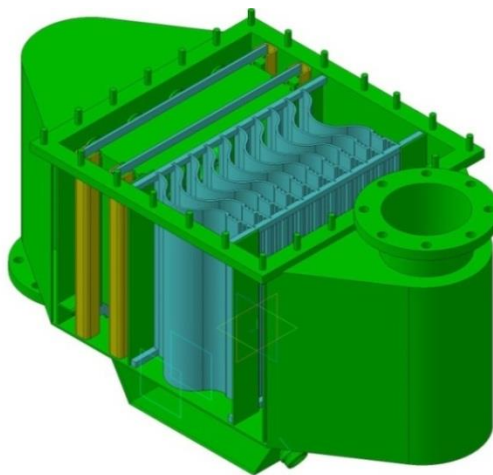


Рисунок 1.6 – Типовий високоефективний статичний сепаратор (суфлер, розроблений в НУК [9,85,99]

Коефіцієнт сумарної ефективності очищення таких пристроїв перевищує 99 % в інтервалі витрат газу від 50 до 2000 м³/год і вхідних концентраціях забруднювача від 0,1 до 2,5 кг/м³. Подібні конструкції суфлерів були розроблені для різних типів енергетичних установок [9,85,99].

Позитивний досвід експлуатації статичних сепараторів у складі газотурбінних установок показав, що вони забезпечують необхідну ступінь очищення. Потокова ступінь сепаратора дозволяє вловлювати, за рахунок сил інерції, краплі діаметром до 20 мкм. Ступінь очищення з сітковим коагулятором дозволяє повністю вловлювати краплі аерозолі діаметром більше від 5 мкм. При цьому коагулятори виконуються із 5-25 рядів сіток з діаметрами дротів від 0,25 до 0,5 мм [9,99]. Але запропонована в таких пристроях конструкція корпусу не може використовуватись для очистки стиснутих газів.

Для стиснутого повітря низького і середнього тисків, тобто в діапазоні тисків від 0,6 до 6,0 МПа, в НДІ проблем екології та енергозбереження НУК розроблено струминні маслотовологовіддільники [9,99]. Вони охоплюють інтервал витрат стиснутого повітря від 50 до 2000 м³/год і забезпечують очистку стиснутого повітря за 3-м класом чистоти (повністю уловлюють частки більше 5 мкм). Маслотовологовіддільники засновані на струминному базовому модулі (рис.1.7) та створені за модульним принципом, тобто на наборі типових модулів на такі витрати: 100; 250; 500 м³/год. Модулі відрізняються лише прохідним перерізом сопел і коагулятора.

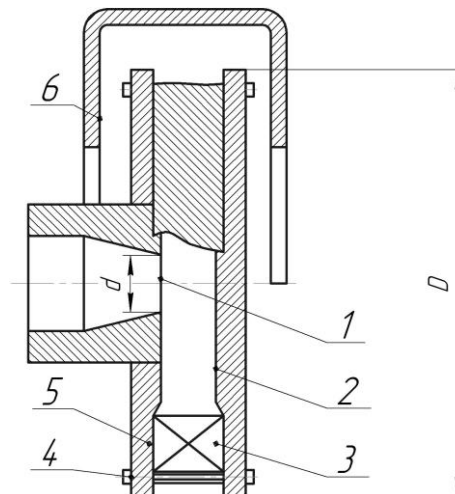


Рисунок 1.7 – Типовий струминний модуль з П-подібною оболонкою:
 1 – сопло; 2 – пластина; 3 – коагулятор; 4 – проставки; 5 – екран;
 6 – П-подібна оболонка

Модулі маслотовологовіддільника можуть розташовуватися на роздавальнику газу з різних сторін, як показано на рис.1.8. Крім цього, щоб уникнути винесення великих крапель у верхню частину корпусу передбачена установка козирка у вигляді півциліндричної П-подібної форми. Прохідний переріз оболонки збільшується в напрямку руху; це забезпечує гравітаційне осадження частинок, що виносяться із коагулятора в нижній частині корпусу та виводяться з корпусу через конденсатовідвідник. Застосування подібних струминних масловіддільників для очистки паливного газу двигунів та в системах суфлювання ГТУ замкнутого циклу визиває потребу інтенсифікації процесів уловлення частинок за рахунок сил інерції, турбофореzu та відводу осадженої плівки рідини з метою підвищення ефективності очищення, покращання масогабаритних показників та підвищення надійності функціонування пристроїв.

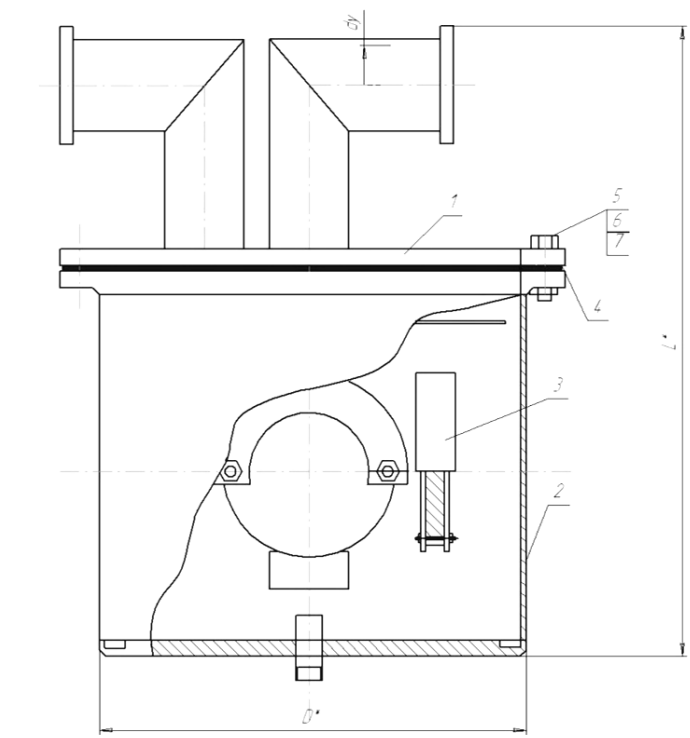


Рисунок 1.8 – Струминний маслотовологовіддільник з чотирма струминними модулями [9,73]

Одним з напрямів підвищення економічності, екологічності та надійності ГТУ є створення високоефективних турбоімпаkтних сепараторів

паливного газу ГТД та сепараторів масла систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу, що потребує вдосконалення способів інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу полідисперсної фази при очищенні багатофазних сумішей паливного газу та стиснутого повітря підвищеного тиску для сучасних газотурбінних енергетичних систем. Це зумовило проведення досліджень, результати яких висвітлено в цій роботі.

Основні результати і висновки по розділу 1

1. На основі обзору вітчизняної та закордонної технічної літератури розглянуто джерела забруднення стиснутих газів ГТУ та визначено, що найбільшу частину забруднень паливних газів ГТД складають конденсат палива та тверді домішки, а для систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу – масло.

2. Розглянуто основи очищення стиснутих газів гідродинамічними методами. Встановлено, що для очищення стиснутих газів в теперішній час використовують різноманітні силові поля: гравітаційне, інерційні, турбофоретичні, електрофоретичні та ін., вплив яких на ефективність очищення залежить від конструктивних параметрів системи, початкової концентрації та виду забруднень, розподілу фракцій за розмірами. Такі силові поля можливо ефективно використовувати для очистки газів при тисках до 10–20 МПа.

3. Виявлено, що одним із напрямів підвищення економічності, екологічності та надійності газотурбінних установок є створення високоефективних турбоімпактних сепараторів паливного газу високого тиску та сепараторів масла систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу, що потребує вдосконалення способів інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу полідисперсної фази при очищенні багатофазних сумішей паливного газу та стиснутого повітря для сучасних газотурбінних енергетичних систем.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ТА ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ОЧИЩЕННЯ СТИСНУТИХ ГАЗІВ ДЛЯ ГТУ

2.1. Обґрунтування напрямків наукового дослідження

Розв'язання задач підвищення ефективності ГТУ на основі створення високоефективного турбоімпаکتного сепаратора стиснутих газів доцільно проводити відповідно до загальноприйнятої методології наукових досліджень [95]. На рис. 2.1 представлена логічна схема наукового дослідження.



Рисунок 2.1 – Логічна схема наукового дослідження

Конкретна прикладна задача в рамках загальної проблеми енерго- та ресурсозбереження в Україні, вирішення якої передбачається у роботі, є підвищення технічного рівня газотурбінних енергетичних установок. Задача очищення багатofазних сумішей палив підвищеного тиску для ГТУ пов'язана з технологіями транспортування природного газу в магістральних мережах України та супутнього газового палива - при видобуванні нафти. Аналіз результатів, отриманих вітчизняними та іноземними вченими із цієї проблеми, показав, що питання енергозбереження для газотурбінних установок стають особливо **актуальними**. Впровадження нових газо-паротурбінних установок зі змішаним циклом виявило актуальність задачі очищення багатofазних сумішей палив підвищеного тиску від рідинної, твердої та парової фаз, що впливає на економічність і надійність установки. Одним з напрямів її розв'язання є створення високоефективних турбоімпульсних сепараторів багатofазних сумішей палив підвищеного тиску, що використовуються для роботи ГТД, та сепараторів масла систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу. Підвищення якості очищення дозволить не тільки забезпечити безаварійну експлуатацію ГТУ, зменшити забруднення навколишнього середовища, а також знизити використання палива та скоротити втрати цінних матеріалів (масел) в системах суфлювання. Особливу проблему в процесах очищення стиснутих паливних сумішей ГТУ становить уловлювання полідисперсної фази в широкому діапазоні розмірів частинок, що коливаються від крупних (діаметром більше 100 мкм) до малих (менше 10-2 мкм) конденсаційного походження при тисках 0,1-5,0 МПа. Створення технологій по розділенню багатofазних середовищ з використанням нових методів уловлювання фаз є значним резервом енергозбереження. Має перспективу розробка інноваційних методів з використанням турбоімпульсних ефектів для уловлювання полідисперсної фази багатofазних сумішей палив підвищеного тиску для газотурбінних установок. Фактично на даний час відсутні достовірні теоретичні і експериментальні дані стосовно особливостей процесів газодинаміки та масопереносу турбулентних двофазних течій у багатofазних

сумішах газів підвищеного тиску. Це ускладнює створення високоефективних енерго- ресурсозберігаючих технологій та ефективних схемних рішень для широкого класу сепараторів стиснутих газів та їх сумішей для газотурбінних енергетичних установок.

Досягнення високих показників економічності, надійності, екологічності, низької вартості життєвого циклу можливо в енергоустановках зі складними парогазовими та газопаровими циклами, а також в установках замкнутого циклу. Такі установки потребують створення енергоефективних двигунів з відповідним обладнанням для систем: сепарації робочих паливних сумішей високого тиску; суфлювання ГТУ замкнутого циклу; стиснутого повітря при утилізації робочої рідини. В вирішенні питань очистки паливних сумішей та стиснутих газів з одночасною утилізацією теплоти і маси робочої рідини вважається перспективним напрямком вдосконалення методів інтенсифікації процесів **турбоімпаکتного переносу** полідисперсної фази при очищенні багатофазних сумішей паливного газу та стиснутого повітря підвищеного тиску для сучасних газотурбінних енергетичних систем. Під турбоімпактним переносом розуміється перенос при обтіканні перешкод високотурбулентними струменями та їх системами під дією сил інерції, турбофорезу та турбулентної дифузії. Такі системи дозволяють використовувати великі швидкості потоку та відривні течії для ефективного уловлення мікрочастинок за рахунок гідродинамічних сил (енергопотенціалу самих газових середовищ) з відводом утвореної плівки за рахунок капілярних сил та сил тяжіння. В теперішній час відсутні надійні данні та варіанти схемних рішень по турбоімпактним сепараторам стиснутих газів для ГТУ, що визиває необхідність проведення теоретичних та експериментальних досліджень.

Метою наукового дослідження є створення високоефективного саморегенеруючого сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок на основі запропонованих схемних рішень з інтенсифікації процесів турбоімпаکتного переносу.

Основні задачі наукового дослідження:

- аналіз ефективних схем очищення стиснутих газів та вибір перспективних напрямки зі створення гідродинамічних саморегенеруючих сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок;
- адаптація математичних моделей гідродинамічних процесів та переносу полідисперсного середовища в сепараторах стиснутих газів на основі сучасних пакетів обчислювальної гідродинаміки;
- розробка схемних рішень пристроїв турбоімпаکتної сепарації стиснутих газів та проведення їх теоретичних досліджень на основі адаптованої математичної моделі;
- вибір раціональної конструктивної схеми турбоімпактного сепаратору та проведення тривимірних досліджень його робочого процесу;
- виготовлення моделей та дослідних зразків турбоімпактних сепараторів та розробка програми їх експериментальних досліджень;
- розробка експериментальних стендів для дослідження процесів в сепараторах стиснутих газів для ГТУ з використанням фотоелектричних лічильників частинок та аналітичних фільтрів;
- верифікація адаптованої математичної моделі процесів очищення стиснутих газів та розробка рекомендацій з проектування сепараторів;
- розробка робочих креслень на турбоімпактні сепаратори стиснутих газів для очищення паливного газу ГТУ та масловіддільника для ГТУ замкнутого циклу.

Схема дисертаційного дослідження по створенню турбоімпактного сепаратора стиснутих газів для ГТУ представлена на рис. 2.2.

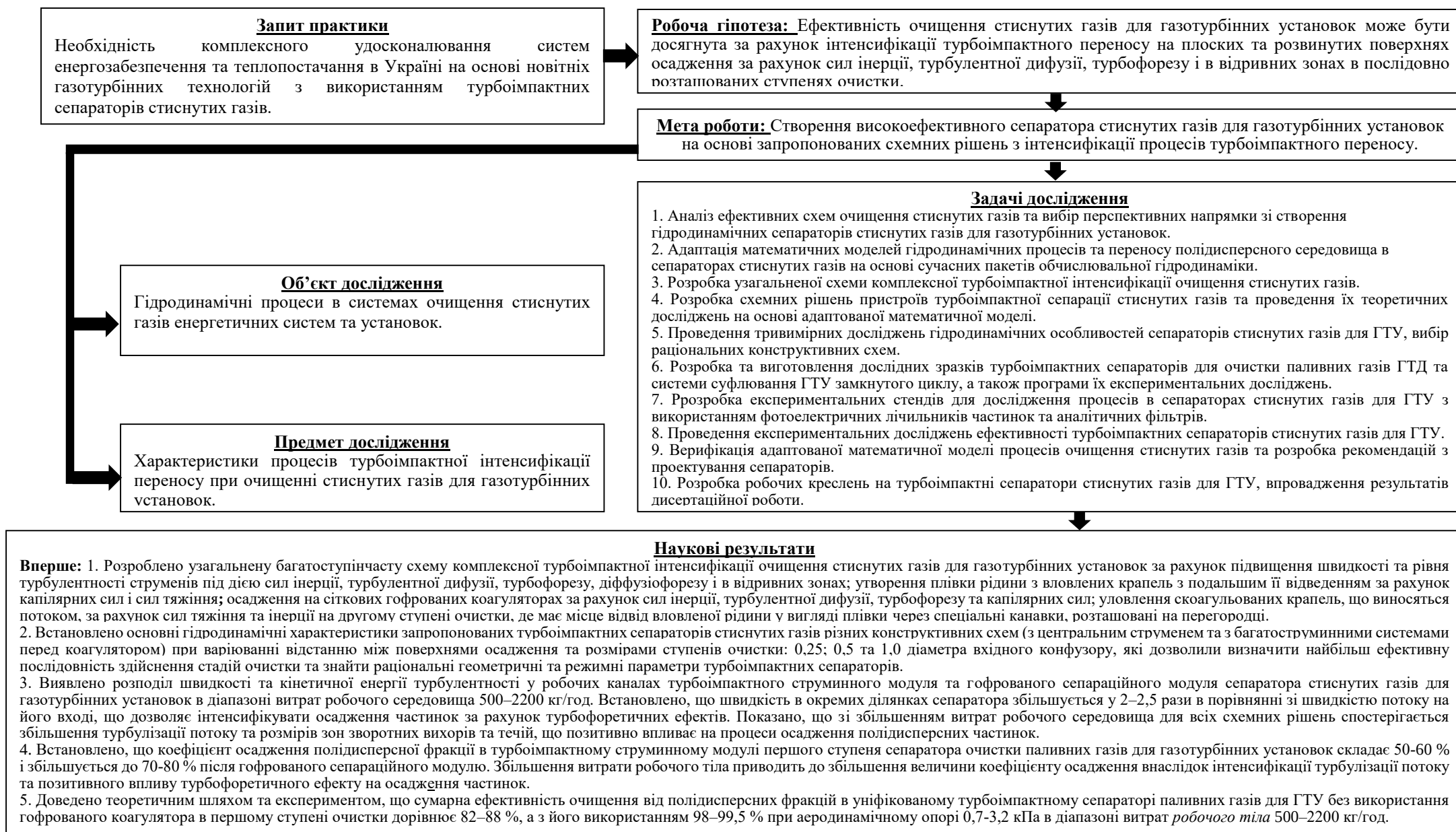


Рисунок 2.2. – Схема дисертаційного дослідження

2.2. Методи теоретичних досліджень процесів турбоімпактного переносу

Для теоретичного аналізу процесів осадження частинок в дисперсному двофазному турбулентному газовому потоці підвищеного тиску в турбоімпактних сепараторах ГТУ застосований системний підхід. Надзвичайна складність процесів, що протікають в цих середовищах, приводить до появи ряду складних теоретичних моделей руху, переносу енергії і маси [1,2, 7,14,24,39,47,50,78,90,97,124].

Рух потоків в реальних умовах, де мають місце значні градієнти швидкостей і концентрацій в поздовжньому і поперечному напрямках, описується рівняннями еліптичного типу, які розв'язуються зазвичай числовими кінцево-різницевиими методами.

Метод розрахунку турбулентних потоків при відривному обтіканні пластин і в коагуляторах газоочисних пристроїв ГТУ передбачає послідовну процедуру числового інтегрування рівнянь, що моделюють як газоподібні в'язкі потоки, так і протікання струменів рідини. На першому етапі визначаються гідродинамічні характеристики газоподібної фази з урахуванням турбулентності потоків, на другому - джерельні члени, що моделюють взаємний вплив рідкої і газоподібної фаз, а також транспортні характеристики дисперсної фази і розподіл швидкостей і траєкторій усередині розрахункової області. Такі розрахунки проводять послідовно до досягнення збіжності всіх параметрів в часі і просторі.

Сучасні програмні засоби, такі як універсальний програмний комплекс ANSYS Fluent [126], дозволяють проводити детальні двовимірні та тривимірні розрахунки характеристик дисперсних двофазних середовищ, проте для верифікації теоретичних результатів необхідні достовірні експериментальні дані, що визначають початкові та граничні умови. Узагальненням аналізу є розробка математичної моделі турбоімпактного переносу, яка дозволить проводити розрахунок основних параметрів дисперсного двофазного турбулентного середовища, а також осадження частинок в сепараторах стиснутих газів для ГТУ.

При розрахунках руху в'язкого газу застосовувалися такі припущення: газ досконалий, тобто тиск p , густина і абсолютна температура T відповідають закону Клапейрона; газ являє собою «ньютонівське середовище», підпорядковане узагальненому закону Ньютона про лінійний зв'язку між тензором напруг і тензором швидкостей деформації.

2.3. Узагальнена математична модель турбоімпаکتного сепаратора стиснутих газів для ГТУ

Для практичного застосування найбільш ефективними вважають методи, засновані на усередненні системи рівнянь в часткових похідних, що описують універсальні закони збереження маси, енергії, імпульсу в турбулентній системі [90,97]. Ця система повинна бути доповнена рівняннями стану і зв'язку параметрів, а також початковими і граничними умовами.

Загальне транспортне рівняння переносу змінної F має вигляд [90] :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau}(\alpha F) + \frac{\partial}{\partial x}(\beta u_{xf} F) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y}(r \beta u_{yf} F) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z}(r \beta u_{zf} F) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_e^F \frac{\partial F}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial y} \left(r \Gamma_e^F \frac{\partial F}{\partial y} \right) + \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_e^F \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial z} \right) + m_{inj} F_{inj} + S_F - s_F \alpha F. \end{aligned} \quad (2.1)$$

де τ – час; α, β – коефіцієнти; x, y, z – декартові координати (для циліндричної системи координати x, r, θ відповідно); u_{xf}, u_{yf}, u_{zf} – компоненти швидкості в напрямках x, y, z ; r – радіус в циліндричній системі (для декартових координат $r = 1$); Γ_e^F – тензор переносу; m_{inj} – маса рідини, що інжектуюється в одиницю об'єму за одиницю часу; F_{inj} – кількість величини F , що переноситься в інжектованій масі; S_F – джерельний член для змінної F ; s_F – член, що характеризує швидкість виведення величини F .

Базова система при розв'язуванні задачі турбоімпаکتного уловлювання аерозолів і твердих частинок на поверхні пластини і в коагуляторі містить

рівняння нерозривності (змінна – густина суміші ρ), три рівняння переносу імпульсу (змінні – u_{xf}, u_{yf}, u_{zf}), рівняння збереження енергії (змінна – ентальпія гальмування h_s), а також рівняння для кінетичної енергії турбулентності K і ступеня дисипації турбулентної енергії ε .

Кінетична енергія турбулентності

$$K = \frac{1}{2} (u' u' + v' v' + w' w')$$

де $u' u'; v' v'; w' w'$ – автокореляції турбулентних пульсацій компонентів швидкості.

Ентальпія гальмування

$$h_s = \sum_j m_j h_j + \frac{1}{2} (u_{xf}^2 + u_{yf}^2 + u_{zf}^2) + K,$$

де m_j – масова частка j -ї частки; h_j – ентальпія її утворення.

Всі перераховані вище змінні підставляються в загальне транспортне рівняння (2.1). Коефіцієнти і джерельні члени для цих змінних представлені в табл. 2.1. Члени S_i та P_k , що з'являються в цій таблиці, визначаються за наступними залежностями:

$$S_i = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_i + \frac{\partial u_{yfj}}{\partial x_i} - \frac{4\partial \mu_e}{3\partial x_i} - \frac{1}{3}\mu_e \frac{\partial D}{\partial x_i}; \quad D = \frac{\partial u_{yfi}}{\partial x_i};$$

$$P_k = \mu_e \left(\frac{\partial u_{yfj}}{\partial x_i} + \frac{\partial u_{yfi}}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_{yfj}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}(\rho k + \mu_e D)D + \frac{\mu_e}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial P}{\partial x_i}. \quad (2.2)$$

У формулах (2.2) p – тиск суміші; g_i – прискорення вільного падіння в напрямку i ; μ_e – коефіцієнт ефективної в'язкості.

Відзначимо, що в табл. 2.1 величина Γ_e^F являє собою ефективний коефіцієнт дифузії для змінної F , а $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ – константи моделі турбулентності.

Таблиця 2.1

Коефіцієнти рівнянь переносу змінних

F	α	β	Γ_e^F	S_F	s_F
ρ	1	1	0	0	0
u_{xf}	ρ	ρ	μ_e	S_1	0
u_{yf}	ρ	ρ	μ_e	$S_2 - (\partial/\partial y)[\mu_e(u_{yf} + 2\partial u_{zx}/\partial z)/r^2 - \rho u_{zf}^2/r]$	0
u_{zf}	ρ	ρ	μ_e	$S_3 - (\partial/\partial y)[\mu_e(u_{zf} - 2\partial u_{yf}/\partial z)/r^2 + \rho u_{yf}u_{zf}/r]$	0
h_s	ρ	ρ	Γ_e^h	P_k	0
K	ρ	ρ	μ_e	P_k	ε/k
ε	ρ	ρ	Γ_e^ε	$C_{\varepsilon_1} P_k \varepsilon/k$	$C_{\varepsilon_2} \varepsilon/k$

Густина суміші компонентів знаходиться за формулою

$$\rho = \frac{p + p^*}{RT \sum_j m_j / M_j},$$

де p^* – базове значення тиску; R – універсальна газова стала; T – температура; M_j – молекулярна вага компонента j .

Коефіцієнт ефективної в'язкості для турбулентного потоку

$$\mu_e = \mu + \mu_t,$$

де μ, μ_t – відповідно коефіцієнти молекулярної і турбулентної в'язкості.

Згідно з $k - \varepsilon$ моделлю турбулентності

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon,$$

де C_μ – емпірична константа.

Ефективний коефіцієнт дифузії

$$\Gamma_e^F = \mu / \sigma^F + \mu_t / \sigma_t^F = \mu_e / \sigma_e^F,$$

де $\sigma^F, \sigma_t^F, \sigma_e^F$ – числа Прандтля (Шмідта) для змінної F .

Найбільш загальна форма граничних умов для транспортного рівняння (2.1) наступна:

$$-\Gamma \frac{\partial F}{\partial N} = h_F (F - F_0) + q_F,$$

де N – напрямок нормалі до границі; h_F – коефіцієнт переносу рідини, теплоти або маси; F_0 – рівноважна величина змінної; q_F – градієнт або потік рідини, теплоти чи компонентів.

При розрахунках зміни параметрів поблизу стінки використано логарифмічний закон :

$$u_{xf} = u_{xf_w} + (u^* / K) \ln(Ey^+),$$

де u_{xf} – компонент швидкості, паралельний стінці; u_{xf_w} – її значення на стінці; u^* – швидкість тертя; $K_{кар}$ – константа Кармана; $E_{лог}$ – константа логарифмічного закону; y^+ – безрозмірна відстань від стінки.

Величини u^* та y^+ знаходяться наступним чином:

$$u^* = (\tau_w / \rho)^{1/2}; \quad y^+ = \rho u^* y / \mu,$$

де τ_w – напруги зсуву; y – відстань від стінки.

Для $k - \varepsilon$ моделі турбулентності в районі стінки

$$u^* = C \mu^{1/4} k^{1/2}; \quad \varepsilon = u^{*3} / (y K_{кар}),$$

де C – константа.

Для моделювання траєкторій частинок розв'язувалось рівняння балансу сил при їх русі, яке враховувало інерцію частинки і основні сили, що впливають на неї. У використаному числовому методі можна розраховувати траєкторію руху частинок в дисперсному двофазному середовищі за допомогою інтегрування рівняння балансу сил руху частинок. У декартових координатах рівняння записується таким чином:

$$\frac{\partial u_k}{\partial t} = F_D + \frac{g_x(\rho_k - \rho)}{\rho_k} + F_i, \quad (2.3)$$

де F_D – сила опору для одиниці маси частинки розраховується за формулою:

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_k d_k^2} \frac{C_D}{24} \text{Re}.$$

Число Рейнольдса Re розраховується наступним чином:

$$\text{Re} = \rho d_k \frac{|u_k - u|}{\mu}.$$

де u – початкова швидкість потоку; u_k – швидкість частинки; μ – молекулярна в'язкість потоку; ρ – густина потоку; ρ_k – густина частинки; d_k – діаметр частинки; F_i – додаткові сили, що впливають на частинку.

Коефіцієнт опору C_D розраховується наступним чином:

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + b_1 \text{Re}^{b_2} \right) + \frac{b_3 \text{Re}}{b_4 + \text{Re}},$$

де b_i – коефіцієнти, що задаються у вигляді поліномів.

Рівняння (2.3) враховує додаткові сили (F_i), які впливають на частинку. Для обліку осадження частинок під дією сили інерції, необхідно враховувати прискорення потоку, що обтікає частинку.

Сила інерції розраховується наступним образом:

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_k} \frac{\partial}{\partial t} (u - u_k).$$

Поперечний зсув частинок може бути викликано не тільки градієнтом середньої швидкості газу, але і неоднорідністю поля його пульсаційних швидкостей. Нерівномірність профілю швидкості призводить до спрямованого зміщення частинки в бік зменшення інтенсивності пульсацій. Цей ефект, звичайно іменований турбулентної міграцією або турбофорезом, розраховується за формулою:

$$F_2 = -0,5m_k \frac{\partial \overline{u_k'^2}}{\partial y}. \quad (2.4)$$

Додаткова сила переносу часток з'являється у разі виникнення перепаду тиску і називається дифузійнофоретичною силою, яку можна розрахувати за формулою:

$$F_3 = \left(\frac{p}{p_w} \right) u_k \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (2.5)$$

де p_w – тиск потоку біля стінки.

2.3. Методи експериментальних досліджень. Оцінка похибок експерименту

Експериментальні дослідження процесів турбоімпаکتного переносу в сепараторах ГТУ виконані з використанням вагового методу за допомогою аналітичних фільтрів, фотоелектричних лічильників і фотометрів аерозолів. Відбір проб проводився через забірні трубки, що служили одночасно трубками повного тиску

При вимірах дотримувалися умови ізокінетичності. Масова концентрація часток в потоці визначалась відбором проби дисперсного двофазного середовища аспіратором і пропускання її через аналітичні фільтри АФА. Фільтри АФА зважувалися на аналітичних вагах з похибкою 0,1 мг до і після взяття проби. За приростом маси фільтра з урахуванням часу і витрати проби газу визначалася концентрація часток за формулою:

$$C = 1000 (m_{\text{вх}} - m_{\text{вих}}) / g_{\text{пр}} \tau. \quad (2.6)$$

Витрата двофазного середовища визначалася по перепаду тисків на витратомірному колекторі.

Ефективність уловлювання аерозолів досліджуваними елементами визначалася за формулою

$$\eta_{\Sigma} = (1 - C_{\text{вих}} / C_{\text{вх}}) 100 \%. \quad (2.7)$$

Перепад тисків - аеродинамічний опір сепаратора визначається по перепаду тисків на вході $p_{\text{вх}}$ і виході $p_{\text{вих}}$ з робочої ділянки за допомогою манометра і трубок повного тиску, які одночасно виконують функцію пробовідбірників за формулою:

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вих}} . \quad (2.8)$$

У формулах (2.6)-(2.8) прийняті наступні умовні позначення: C , $C_{\text{вх}}$, $C_{\text{вих}}$ – концентрація аерозольних часток - загальна, на вході і виході з установки, мг/м³; $m_{\text{вх}}$, $m_{\text{вих}}$ – маса фільтрів до і після проби, мг; $g_{\text{пр}}$ – витрата повітря в період забо+ру проби через аспіратор, л/хв; τ – час, хв; η_{Σ} – коефіцієнт сумарної ефективності очищення, %; Δp – аеродинамічний опір, Па.

У процесі експериментальних досліджень здійснювалися як прямі, так і непрямі вимірювання. Обрані методи вимірювання дозволяли врахувати систематичну складову похибки; значення випадкової складової похибки визначалося класом точності застосовуваних приладів. Тому випадкові похибки прямих вимірювань знаходилися за метрологічними характеристиками приладів. Так, абсолютна похибка визначення зміни маси аналітичних фільтрів на вагах типу ВРЛ становила 0,5 мг. Перепад тисків на чашкових манометрах визначався з абсолютною похибкою 0,02 мм вод. ст.; мікроманометра типу МКВ - 0,01 мм вод. ст.; U - образного - 0,5 мм вод. ст.

Відносна похибка визначення рахункового числа частинок фотоелектричним лічильником АЗ-5 і фотометром аерозолів ФАН У4.2 становила 5 %.

Похибка непрямих вимірювань залежить від точності прямих вимірювань та виду функціональної залежності. Числові значення середньої квадратичної похибки розраховувалися за залежністю [74]:

$$\sigma_y = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial X_1}\right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial X_2}\right)^2 \sigma_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial X_m}\right)^2 \sigma_m^2\right]} , \quad (2.9)$$

де $\left(\frac{\partial f}{\partial X_j}\right)$ – частинна похідна функціональної залежності непрямого виміру по

X_j ($j = 1...m$); σ_j – середня квадратична похибка результату вимірювання.

Непряме вимірювання витрати повітря має відносну похибку 3,5 %. Відносна похибка непрямого вимірювання концентрації частинок склала 3 %.

2.4. Експериментальні стенди для дослідження робочих процесів сепараторів стиснутих газів

Для дослідження сепараторів стиснутих газів для ГТУ використано наступний підхід: відпрацювання проточної частини сепараторів проводилось на стендах у вигляді відкритих аеродинамічних труб з моделюванням середовища підвищеного тиску та в умовах атмосферного тиску. В останньому випадку проводився перерахунок швидкостей течій в проточних частинах сепараторів відповідно до тиску.

Стенд для роботи при атмосферному тиску

Схема стенду для роботи сепараторів при атмосферному тиску наведено на рис. 2.3. Він являє собою аеродинамічну трубу відкритого типу, забезпечену засобами вимірювання, регулювання та контролю [98].

Моделльне дисперсне середовище створюється таким чином. Повітря через витратомірний колектор 1 надходить в мірну ділянку і обтікає нагрівач 2, де його температура підвищується до 20-50 °С. Далі повітря переміщується з високодисперсним аерозолем, що надходить з генератора з розпилювачем 3. Витрата високодисперсного аерозолу (з середнім діаметром крапель 1-3 мкм) регулюється кількістю подаваного стиснутого повітря від компресора 17 за допомогою автотрансформаторів 16. Витрата повітря через ділянку регулюється заслінкою 9, розташованою за сепаратором 10 та нагнітачем 8. У мірній ділянці встановлено термометр 15 і пробозабірник у вигляді трубки повного тиску 4. Далі розташовується досліджувана робоча ділянка (сепаратор) 10, вхідний і вихідний патрубки якого з'єднуються з вимірювальною ділянкою. Перепади тисків на колекторі 1 і опір робочої ділянки вимірюються мікроманометром 5. Для вимірювання концентрації масла в повітрі використовуються аспіратор 7 з алонжами і торсіонні аналітичні ваги 13. Вловлена рідина зливається в мірну ємність 12 по патрубку 11. Випробовувані сепаратори встановлюються на жорстку основу.

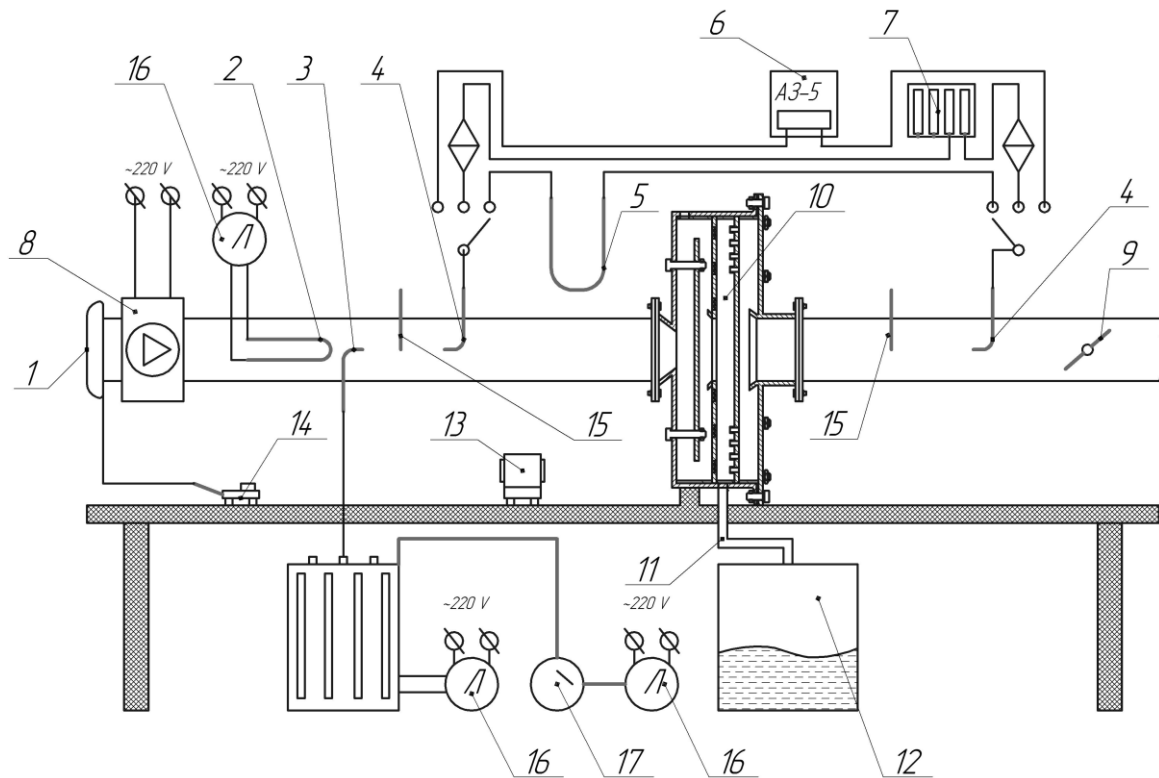


Рисунок 2.3 - Схема експериментальної установки для дослідження сепараторів газу при атмосферному тиску

Стенд для роботи з підвищеним тиском

В НДІ "Проблем екології та енергозбереження" НУК за безпосередньої участі автора був розроблений і змонтований експериментальний стенд для дослідження сепараторів газу середнього тиску (до 5 МПа). Загальний вигляд стенду показаний на рис.2.4. Стенд забезпечує отримання модельного двофазного середовища наступних параметрів: витрата суміші 5-20 г/с при тиску 2-4 МПа; температура суміші 20-100 °С; концентрація масла в повітрі до 20 г/м³; дисперсний склад крапель 0,1-100 мкм.

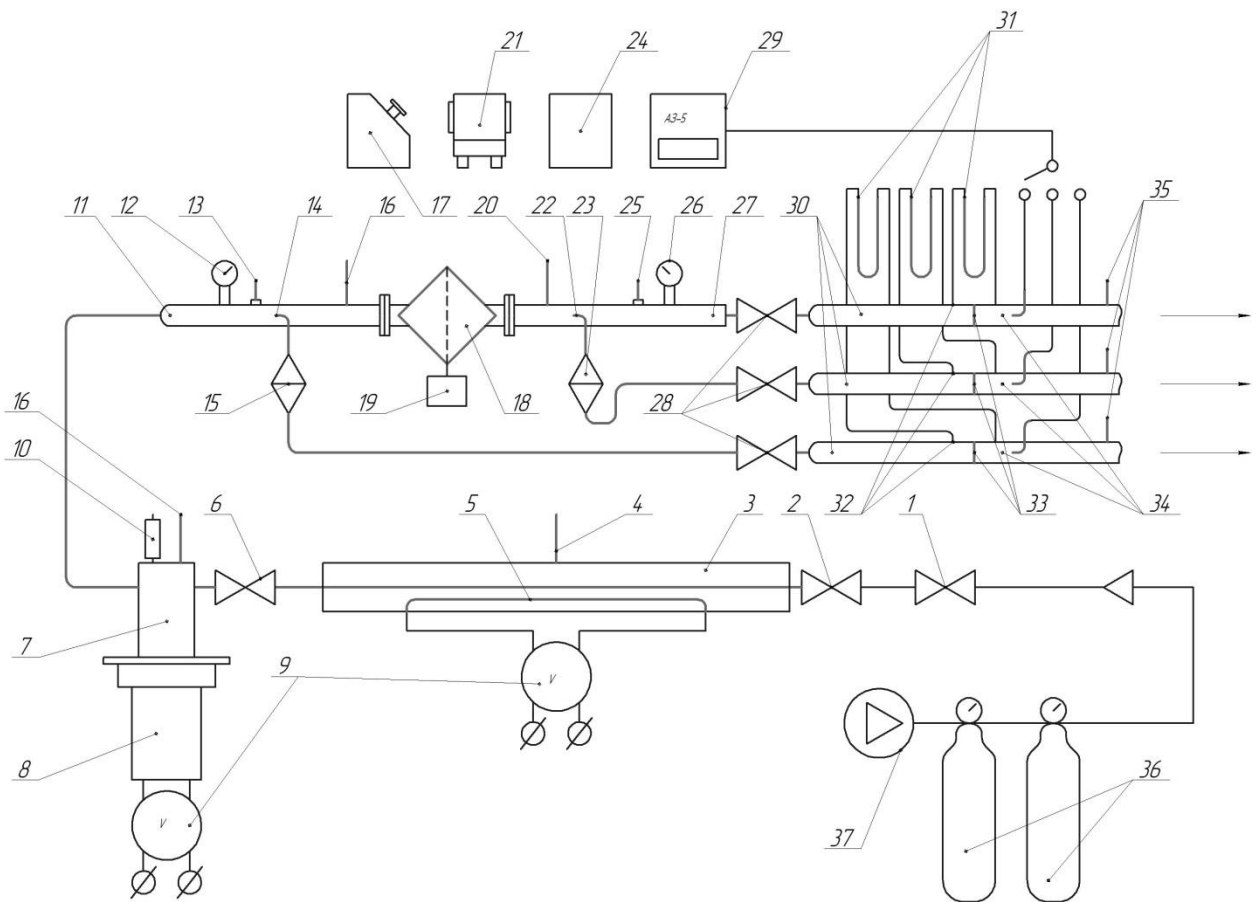


Рисунок 2.4 - Експериментальний стенд зі створення модельного двофазного середовища середнього тиску:

1,5 – клапан; 2 – редукційний клапан; 3 – підігрівач масляний газу; 4,16.20 – термопара; 5 – елементи підігріву; 7,8 – генератор аерозолі; 9 – автотрансформатори; 10 – запобіжний клапан; 11 – вхідна вимірна ділянка; 12,26 – манометри; 13,25 – інерційні зонди; 14,22 – пробовідбірники; 15,23 – алонжі з фільтрами АФА; 17 – мікроскоп; 18 – сепаратор; 21 – аналітичні ваги; 24 – потенціометр; 27 – вихідна вимірна ділянка; 28 – дросельні клапани; 29 – лічильник частот АЗ; 30 – витратомірні ділянки; 31 – манометри; 32 – трубки відбору статичного тиску; 33 – дросельні шайби; 36 – балони; 37 – компресор

Стенд представляє собою аеродинамічну трубу відкритого типу [123], з'єднану з атмосферою через редукційні канали 28. Стиснутий газ подається до установки від балонів 36, куди він закачувався компресором. Стенд містить камери нагрівання газу (повітря) 3, генератор масляного аерозолі барботажного типу 7, універсальну робочу ділянку з сепаратором 18 з вхідним 11 і вихідним 27 вимірювальними ділянками, а також витратомірні ділянки 30.

Стенд монтується на рамі, його окремі елементи з'єднуються трубопроводами та обладнуються регулюючими клапанами.

Стенд функціонує наступним чином. Стиснуте повітря тиском до 15 МПа з балонів 36 через клапан 1 надходить у редукційний клапан 2, на виході з якого підтримується постійний тиск (4 МПа). Далі стиснуте повітря спрямовується в камеру нагрівання 3, де його температура підвищується до 90-120 °С. Камера нагрівання обладнується електронагрівальними елементами, теплота від яких через проміжний теплоносій (вода, масло) передається стиснутому повітрю. Температура проміжного теплоносія контролюється термометром 4 типа ТЛ. Нагріте стиснуте повітря через два клапани надходить до генератора масляного аерозолю 7 барботажного типу. Нижня частина генератора заповнюється маслом та містить підігрівач і перфорований щит. Стиснуте повітря по трубопроводу потрапляє під перфорований щит, що знаходиться в маслі, проходить через його отвори і спінює речовину генерацією найдрібніших крапель.

Передбачається можливість перепуску частини стиснутого повітря повз барботажний пристрій. Конструкція генератора дозволяє отримувати масляний аерозоль, який по дисперсності та концентрації відповідний заданому маслоповітряному середовищу. Генератор аерозолю має запобіжний клапан 10. З генератора маслоповітряна суміш надходить в робочу ділянку, де встановлюється сепаратор 18. Перед сепаратором і за ним розташовуються вхідна 11 і вихідна 27 вимірювальні ділянки, на яких встановлені: манометри 12 і 26 для вимірювання тиску, дзеркальні зонди 13, 25 для визначення дисперсності крапель масла на вході і виході масловіддільника, а також пробовідбірники 14 і 22 масляного аерозолю. Витрата маслоповітряного середовища через робочу ділянку і пробовідбірники регулюється клапанами 28, за якими встановлені витратомірні ділянки 30 з дросельними шайбами. Перепад тисків на шайбах визначається U-подібними манометрами або мікроманометром. Пробовідбірники 14 з'єднуються з алонжами 15 з встановленими в них фільтрами АФА.

У процесі досліджень сепаратора визначається коефіцієнт сумарної ефективності очищення, аеродинамічний опір і вихідна концентрація масляного аерозолі. Для визначення концентрації масла в повітрі використовуються аналітичні фільтри АФА, лічильник АЗ-5 (29), інерційні зонди 13, 25. Температура масла в генераторі аерозолі, маслоповітряної суміші перед і за робочою ділянкою та в мірних ділянках визначається хромель-копелевими термопарами, підключеними до потенціометрів типу ПП-63. Витрата маслоповітряного середовища через витратомірні ділянки визначається за перепадом тисків на дросельній шайбі при атмосферному тиску, а потім перераховується для параметрів суміші перед робочою ділянкою і перед пробовідбірниками.

Основні результати і висновки по розділу 2

1. Для теоретичного аналізу процесів осадження частинок в дисперсному двофазному турбулентному газовому потоці підвищеного тиску в турбоімпаکتних сепараторах ГТУ застосовано системний підхід, який передбачає послідовну процедуру числового інтегрування рівнянь, що моделюють як газоподібні в'язкі потоки, так і протікання струменів рідини.

2. Адаптовано узагальнену математичну модель сепаратора стиснутих газів для ГТУ з використанням загального транспортного рівняння переносу змінної з урахуванням процесів двофазності, що дозволяє розв'язувати задачі підвищення його ефективності. Базова система при розв'язанні задачі уловлювання аерозолів в турбоімпактній системі містить рівняння нерозривності, три рівняння переносу імпульсу, рівняння збереження енергії, а також рівняння для кінетичної енергії турбулентності і ступеня дисипації турбулентної енергії.

3. Обрано методи експериментальних досліджень процесів очищення в турбоімпактних системах з використанням вагового способу за допомогою аналітичних фільтрів, фотоелектричних лічильників і фотометрів аерозолів.

4. В процесі експериментальних досліджень здійснювалися як прямі, так і непрямі вимірювання. Абсолютна похибка визначення зміни маси аналітичних фільтрів на вагах типу ВРЛ становила 0,5 мг. Перепад тисків на чашкових манометрах визначався з абсолютною похибкою 0,02 мм вод. ст., мікроманометра типу МКВ - 0,01 мм вод. ст., U-образного манометра - 0,5 мм вод. ст. Відносна похибка визначення рахункового числа частинок фотоелектричним лічильником АЗ-5 і фотометром аерозолів ФАН У4.2 становила 5 %, результати непрямих вимірювань витрати повітря мали відносну похибку 3,5 %, відносна похибка непрямого вимірювання концентрації частинок склала 3 %.

5. Розроблено та створено експериментальні стенди для дослідження робочих процесів турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ у вигляді відкритих аеродинамічних труб з моделюванням середовища підвищеного тиску та в умовах атмосферного тиску.

Результати досліджень опубліковано в [72,78,81,82,98,123].

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБОІМПАКТНИХ СЕПАРАТОРІВ СТИСНУТИХ ГАЗІВ ДЛЯ ГТУ

3.1. Розробка узагальненої схеми комплексної турбоімпаکتної інтенсифікації очищення стиснутих газів

На основі розглянутих механізмів очищення газів та особливостей робочого процесу гідродинамічних сепараторів розроблено узагальнену технологічну послідовність турбоімпаکتної інтенсифікації очищення стиснутих газів ГТУ від дисперсних частинок, яку наведено на рис.3.1.

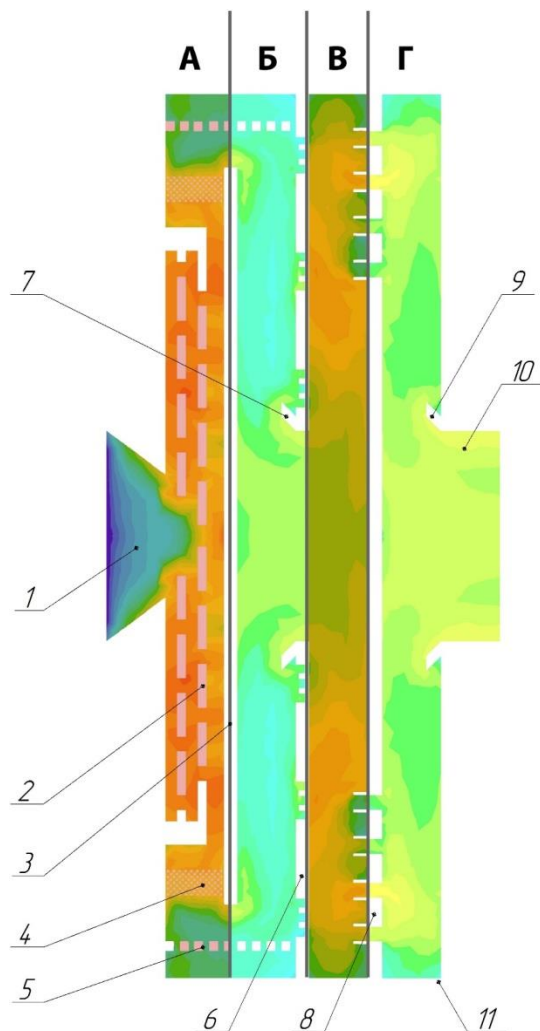


Рисунок 3.1 - Схема узагальненої технологічної послідовності турбоімпаکتної інтенсифікації очищення стиснутих газів:

А – перший ступінь очистки; 1 – сопло (конфузор); 2 – перфоровані поверхні осадження із системи сопел; 3 – пластина осадження; 4 – сітковий коагулятор; 5 – перфоровані бокові поверхні; Б – другий ступінь очистки; 6 – перегородка з канавками для відводу рідини; 7 – конус; В – третій ступінь очистки; 8 – поверхня осадження з циліндричними соплами; Г – четвертий ступінь очистки; 9 – конус; 10 – патрубок відводу стиснутого газу; 11 – корпус; А+Б = секція 1; В+Г = секція 2

В першому ступені (рис.3.1, позиція А) здійснюється турбоімпактна очистка стиснутих газів за рахунок використання турбулентного струменя, який формується в конфузорі вхідного патрубку та обтікає перфоровані поверхні осадження. Кількість поверхонь осадження залежить від допустимих енергетичних та матеріальних витрат. При цьому отвори в поверхнях утворюють турбоімпактні системи: високотурбулентні струмені з швидкостями вище ніж в конфузорі обтікають наступні перфоровані поверхні осадження, таким чином створюючи умови для послідовного осадження крапель меншого діаметру за рахунок сил інерції. Інтенсифікація осадження високоінерційних і низькоінерційних крапель при обтіканні поверхонь початковою ділянкою струменя відбувається завдяки підвищенню швидкості та рівня турбулентності струменів за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu, дифузіїфореzu і в відривних зонах. На поверхнях осадження протікає процес утворення плівки рідини з вловлених крапель з подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння. На цій стадії очистки також використано багатофункціональну поверхню осадження у вигляді сіткових гофрованих коагуляторів, де вловлюються дрібні краплі на поверхнях циліндрів з дротів сіток за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu та капілярних сил. В коагуляторах краплі за рахунок капілярних сил збільшуються та у вигляді крупних крапель виносяться потоком для осадження за рахунок сил тяжіння та інерції до другого ступеня очистки.

В другому ступені турбоімпактної очистки (рис.3.1, позиція Б) відбувається відвід вловленої рідини у вигляді плівки через спеціальні канавки, які розташовано на перегородці. На цій стадії також утворюється струмінь, який формується спеціальним конусом по центру перегородки, але швидкість потоку тут менше, ніж в першому ступені очистки. Це пов'язано з тим, що існує необхідність уловлювати можливі великі краплі, які утворились через зрив плівки рідини з перегородки. Інтенсифікація процесів на цій стадії

досягається за рахунок вибору раціональних швидкостей в перерізах, а також конфігурації і розміру канавок відводу рідини.

В третьому ступені очистки (рис.3.1, позиція В) проходить турбоімпактне уловлення унесених з другої стадії крупних крапель на поверхні перегородки, відвід створеної з них плівки рідини за рахунок сил тяжіння та відвід газу до вихідного четвертого ступеня очистки через турбоімпактну систему, яка утворюється циліндричними оболонками. Інтенсифікація процесів на цій стадії відбувається вибором раціональних швидкостей в перерізах та конфігурації турбоімпактних систем.

В останньому четвертому ступені (рис.3.1, позиція Г) відбувається відвід очищеного стиснутого газу. Інтенсифікація процесів на цій стадії відбувається вибором раціональних швидкостей в перерізах.

Технологічна послідовність стадій очистки може змінюватись відповідно до конструктивного виконання сепараторів газу.

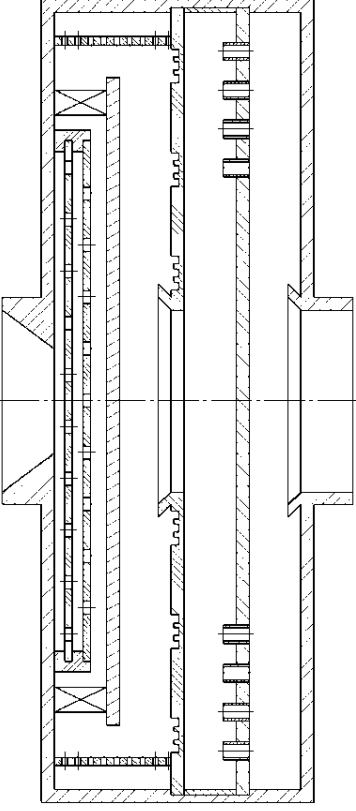
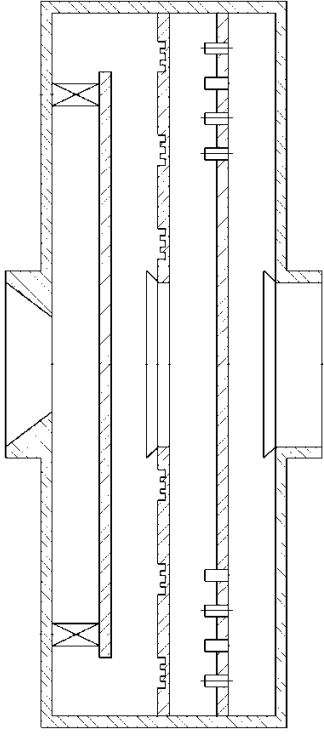
3.2. Розробка схемних рішень турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ

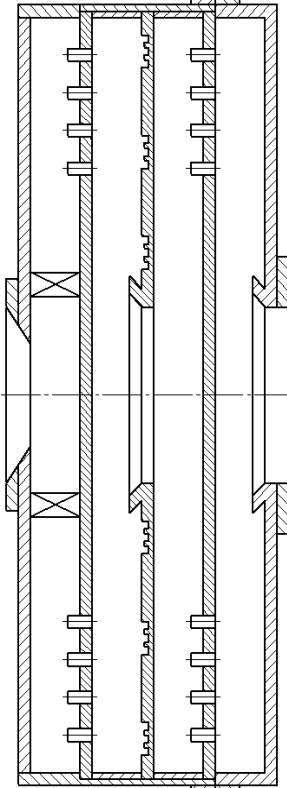
На основі розробленої узагальненої схеми комплексної турбоімпактної інтенсифікації очистки стиснутих газів ГТУ розроблено три варіанта схемних рішень сепараторів (табл. 3.1), які охоплюють необхідний діапазон основних характеристик.

Сепаратор за першим схемним рішенням працює наступним образом. Стиснутий газ через вхідний патрубок потрапляє в конфузори, де формується високотурбулентний струмінь. Швидкість потоку цього струменя перевищує 25 м/с і далі він під прямим кутом обтікає перфоровані поверхні осадження. Осаджені частинки транспортуються потоком по поверхні, утворюючи плівку рідини. Неосаджені частинки та плівка потрапляють в систему сопел, загальний прохідний отвір яких менше ніж конфузору. Це дозволяє отримувати швидкості потоку більшими, ніж в конфузори, що інтенсифікує процеси турбоімпактного осадження частинок.

Таблиця 3.1

Схемні рішення турбоімпактних сепараторів стиснутого газу

Варіанти схемних рішень	Конструктивна схема
1. З центральним струменем та багатоструминними ступенями перед коагулятором на першому ступені очистки. Конструктивно перший ступінь містить у вхідному патрубку конфузор, напроти якого розташовано послідовно дві перфоровані та одна глуха пластина. Ці пластини утворюють поверхні осадження; отвори у суміжних пластинах не співпадають. Таким чином, утворено три турбоімпактні ступеня осадження часток. Після них розташовано сітковий коагулятор. За коагулятором встановлено циліндричну перфоровану оболонку.	
2. З центральним струменем на першому ступені очистки. Конструктивно перший ступінь містить у вхідному патрубку конфузор, напроти якого розташовано глуху пластину. Ця пластина утворює поверхню осадження. Після цього ступеню розташовано сітковий коагулятор.	

Варіанти схемних рішень	Конструктивна схема
<i>3. З центральним струменем та сопловим відводом газу на першому ступені очистки.</i> Конструктивно перший ступінь містить у входному патрубку конфузори, напроти якого розташовано глуху пластину. Ця пластина утворює поверхню осадження. Після цього ступеня розташовано сітковий коагулятор. За сітковим коагулятором встановлено циліндричні оболонки для відводу газу.	 The diagram shows a cross-section of a vertical cylindrical vessel. At the top, there is a central inlet pipe that narrows into a nozzle. Below the nozzle is a horizontal plate. The space between the nozzle and the plate is divided into two main vertical channels by two vertical support structures. These structures have multiple horizontal baffles or screens. At the bottom of the vessel, there are two vertical pipes for gas outlet, one on each side of the central channel. The entire assembly is enclosed in a thick outer shell.

На наступній поверхні осадження загальний прохідний отвір сопел ще менший, ніж у попередній пластині. Через ці сопла газ потрапляє на пластину осадження у вигляді наступних турбоімпульсних струменів. Кількість поверхонь осадження залежить від допустимих енергетичних витрат, які, в свою чергу, залежать від відстані між конфузори, соплами та поверхнями осадження. Ці відстані варіювались в процесі теоретичних дослідження для знаходження раціональних геометричних співвідношень з метою підвищення ефективності роботи сепаратора стиснутих газів. Отвори, які виконані в поверхнях осадження, утворюють наступні турбоімпульсні системи з швидкостями вищими ніж в конфузори. Таким чином створюються умови для послідовного осадження крапель. Далі стиснутий газ потрапляє на багатофункціональну поверхню осадження у вигляді сіткових гофрованих коагуляторів, де вловлюються дрібні краплі на поверхнях циліндрів з дротів

сіток. Надалі крупні краплі виносяться потоком до другого ступеня очистки, де здійснюється відвід вловленої рідини у вигляді плівки через спеціальні канавки на перегородці. На цій стадії за допомогою спеціального конуса по центру перегородки утворюється струмінь, але швидкість потоку тут менше, ніж в першій стадії очищення. В третьому ступені очистки відбувається уловлення крупних крапель на поверхні перегородки, відвід утвореної плівки рідини та відвід стиснутого газу до четвертого останнього ступеня очистки через систему сопел, яка утворюється циліндричними оболонками.

Відмітимо, варіанти схемних рішень відрізняються технологічною послідовністю стадій очистки відповідно до конструктивних схем, наведених в табл. 3.1.

3.3. Розробка конструктивних схем турбоімпактних сепараторів паливного газу ГТУ

Для дослідження ефективності процесів очищення паливного газу ГТУ від твердої та рідкої фракцій в турбоімпактних сепараторах відповідно до трьох схемних рішень, наведених в табл. 3.1, розроблено по три варіанта конструктивних схем сепараторів, які відрізняються геометричними співвідношеннями, що дозволяє змінювати відстані між конфузорею, соплами та поверхнями осадження та аналізували гідродинамічні характеристики сепараторів з використанням узагальненої математичної моделі, що наведена в розділі 2.

Розроблені двовимірні конструктивні схеми турбоімпактних сепараторів паливного газу наведені на рис. 3.2-3.4.

Кожна конструктивна схема містить чотири ступеня очистки паливного газу для трьох розмірних інтервалів між поверхнями осадження та розмірами секцій очистки: 0,25; 0,5 та 1,0 діаметра конфузорею (10, 20 та 40 мм відповідно).

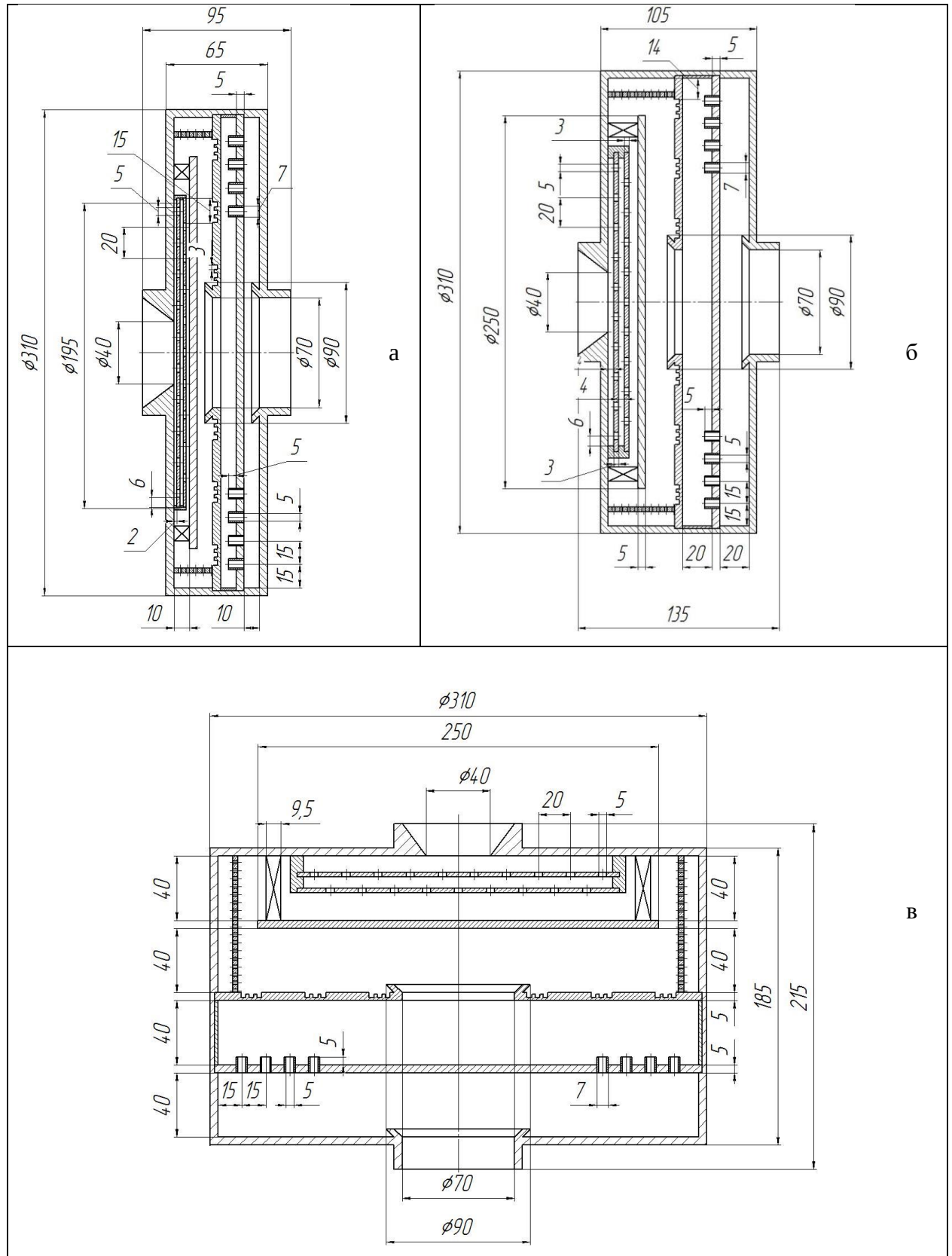


Рисунок 3.2 – Робоча геометрія сепаратора паливного газу. Конструктивна схема 1. Розмір ступеня попередньої очистки:
а) $l = 10$ мм; б) $l = 20$ мм; в) $l = 40$ мм

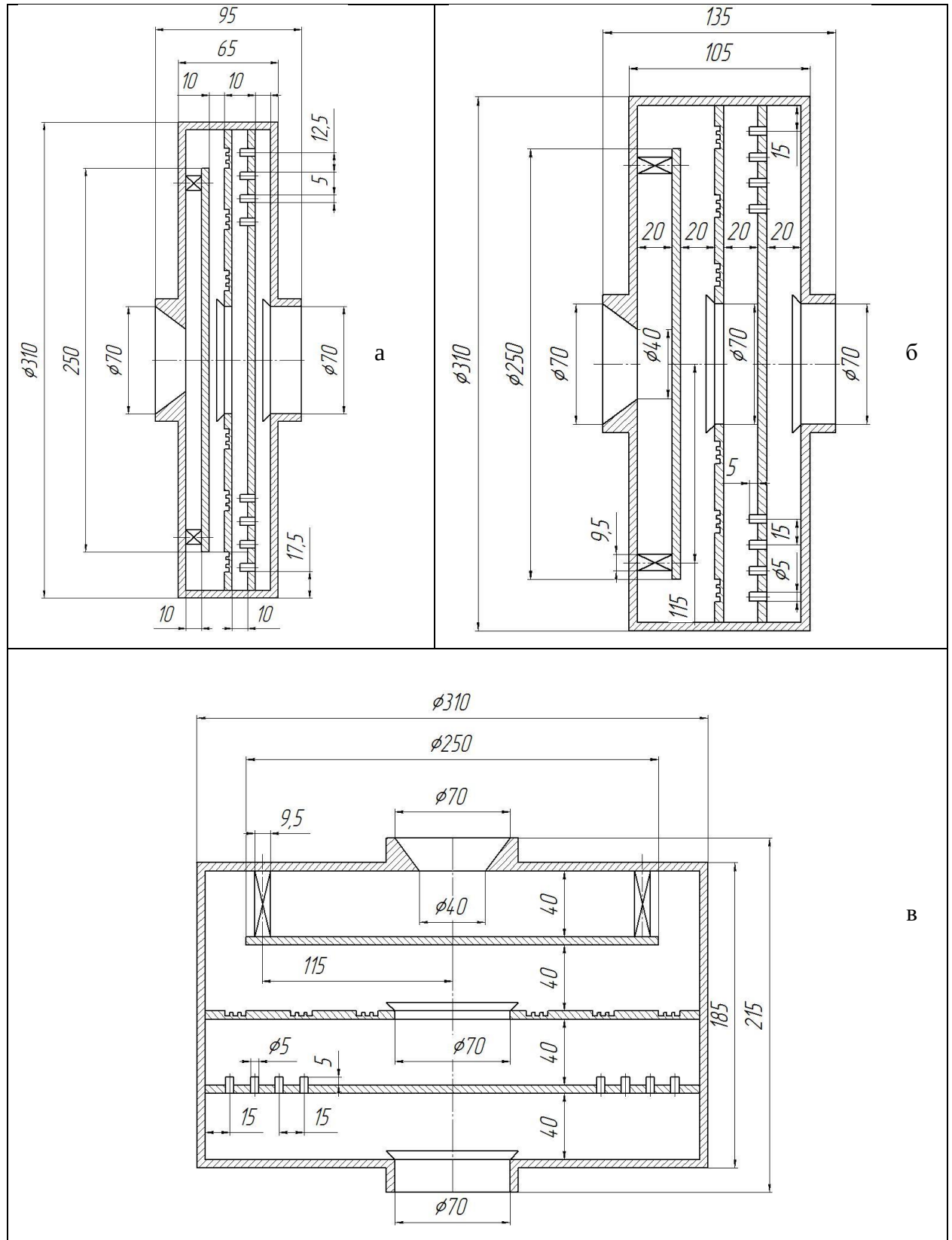


Рисунок 3.3 – Робоча геометрія сепаратора паливного газу. Конструктивна схема 2. Розмір ступеня попередньої очистки:
а) $l = 10$ мм; б) $l = 20$ мм; в) $l = 40$ мм

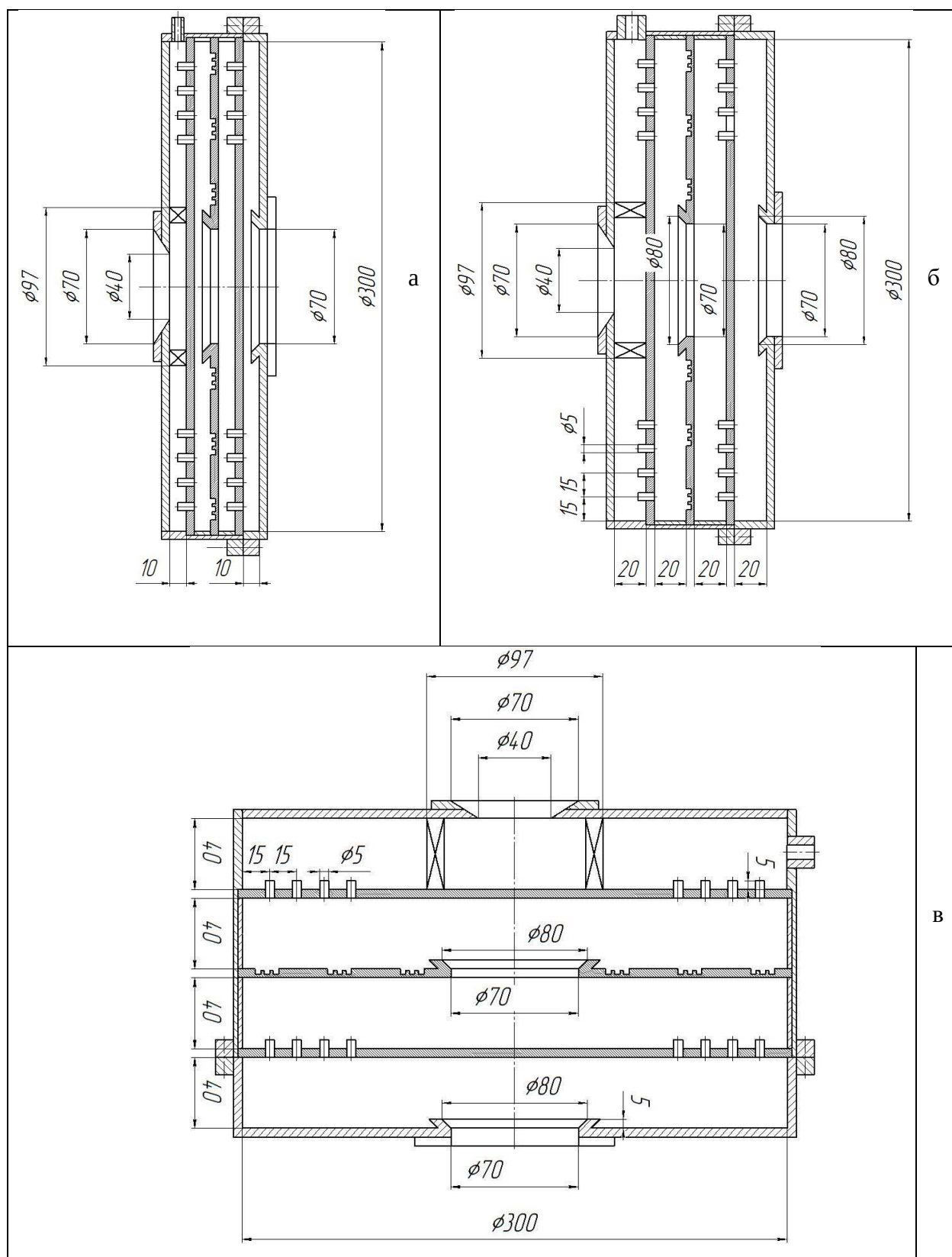


Рисунок 3.4 – Робоча геометрія сепаратора паливного газу. Конструктивна
схема 3. Розмір ступеня попередньої очистки:
а) $l = 10$ мм; б) $l = 20$ мм; в) $l = 40$ мм

На рис. 3.2 представлено конструктивна схема 1 з трьома варіантами типорозмірів. Перший ступінь сепаратора стиснутих газів складається з двох пластин діаметром 250 мм, розміщених на відстані 5-10 мм від входу паливних газів у сепаратор. Пластини мають канавки розміром 5 мм. В першому ступені на діаметрі 210 мм розміщений гофрований сепараційний елемент, розміри якого коливаються від 10 до 40 мм. На діаметрі 290 мм знаходяться вертикальні канали з розміром 3 мм. У нижній частині першого ступеня сепаратора знаходяться три канавки прямокутної форми 3х2 мм на відстані 27 мм. В другому ступені сепаратора на діаметрах 270, 240 та 180 мм відповідно знаходяться наскрізні прямокутні канавки 5х10 мм.

Конструктивна схема 2 наведена на рис. 3.3. Перший ступінь сепаратора для очистки паливних газів складається з однієї пластини діаметром 250 мм, на діаметрі 210 мм якої знаходиться гофрований сепараційний елемент, розміри якого коливаються від 10 до 40 мм.

На рис. 3.4 представлена конструктивна схема 3. Перший ступінь сепаратора складається з пластини діаметром 250 мм, на діаметрі 97 мм якої знаходиться гофрований сепараційний елемент.

Для теоретичного дослідження елементів проточних частин турбоімпульсних сепараторів стиснутих газів ГТУ для всіх дев'яти конструктивних варіантів побудовані відповідні двовимірні різницеві сітки в декартовій системі координат. Для прикладу, на рис. 3.5 зображені розрахункові сітки конструктивної схеми 1.

Розміри розрахункових сіток варіювалися відповідно до геометрії об'єкта, що моделюється. Робочі розрахункові сітки побудовані методом трикутного сегментування. Площі трикутних сегментів не перевищували $S = 25 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$.

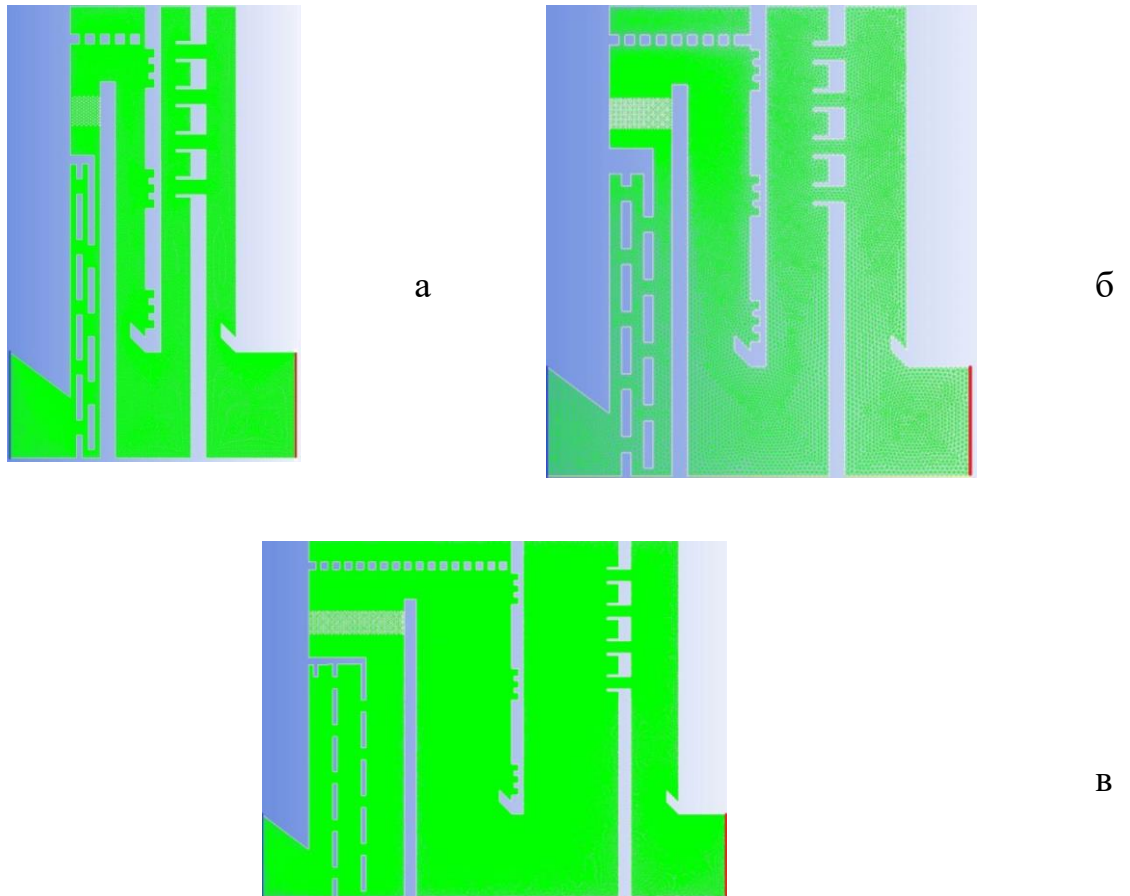


Рисунок 3.5 – Розрахункові кінцево-різницькі сітки для розрахунків сепаратору паливного газу. Конструктивна схема 1.
Розмір ступеня попередньої очистки: а) $l = 10$ мм; б) $l = 20$ мм; в) $l = 40$ мм

3.4. Теоретичні дослідження гідродинаміки турбоімпульсного струминного модуля попередньої очистки стиснутого газу

Для розрахунків процесів очищення стиснутого паливного газу ГТУ використано узагальнену математичну модель, наведену в розділі 2. Розв'язання рівнянь математичних моделей турбулентного переносу в ступенях очищення турбоімпульсних сепараторів здійснено за допомогою методу контрольного об'єму з використанням сучасного комплексу обчислювальної гідродинаміки Ansys Fluent.

При розрахунках елементів проточних частин сепараторів для первинної очистки паливних газів ГТУ від твердої та рідкої фракцій були використані наступні граничні умови.

1. Витрати газу через проточну частину сепаратора первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій: 500; 1000; 1500; 2200 кг/год.

2. Тиск у проточній частині сепаратора для первинної очистки паливних газів 1960000 Па.

3. Робоче середовище – природний газ згідно вимог ОСТ 51.40-93; густина при нормальних умовах 0,66-0,8 кг/м³; номінальний тиск робочого середовища на вході в сепаратор 0,2±0,05 МПа; температура на вході – 20...+60 °С.

4. Робоча геометрія сепаратора побудована з урахуванням вісесиметричності течії у робочому каналі.

5. Параметри полідисперсного середовища:

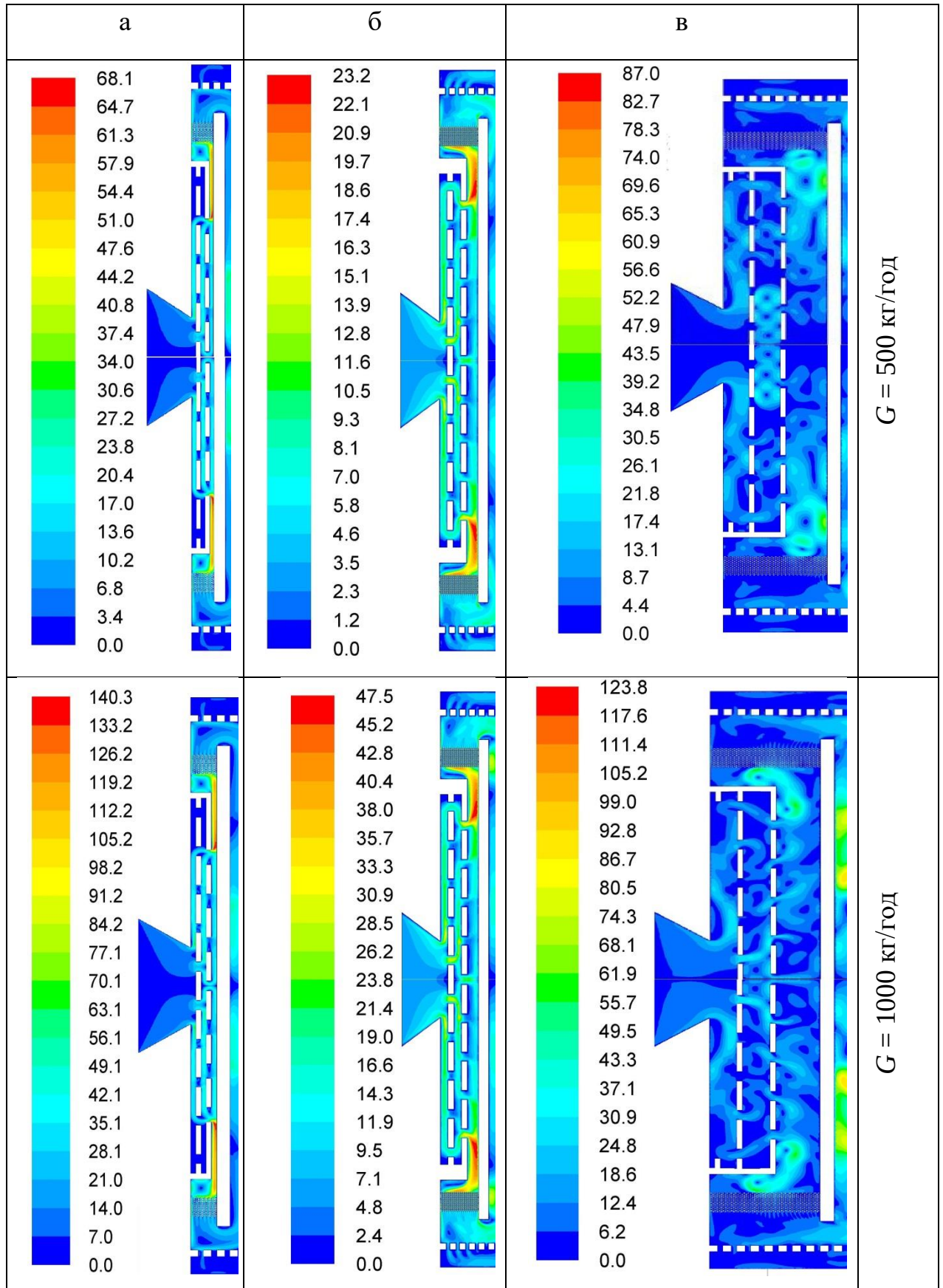
- вміст твердих частинок на вході - не більше 40 мг/кг;
- вміст твердих частинок розміром понад 10 мкм - не більше 6 мг/кг;
- вміст рідких фракцій (газовий конденсат, крапельна волога) - не більше 10 мкм.

Витрати полідисперсного середовища: 0,02; 0,04; 0,06; 0,088 кг/год відповідно витратам газу: 500; 1000; 1500; 2200 кг/год.

У розрахунках приймалося, що температура стиснутих газів на вході в канал і на виході становить 20 °С; $\mu \cdot 10^6 = 22,9$ кг/м·с, $\rho = 0,94$ кг/м³, $C_p = 1006$ Дж/(кг·К).

З використанням побудованих розрахункових сіток виконано попередні двовимірні теоретичні дослідження основних гідродинамічних характеристик робочого середовища в ступенях турбоімпаکتного сепаратора стиснутого газу для ГТУ: розподілу швидкості та кінетичної енергії турбулентності в робочих ділянках при варіюванні витрат робочого середовища $G = 500\text{--}2200$ кг/год.

На рис. 3.6–3.8 представлені результати розрахунків розподілу швидкостей в проточній частині турбоімпактного модуля сепараторів стиснутого газу при варіюванні витратами робочого тіла.



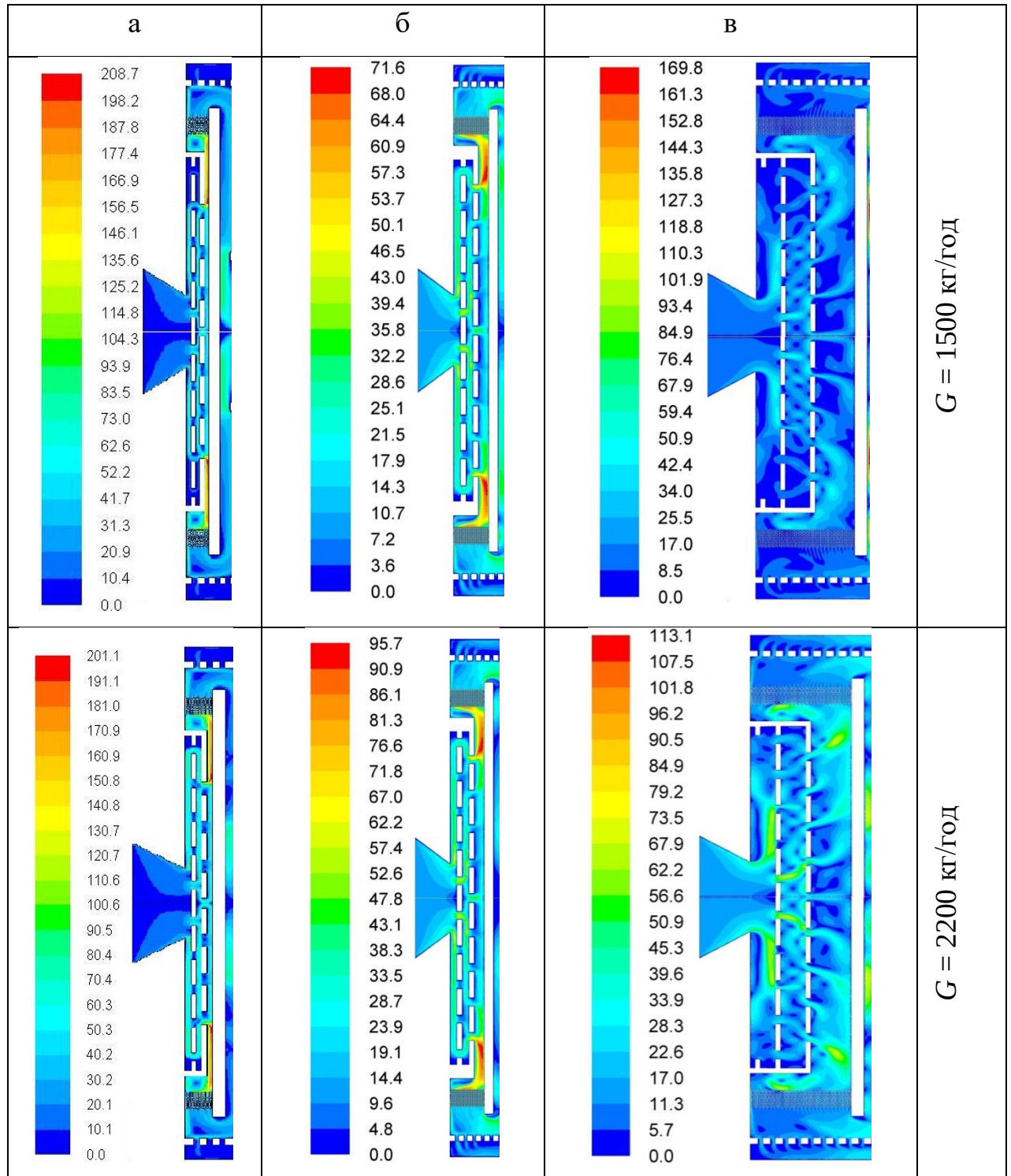
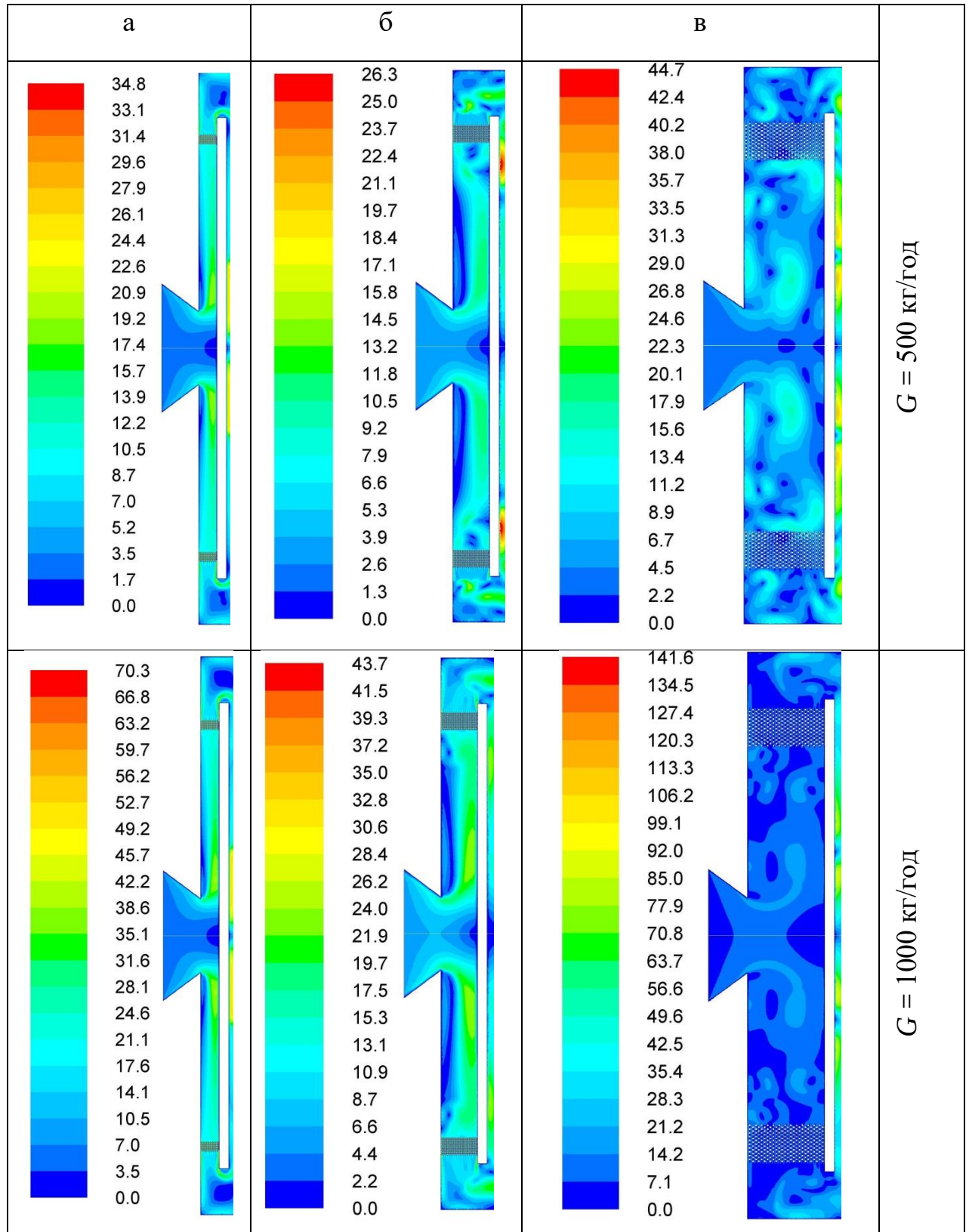


Рисунок 3.6 – Розподіл швидкостей (м/с) в турбоімпактному струминному модулі. Конструктивна схема 1.
 Ширина ступеня попередньої очистки: а) $l = 10$ мм; б) $l = 20$ мм; в) $l = 40$ мм



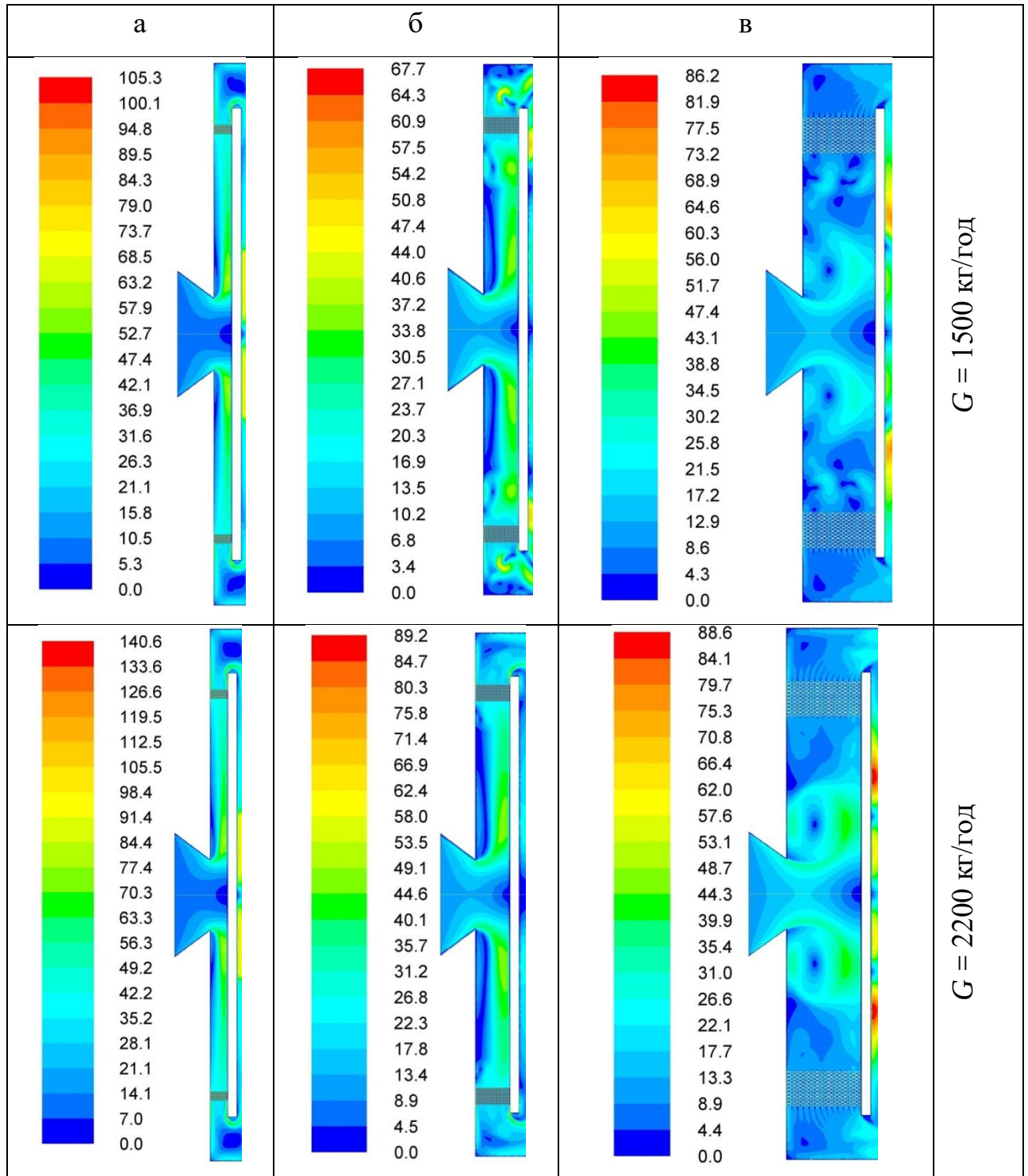
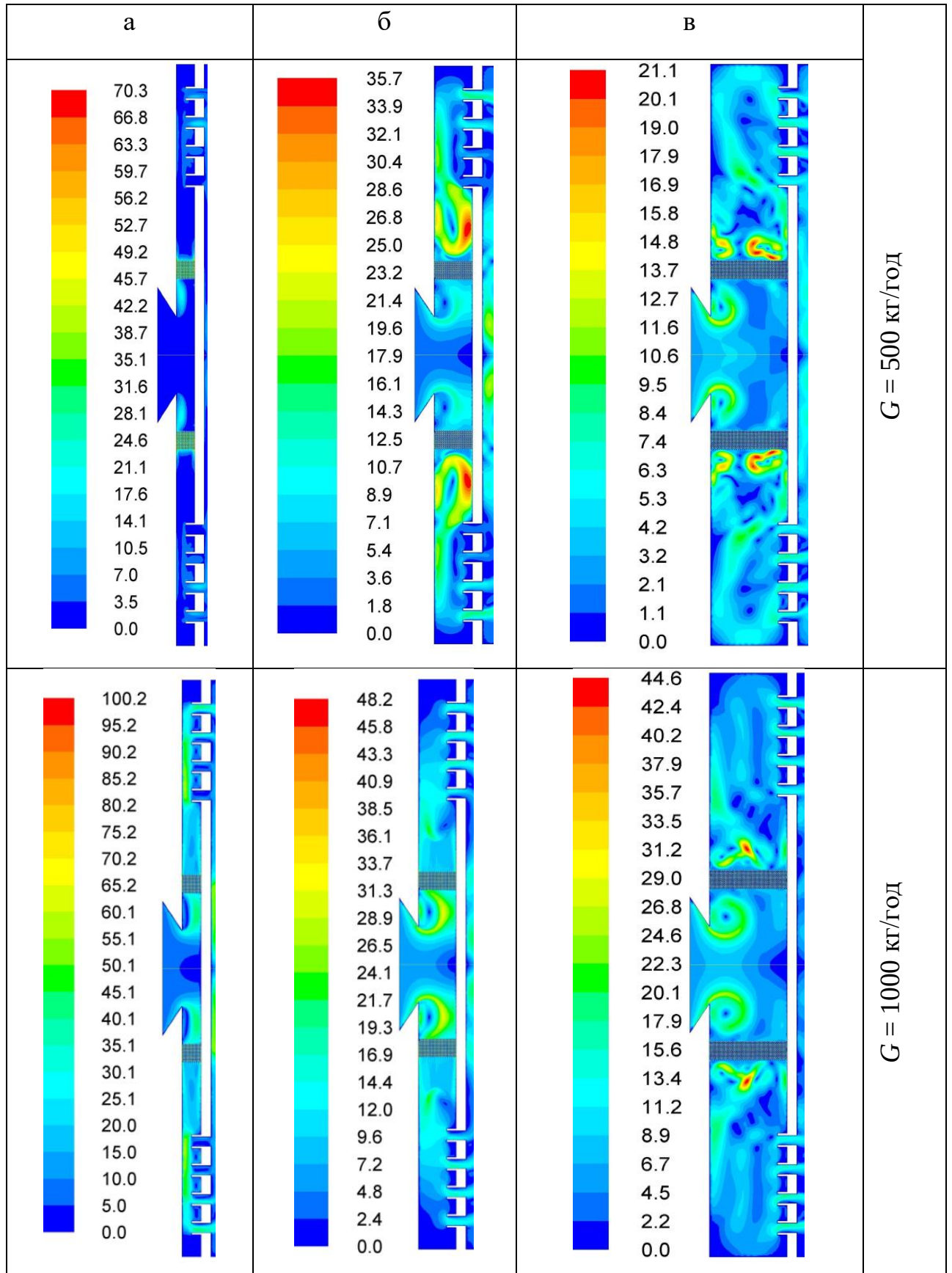


Рисунок 3.7 – Розподіл швидкостей (м/с) в турбоімпульсному струминному модулі. Конструктивна схема 2.

Ширина ступеня попередньої очистки: а) $l = 10 \text{ мм}$; б) $l = 20 \text{ мм}$; в) $l = 40 \text{ мм}$



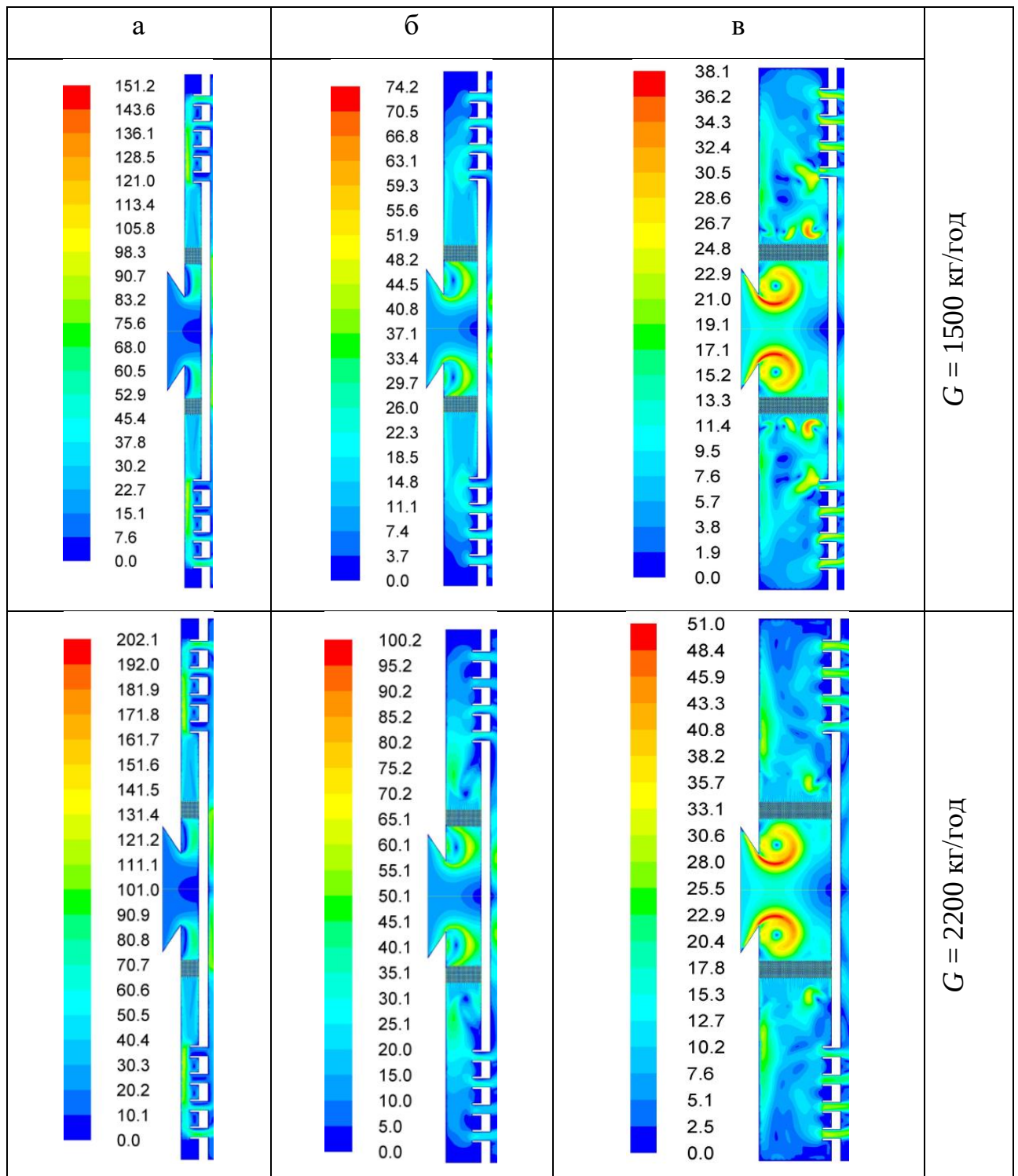


Рисунок 3.8 – Розподіл швидкостей (м/с) в турбоімпактному струминному модулі. Конструктивна схема 3.

Ширина ступеня попередньої очистки: а) $l = 10 \text{ мм}$; б) $l = 20 \text{ мм}$; в) $l = 40 \text{ мм}$

Результати розрахунків дозволили отримати чітку картину протікання турбофоретичних процесів на всіх режимах навантаження сепараційного вузла.

Початкові швидкості робочого середовища в залежності від режиму роботи лежать в діапазоні 2,8–12,5 м/с. Із збільшенням витрат робочого середовища для всіх конструктивних схем спостерігається збільшення турбулізації потоку та збільшення розмірів зон зворотних вихорів та течій, що позитивно впливає на процеси осадження полідисперсних частинок. В турбоімпакті ступені попередньої очистки стиснутого газу відбувається збільшення швидкості потоку через звужуючий канал, що матиме сприятливий вплив на подальше осадження високодисперсних частинок завдяки струминному очищенню: робоче середовище проходить зону удару й розвороту струменя. Як показали розрахунки, найбільш раціональним варіантом з точки зору мінімального значення перепаду тиску є конструктивна схема 2 з шириною ступеня попередньої очистки 20 мм.

3.5. Теоретичні дослідження особливостей гідродинаміки гофрованого сепараційного модуля

Після турбоімпактічного модуля очистки для осадження дрібних частинок робочого середовища використовується наступний модуль очистки – сітковий гофрований коагулятор.

На рисунках 3.9–3.11 представлені результати розрахунків розподілу швидкостей в сітковому гофрованому елементі проточних частин сепараторів стиснутого газу при заданих витратах робочого тіла. При проходженні робочим середовищем гофрованого елемента спостерігається утворення зон зворотних течій за ним. Значення швидкостей потоку у гідродинамічному сліду за сітковим елементом складають: для ступеня сепараційного елемента з розміром 10 мм – близько 5 м/с для витрати 500 кг/год і близько 15 м/с для витрати 2200 кг/год; для ступеня сепараційного елемента з розміром 20 мм – близько 2 м/с для витрати 500 кг/год і близько 7 м/с для витрати 2200 кг/год;

для ступеня сепараційного елементу з розміром 40 мм – близько 1,2 м/с для витрати 500 кг/год і близько 3,5 м/с для витрати 2200 кг/год.

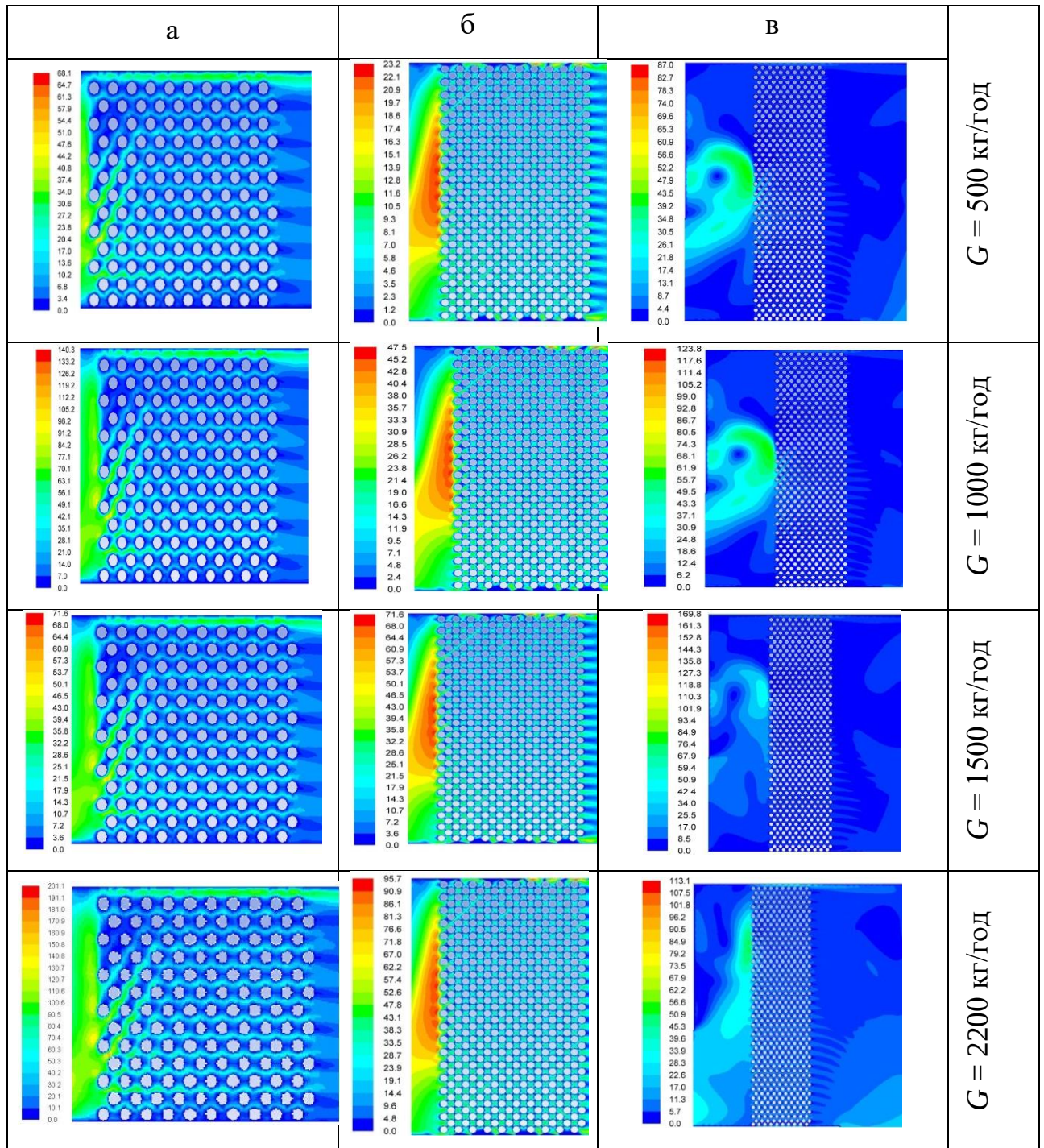


Рисунок 3.9 – Розподіл швидкостей (м/с) в гофрованому сепараційному модулі. Конструктивна схема 1.

Ширина секції: а) $l = 10 \text{ мм}$; б) $l = 20 \text{ мм}$; в) $l = 40 \text{ мм}$

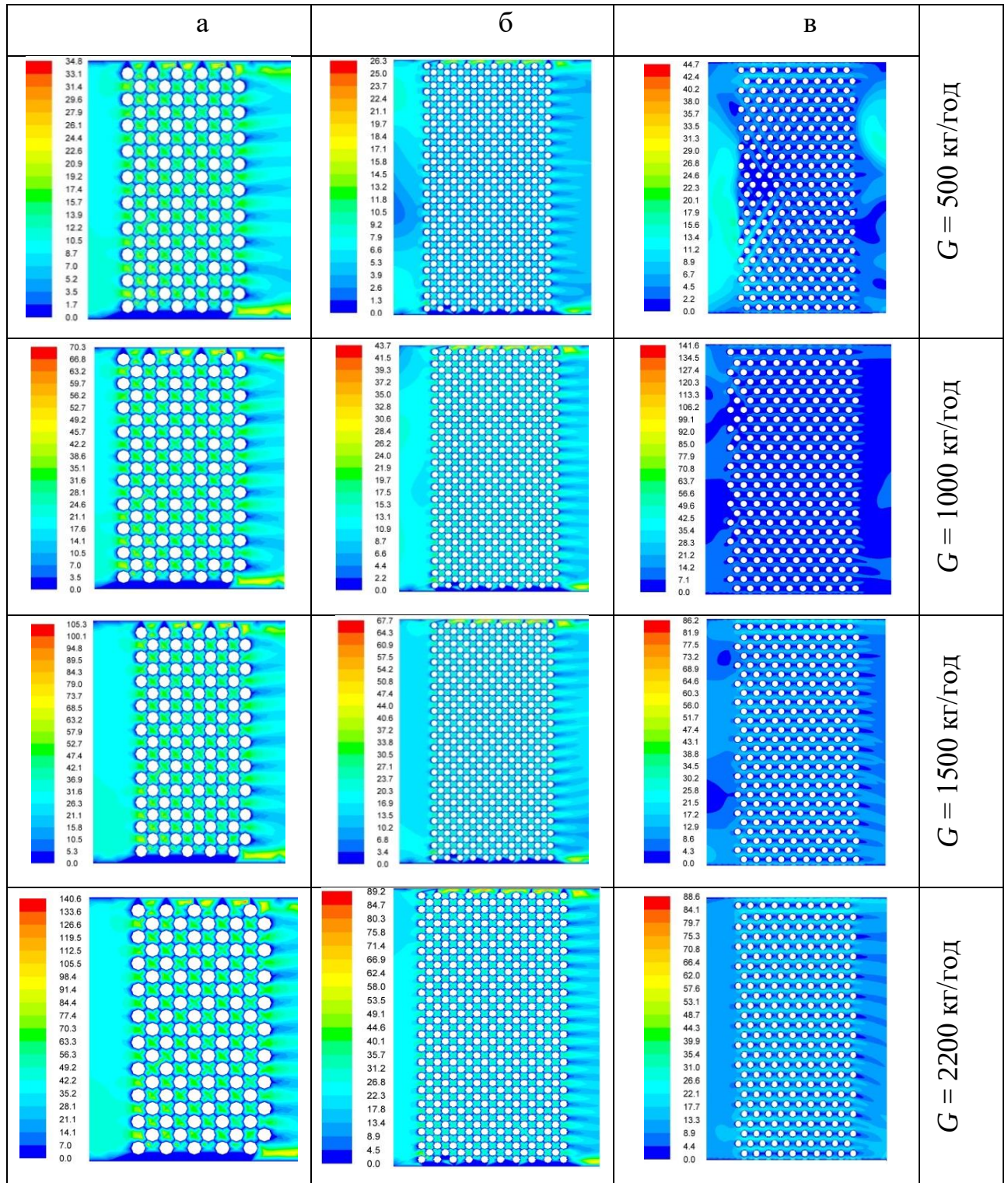


Рисунок 3.10 – Розподіл швидкостей (м/с) в гофрованому сепараційному модулі. Конструктивна схема 2.

Ширина секції: а) $l = 10 \text{ мм}$; б) $l = 20 \text{ мм}$; в) $l = 40 \text{ мм}$

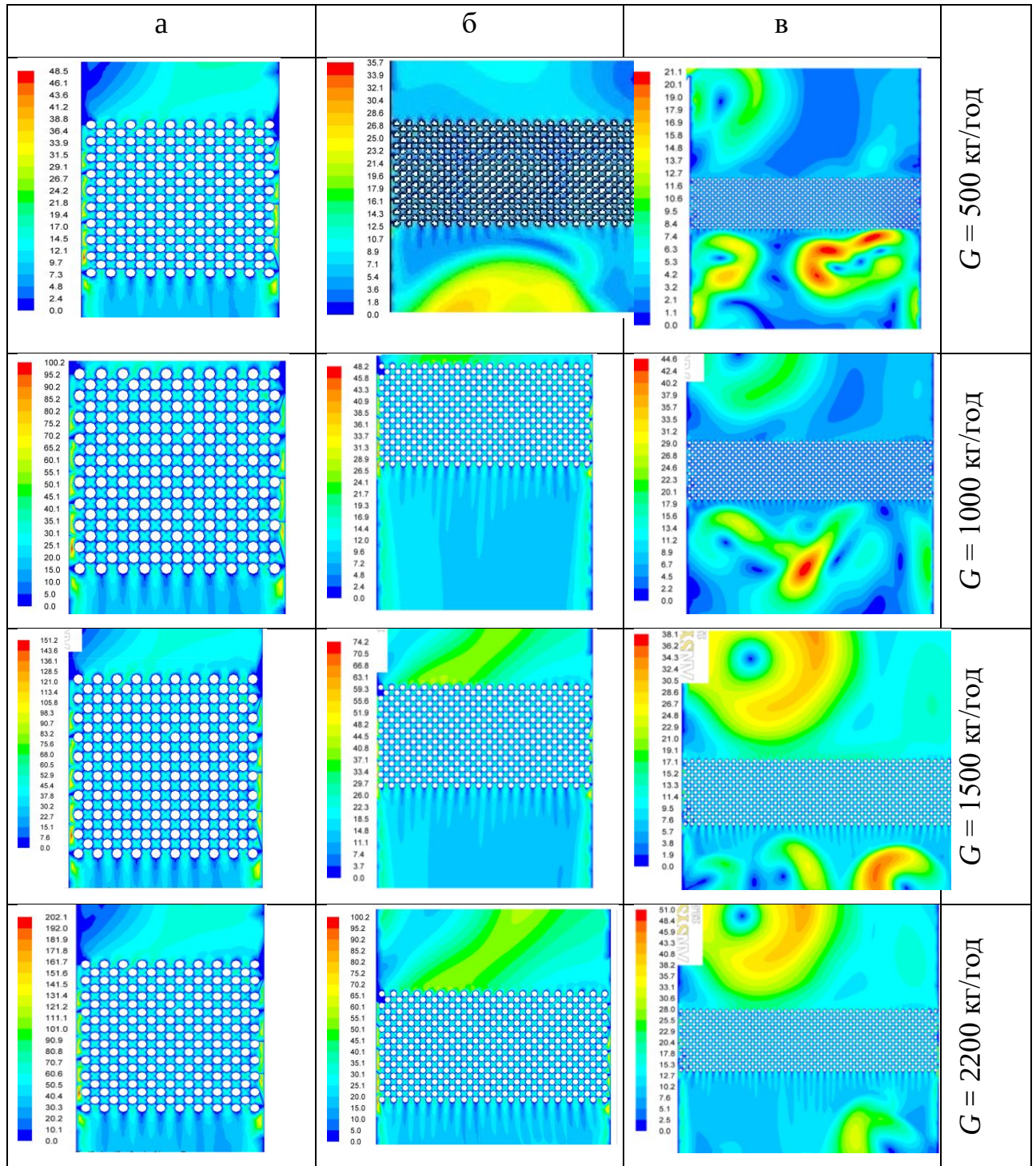


Рисунок 3.11 – Розподіл швидкостей (м/с) в гофрованому сепараційному модулі. Конструктивна схема 3.

Ширина секції: а) $l = 10 \text{ мм}$; б) $l = 20 \text{ мм}$; в) $l = 40 \text{ мм}$

Як показали розрахунки, найбільш раціональним варіантом цієї стадії очищення є конструктивна схема 2 з шириною секції 20 мм. Це можна пояснити тим, що в даному випадку сітковий елемент розташований на

значній відстані від зони розвороту потоку, і течія має достатньо часу для рівномірного розподілу основних характеристик по всьому поперечному перерізу каналу сепараційного модулю перед проходженням гофрованого сепараційного елемента.

Тому при проходженні сіткового елемента полідисперсна фаза буде більш рівномірно розподіленою в перерізі каналу, що приведе до більш високих значень коефіцієнта осадження частинок, тобто до більш високої ефективності уловлювання частинок.

3.6. Теоретичні дослідження гідродинаміки сепаратора паливного газу

Виконано дослідження структури потоку у всіх послідовно розташованих ступенях очистки робочого середовища від полідисперсної фази. Проаналізовані основні гідродинамічні характеристики сепараторів очистки паливного газу різних конструктивних схем при варіюванні шириною секцій та витратою робочого тіла.

На рис. 3.12–3.14 представлено результати розрахунку розподілу швидкостей сепараторах для очистки паливного газу різних конструктивних схем при витратах робочого тіла 500 и 2200 кг/год.

Для всіх розглянутих схем при проходженні робочим середовищем вхідного сопла спостерігається зростання швидкості внаслідок звуження поперечного перерізу. Після витікання з сопла потік потрапляє в зони удару та розвороту на 90 градусів – перший ступінь інерційної очистки від високодисперсних частинок.

Другий модуль очистки – зона гофрованого сіткового елемента, який складається з 10 рядів проволочки діаметром 0,5 мм, розташованої по всій висоті перерізу. Тут виконується очищення робочого середовища від більш дрібних частинок. За сітковим елементом спостерігається утворення зон турбулізації потоку, які сприяють інтенсифікації осадження полідисперсних частинок на стінках каналу.

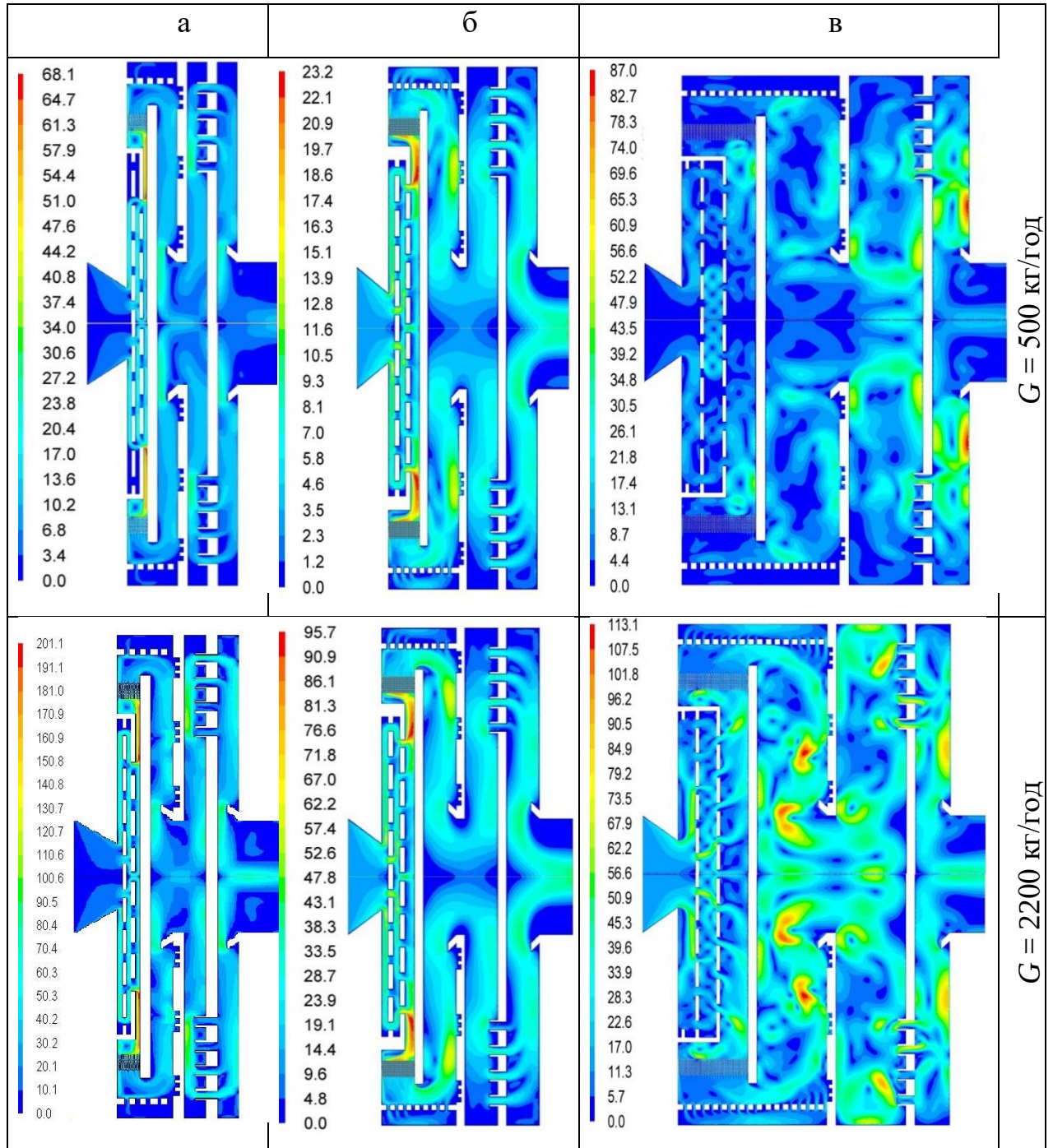


Рисунок 3.12 – Розподіл швидкостей (м/с) в сепараторі попередньої очистки газів. Конструктивна схема 1.

Ширина секції: а) $l = 10 \text{ мм}$; б) $l = 20 \text{ мм}$; в) $l = 40 \text{ мм}$

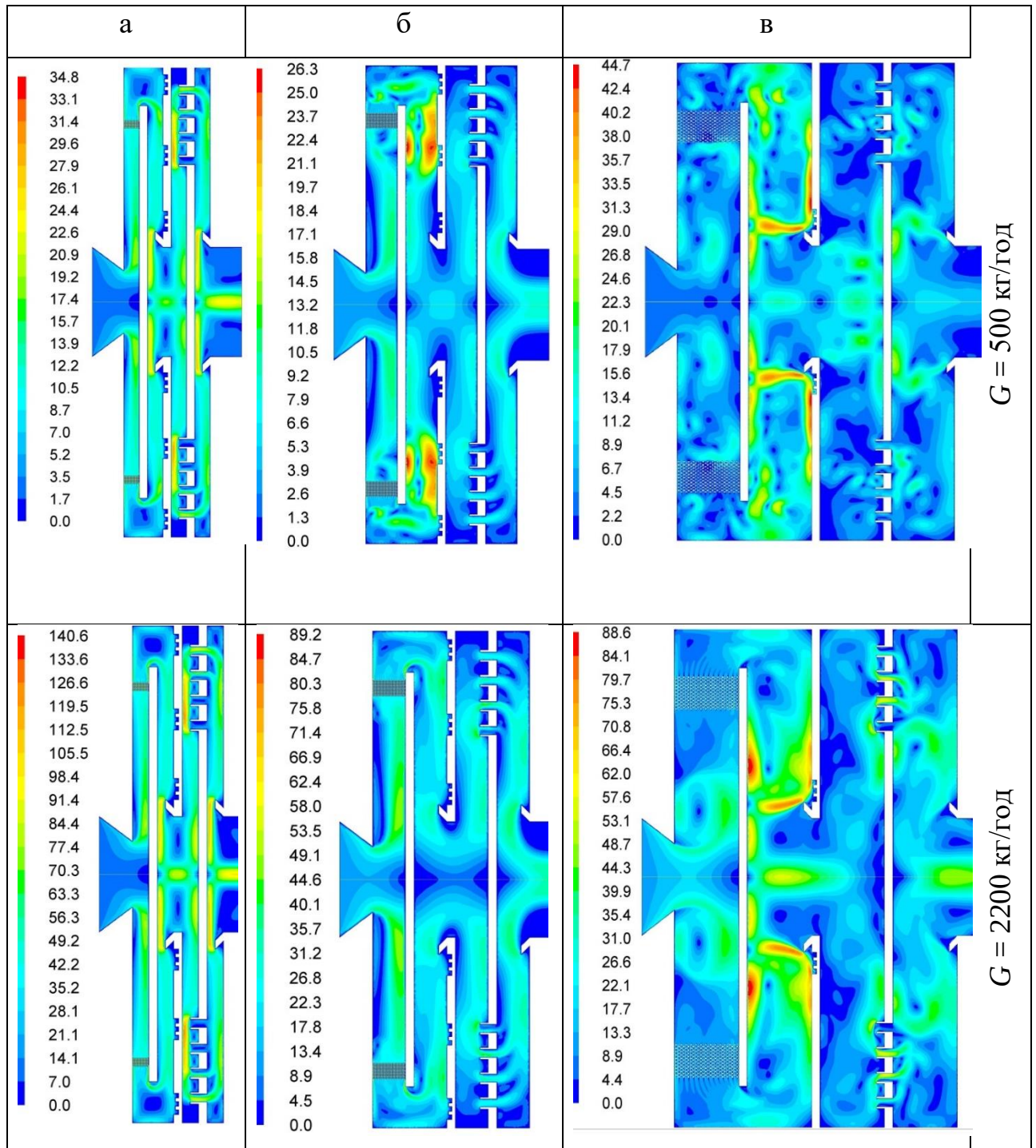


Рисунок 3.13 – Розподіл швидкостей (м/с) в сепараторі попередньої очистки газів. Конструктивна схема 2.

Ширина секції: а) $l = 10 \text{ мм}$; б) $l = 20 \text{ мм}$; в) $l = 40 \text{ мм}$

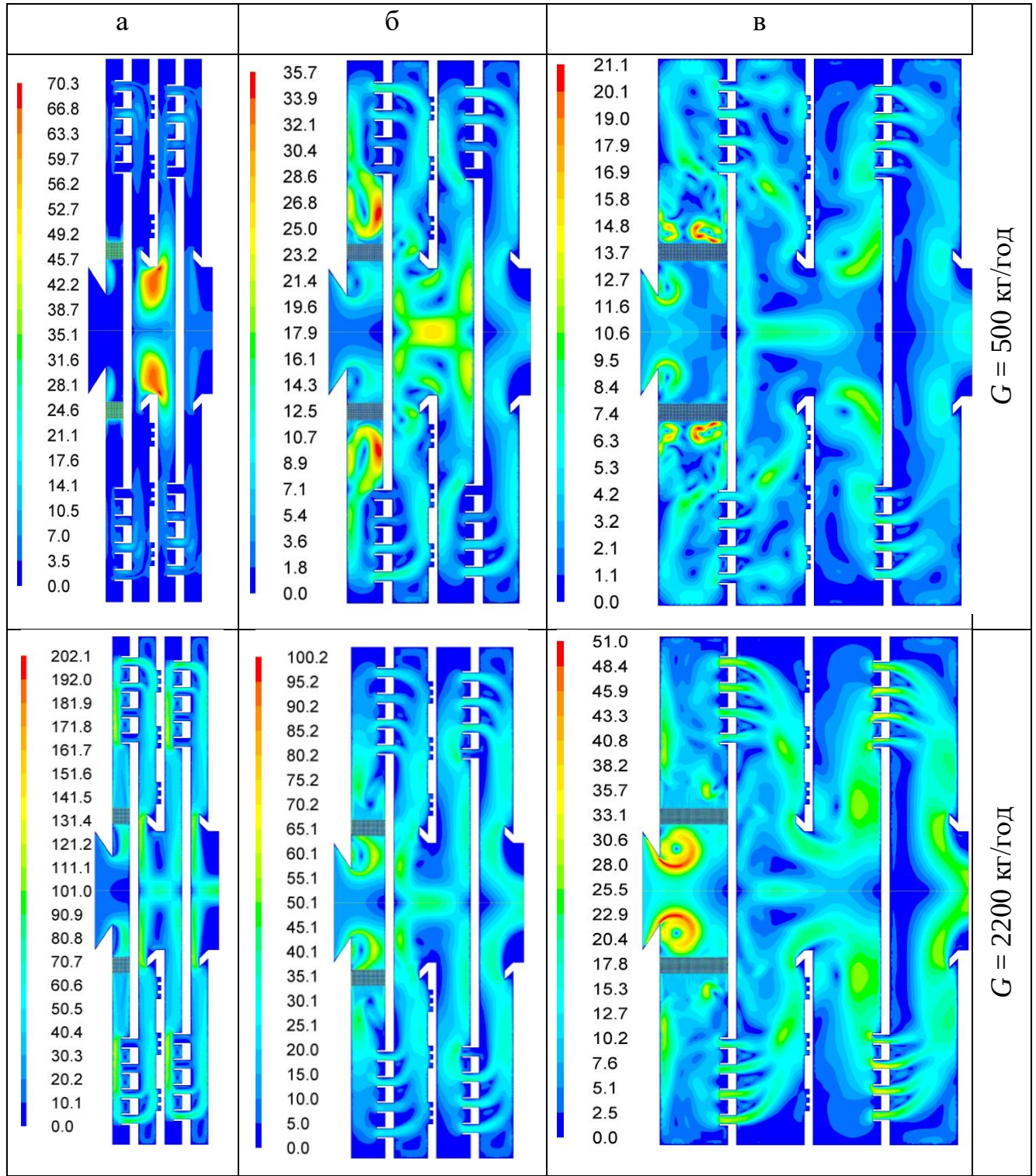


Рисунок 3.14 – Розподіл швидкостей (м/с) в сепараторі попередньої очистки газів. Конструктивна схема 3.

Ширина секції: а) $l = 10 \text{ мм}$; б) $l = 20 \text{ мм}$; в) $l = 40 \text{ мм}$

Після проходження сіткового елемента робоче тіло розвертається на 180 градусів і потрапляє до другого ступеня очистки (для конструктивної схеми 3 – через трубки діаметром 5 мм), де відбуватиметься подальше осадження частинок в трьох секціях канавок та на стінках каналу.

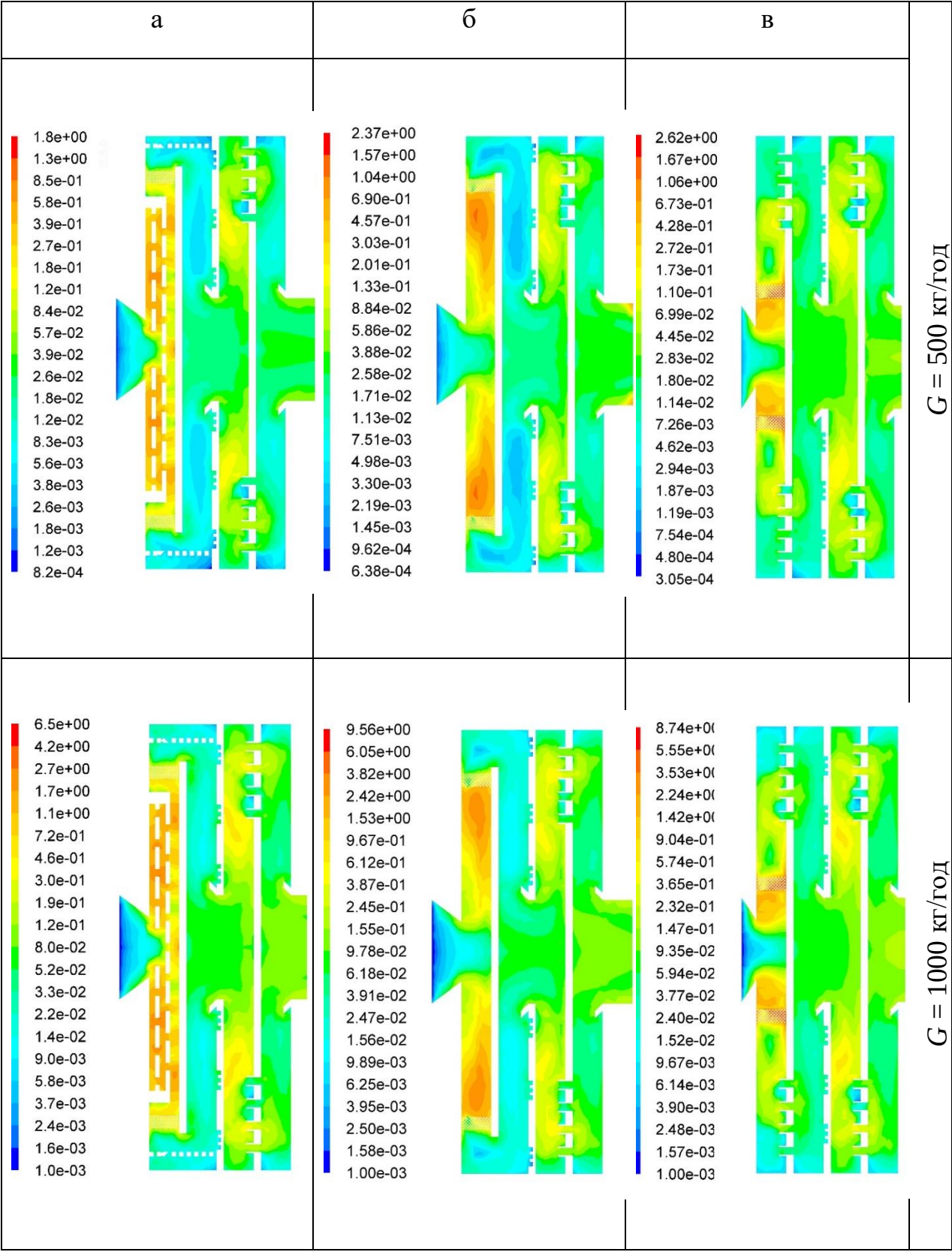
Після проходження другого ступеня сепаратора робоче середовище потрапляє до наступного ступеня через трубки діаметром 5 мм, в яких відбувається прискорення потоку. При виході з них робоче тіло потрапляє в зону удару для інерційного очищення потоку. Також внаслідок різкого розширення в каналі утворюються зони підвищеної турбулентності, що інтенсифікує турбофоретичне осадження.

При дослідженні всіх конструктивних схем сепараторів очистки паливного газу спостерігаються наступні спільні характеристики: в області удару й розвороту потоку відбувається інерційне вловлювання високодисперсних частинок. Для його інтенсифікації збільшується швидкість витікання робочого середовища із сопла за рахунок його звуження з діаметра 70 мм до діаметра 40 мм, тобто збільшення початкових швидкостей в 1,75 раз. Наявність виступів поверхні на стінках сепараційного модулю дозволяє також інтенсифікувати осадження високодисперсних частинок за рахунок інерційних сил та сил турбулентної дифузії.

Характер зміни кінетичної енергії турбулентності для характерної ширини секції 20 мм і варіюванні витратами газу від 500 до 2200 кг/год показаний на рис. 3.15.

За результатами розподілу кінетичної енергії турбулентності для всіх конструктивних схем спостерігаються дві зони високої турбулентної навантаженості в першому ступені очистки при проходженні потоком турбоімпаکتного та коагуляційного модулів та додаткова зона турбулентної навантаженості в третьому ступені під час розвороту та при звуженні прохідного перерізу. В конструктивній схемі 3 спостерігається надвисоке накопичення енергії в коагуляційному модулі, що призведе до підвищення тиску і подальшого зносу елементів. Те ж саме явище спостерігається в

конструктивній схемі 1 в турбоімпульсному модулі при проходженні крізь перфоровані поверхні осадження із системами сопел.



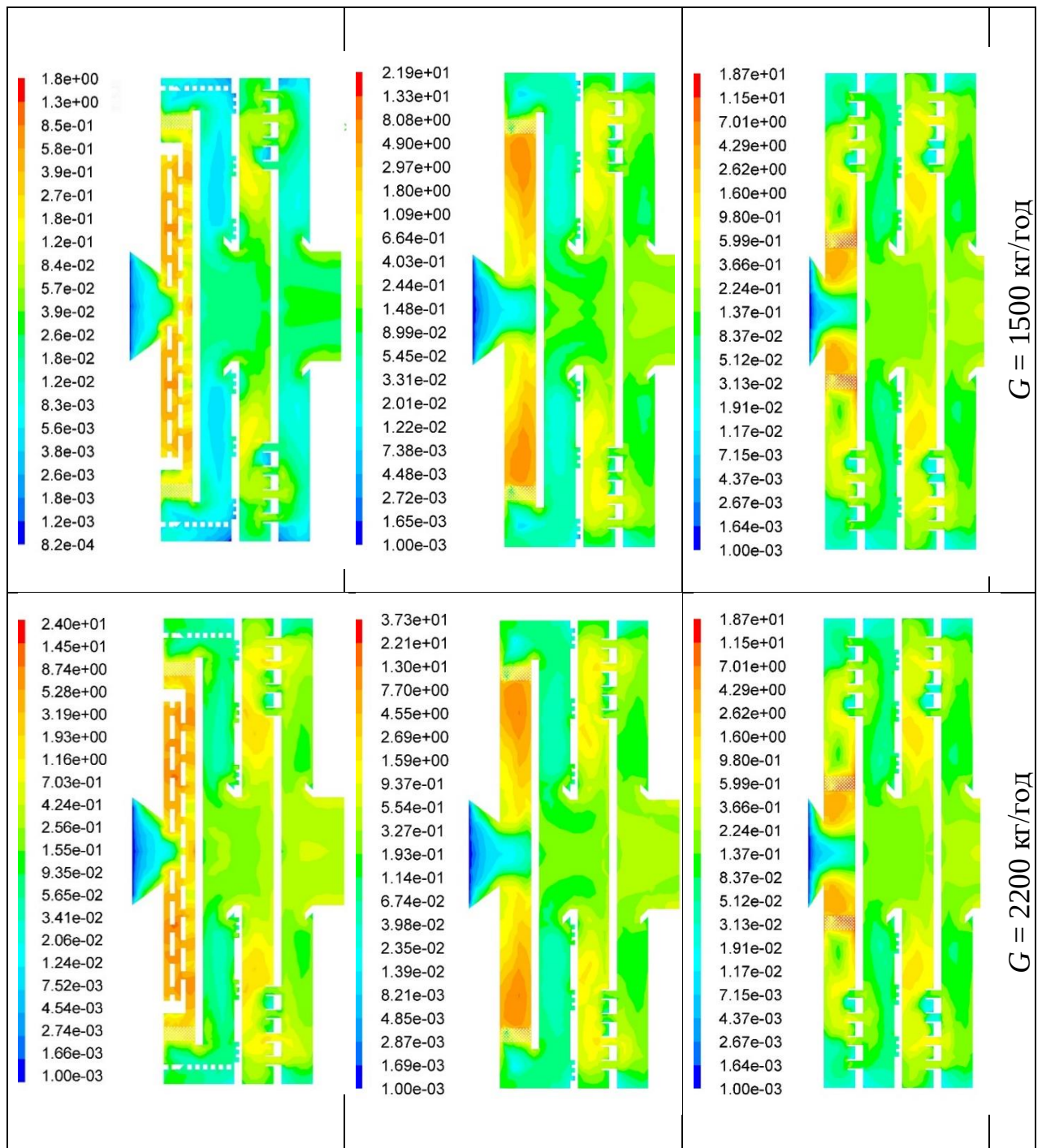


Рисунок 3.15 – Розподіл кінетичної енергії турбулентності ($\text{м}^2/\text{с}^2$) в сепараторі попередньої очистки газів. Ширина секції $l = 20 \text{ мм}$.

Конструктивна схема: а) 1; б) 2; в) 3

В конструктивній схемі 2 при проходженні потоку крізь турбоімпактний модуль та повороті на 90 градусів спостерігаються зони підвищеної турбулентності та вихроутворення перед коагуляційним модулем та зниження кінетичної енергії під час його проходження.

При дослідженні конструктивної схеми 1 в першому ступені попередньої очистки в порівнянні з конструктивними схемами 2 і 3 спостерігаються великі значення перепаду тиску, особливо при збільшенні витрати робочого середовища.

Конструктивна схема 3 характеризується близьким розташуванням сіткового гофрованого елемента до зони струминного очищення. Внаслідок цього після розвороту потоку в каналі перед сітковим елементом утворюється вихрова зона, що призводить до зміщення неосаджених частинок до нижньої стінки каналу.

У першому ступені попередньої очистки конструктивної схеми 2 після проходження робочим середовищем зони струминного очищення потік рівномірно розподіляється по всьому перерізу каналу, що сприяє рівномірному розподілу полідисперсної фази перед сітковими елементами.

Основні результати і висновки по розділу 3

1. Розроблено узагальнену багатосекційну схему комплексної турбоімпаکتної інтенсифікації очищення стиснутих газів за рахунок: а) підвищення швидкості та рівня турбулентності струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu, дифузіофореzu і в відривних зонах; б) утворення плівки рідини з вловлених крапель з подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння; в) осадження на сіткових гофрованих коагуляторах за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu та капілярних сил; г) уловлення скоагульованих крапель, що виносяться потоком, за рахунок сил тяжіння та інерції. Технологічна послідовність стадій очищення може змінюватись відповідно до схемних рішень і призначення сепараторів газу.

2. Розроблено і досліджено три схемних рішення новітніх турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок, що мають по три конструктивні варіанти виконання, які відрізняються відстанню

між поверхнями осадження та розмірами секцій очищення: відповідно 0,25; 0,5 та 1,0 діаметра вхідного конфузору.

3. Для теоретичних досліджень процесів осадження полідисперсних частинок в елементах проточних частин сепараторів методом трикутного сегментування побудовано двовимірні різницеві сітки в декартовій системі координат. Сформовано початкові та граничні умови для досліджень гідродинамічної структури турбоімпактних сепараторів стиснутих газів ГТУ.

4. Виконано теоретичні дослідження основних гідродинамічних характеристик робочого середовища в турбоімпакті струминному ступені очистки та в гофрованому сепараційному елементі: розподілу швидкості та кінетичної енергії турбулентності у робочих ділянках в діапазоні витрат робочого середовища 500–2200 кг/год.

5. Встановлено, що в окремих ділянках сепаратора швидкість потоку збільшується у 2–2,5 рази, що дозволяє інтенсифікувати осадження частинок за рахунок турбофоретичних ефектів. Визначено, що конструктивний варіант ступенів з шириною секції 0,5 діаметра вхідного конфузору (20 мм) є раціональним з точки зору ефективності очищення, перепаду тиску та розподілу кінетичної енергії турбулентності.

6. Виконано дослідження сумісної роботи двох ступенів очистки робочого середовища від полідисперсної фази: ступеня попередньої очистки та сіткового гофрованого елемента. Проаналізовані основні гідродинамічні характеристики ступенів очищення трьох конструктивних схем з різними розмірами секцій очищення: 10, 20 і 40 мм. В першому ступені очистки для конструктивної схеми з шириною секції 20 мм після проходження робочим тілом зони струминного очищення потік розподіляється по всьому перерізу каналу, що сприяє рівномірному розподілу полідисперсної фази перед сітковими елементами та підвищує ефективність очищення.

Результати досліджень опубліковано в [76,77,83].

РОЗДІЛ 4

ТРИВИМІРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТУРБОІМПАКТНИХ СЕПАРАТОРІВ СТИСНУТИХ ГАЗІВ ДЛЯ ГТУ

З метою детального дослідження основних гідродинамічних характеристик турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ, призначених для очищення робочого середовища від полідисперсної фази, були розроблені тривимірні розрахункові моделі як окремих модулів очистки, так і сепаратора в цілому.

4.1. Розробка тривимірних розрахункових моделей першого ступеня очистки сепараторів

За допомогою систем тривимірного проектування та моделювання Компас-3D та ANSYS розроблено тривимірну розрахункову модель першого ступеня сепараторів стиснутих, що має ширину секції 20 мм.

Робочі розрахункові сітки побудовані згідно геометричним характеристикам конструктивних схем 1-3 (див. розділ 3) і дозволяють проводити розрахунки процесів осадження полідисперсної фази в діапазоні витрат робочого тіла 500-2200 кг/год.

Схеми розрахункових моделей показані на рис. 4.1-4.3.

Перша ступінь очистки робочого середовища складається з вхідного сопла (конфузора), що звужується від 70 до 40 мм в діаметрі.

В конструктивній схемі 1 робоче середовище після проходження вхідного сопла потрапляє в систему сопел перфорованих поверхонь осадження, збільшує швидкість і після цієї ділянки змінює напрям руху на 90 градусів і далі потрапляє в наступну ступінь очистки.

Для конструктивних схем 2 і 3 робоче середовище після зміни напрямку руху одразу попадає у наступну ступінь очистки – зону сіткового гофрованого елементу.

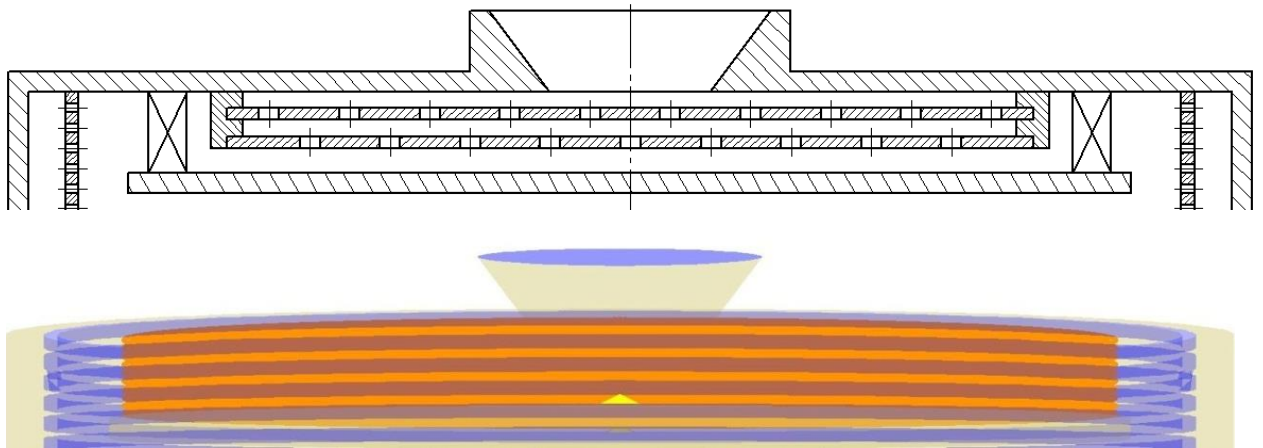


Рисунок 4.1 – Переріз та розрахункова тривимірна модель першого ступеня очистки. Конструктивна схема 1

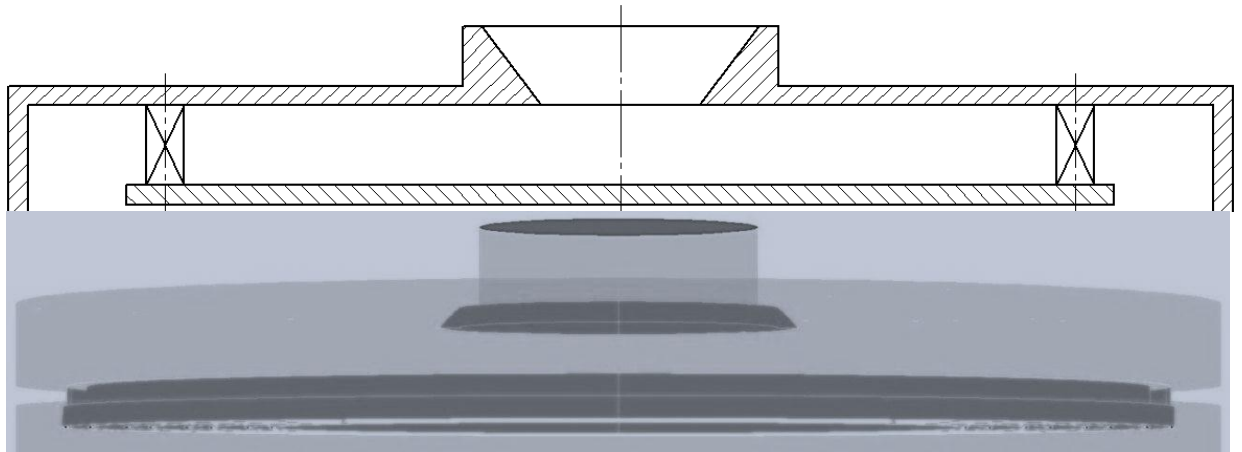


Рисунок 4.2 – Переріз та розрахункова тривимірна модель першого ступеня очистки. Конструктивна схема 2

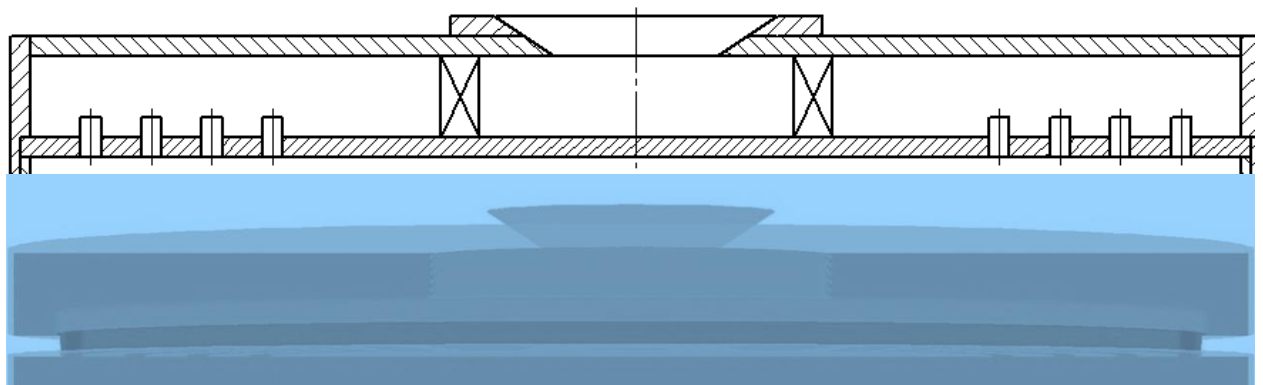


Рисунок 4.3 – Переріз та розрахункова тривимірна модель першого ступеня очистки. Конструктивна схема 3

За допомогою систем тривимірного проектування та моделювання Компас-3D та ANSYS розроблено тривимірну розрахункову модель гофрованого сепараційного елемента з розміром секції 20 мм.

Робочі розрахункові сітки гофрованого елемента побудовані згідно геометричним характеристикам конструктивних схем 1-3 (див. розділ 3). Схеми розрахункових моделей показані на рис. 4.4.

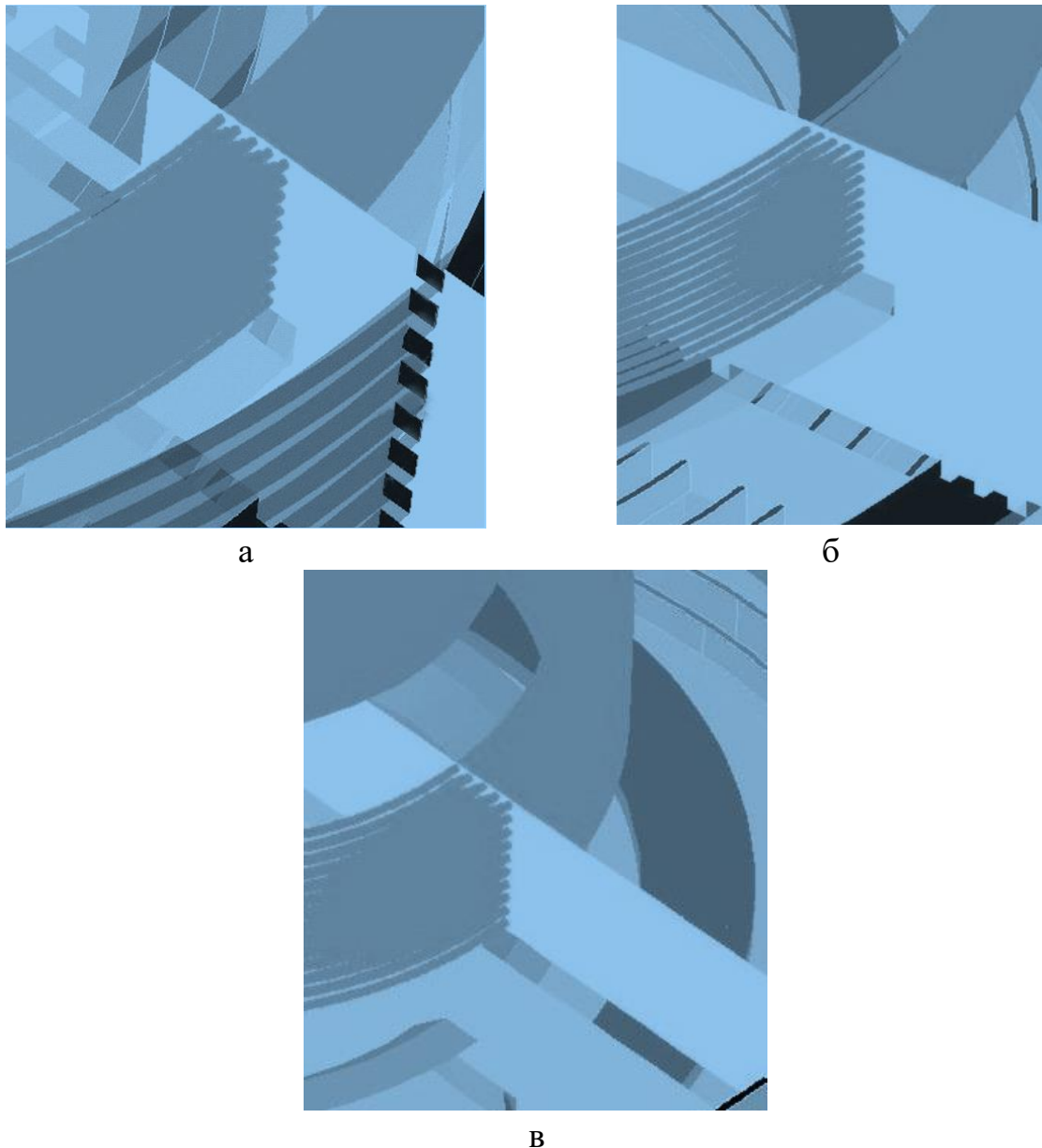


Рисунок 4.4 – Розрахункова тривимірна модель гофрованого сепараційного елемента: а) конструктивна схема 1; б) конструктивна схема 2; в) конструктивна схема 3

Для всіх конструктивних схем ця ступінь очистки складається з сіткового гофрованого сепараційного елемента, який, в свою чергу, містить 10 рядів проволочи діаметром 0,5 мм.

Внаслідок дуже малих розмірів сіткового гофрованого елемента, що впливає на якість розрахункової кінцево-різницевої сітки, було виконано спрощення конструкції і побудовано сітковий сепараційний елемент, який складається з 5 рядів проволочи діаметром 1 мм.

Для конструктивних схем 1 і 2 при проходженні робочим середовищем сіткового елемента потік змінює напрям руху на 180 градусів і потрапляє до другого ступеню сепаратора стиснутих газів.

В конструктивній схемі 3 робоче середовище після проходження сіткового гофрованого елемента потрапляє у другу секцію сепараційного модулю через щілину шириною 5 мм, розташовану по колу. Щілина є уніфікованою конструкцією трубок діаметром 5 мм, які розташовані по колу в реальній геометрії. В даних трубках відбуватиметься прискорення потоку. При виході з трубок робоче середовище змінює напрямок руху на 180 градусів.

4.2. Розробка тривимірної розрахункової моделі уніфікованого сепаратора паливного газу для ГТУ

Для виконання комплексних теоретичних досліджень течії стиснутого газу в проточній частині турбоімпаکتного сепаратору та процесів осадження полідисперсної фази побудовані розрахункові тривимірні моделі уніфікованих сепараторів паливного газу ГТУ, які містять всі чотири ступеня очистки (див. рис. 3.1.).

Розрахункові моделі побудовані згідно з геометричними характеристиками конструктивних схем 1-3 і приведені на рис 4.5-4.7.

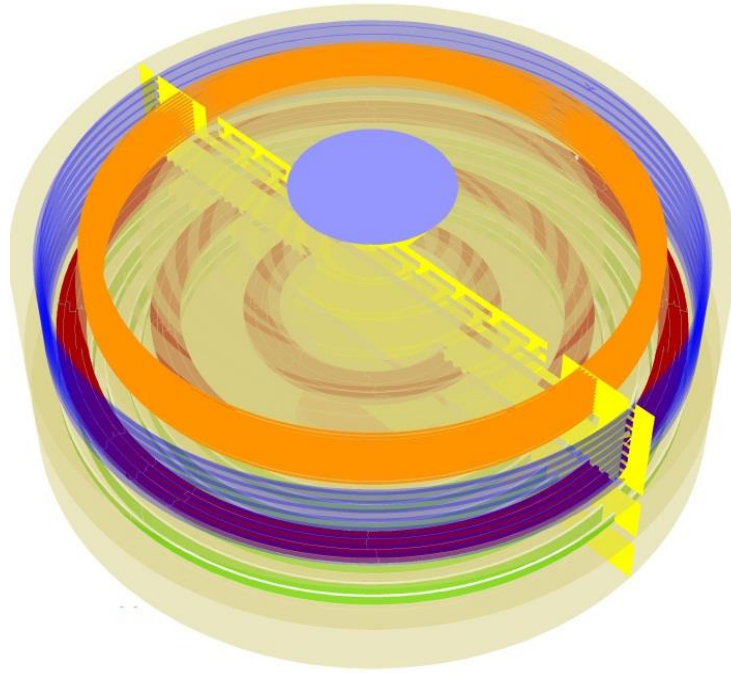


Рисунок 4.5 – Розрахункова тривимірна модель уніфікованого сепаратора паливного газу. Конструктивна схема 1

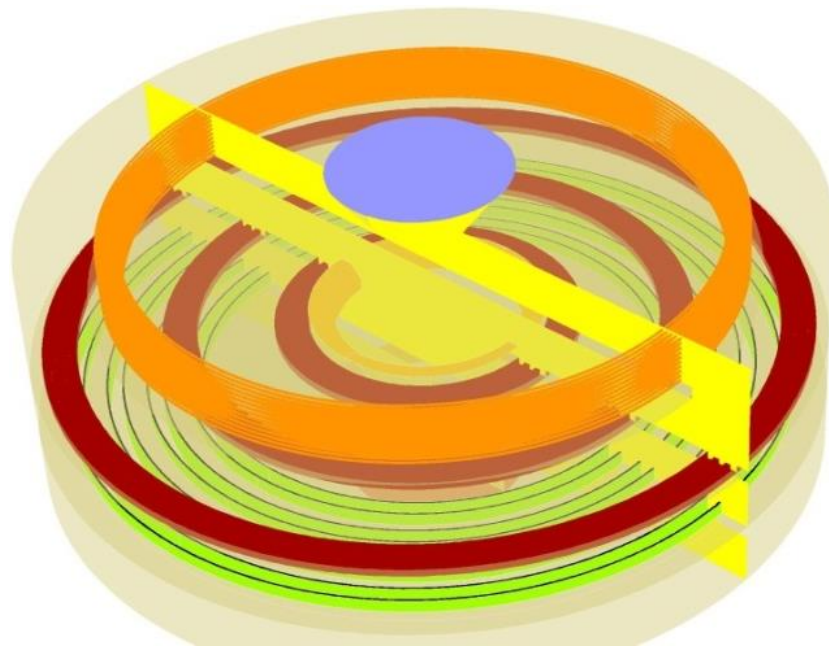


Рисунок 4.6 – Розрахункова тривимірна модель уніфікованого сепаратора паливного газу. Конструктивна схема 2

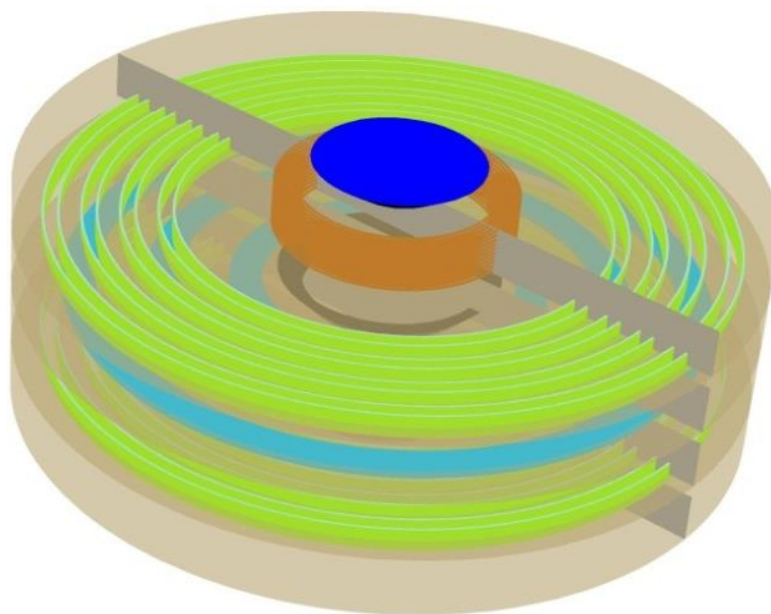


Рисунок 4.7 – Розрахункова тривимірна модель уніфікованого сепаратора паливного газу. Конструктивна схема 3

Уніфікований сепаратор паливних газів складається з чотирьох ступенів шириною 20 мм кожний, які утворюють дві секції, кожна з котрих з'єднана з патрубками зливу.

Перший ступінь очистки газу від високодисперсних частинок складається з вхідного сопла, що звужується від 70 до 40 мм в діаметрі, при проходженні цього сопла напрям потоку змінюється на 90 градусів.

Наступна стадія очистки представляє собою уніфікований сітковий гофрований сепараційний елемент, що складається з п'яти рядів проволочи діаметром 1 мм. В даному елементі здійснюється очищення робочого середовища від більш дрібних частинок дисперсної фази.

Після проходження цього ступеня очистки робоче середовище потрапляє в другу секцію сепаратора: в конструктивній схемі 3 – через щілину шириною 5 мм, розташовану по колу (уніфікована конструкція трубок діаметром 5 мм), в конструктивних схемах 1 і 2 – внаслідок зміни напрямку руху потоку на 180 градусів.

На цій стадії очистки робоче середовище проходить через три секції канавок на стінках каналу, що визиває турбофоретичне осадження частинок.

Далі робоче тіло потрапляє до наступного ступеня сепаратора, в якому через щілину шириною 5 мм потрапляє до четвертого ступеня очистки і через вихідний патрубок виводиться з сепараційного блоку.

4.3. Дослідження ефективності роботи сепаратора стиснутих газів для ГТУ

4.3.1. Дослідження ефективності очищення в турбоімпульсному струминному модулі

Згідно з побудованою тривимірною розрахунковою геометрією з використанням узагальненої математичної моделі процесів осадження полідисперсної фази виконано розрахунки процесів осадження полідисперсних частинок в турбоімпульсному струминному модулі.

При проведенні тривимірних розрахунків використано наступні граничні умови при моделюванні дисперсної фази: мінімальний діаметр частинки 5 мкм, максимальний діаметр частинки 10 мкм, середній (по Заутеру) діаметри частинки 7 мкм, час інжекції $8 \cdot 10^2$ с, кількість інжекції за ітерацію 30.

В табл. 4.1 представлені результати тривимірних розрахунків процесів осадження дисперсних частинок в турбоімпульсному модулі першого ступеня очистки, діаметр яких розподілявся за законом Розіна-Рамлера, для трьох варіантів конструктивних схем 1-3 і для різних витрат стиснутого газу.

За даними таблиці побудовані графіки залежностей (рис. 4.8) коефіцієнтів осадження в турбоімпульсному струминному модулі першого ступеня очистки сепаратора паливного газу від витрати робочого середовища.

Коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після турбоімпульсного струминного ступеня приймає значення від 50 до 60 %. При цьому найбільші значення цей коефіцієнт приймає для конструктивної схеми 2.

Таблиця 4.1

Ефективність очищення в турбоімпульсному модулі

Витрата = 500 кг/год

Витрата = 500 кг/год									
	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	626	0,5800	1080	626	0,5800	1080	615	0,5694
2	1080	629	0,5822	1080	620	0,5738	1080	619	0,5733
3	1080	622	0,5756	1080	628	0,5819	1080	626	0,5800
4	1080	624	0,5778	1080	630	0,5833	1080	625	0,5783
5	1080	624	0,5778	1080	633	0,5857	1080	616	0,5700
6	1080	619	0,5733	1080	634	0,5867	1080	626	0,5794
7	1080	619	0,5733	1080	635	0,5881	1080	617	0,5717
8	1080	622	0,5761	1080	625	0,5786	1080	619	0,5733
9	1080	621	0,5750	1080	630	0,5833	1080	619	0,5733
10	1080	619	0,5733	1080	630	0,5833	1080	623	0,5767
Середнє значення			0,5764	Середнє значення		0,5825	Середнє значення		0,5746

Витрата = 1000 кг/год

	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	590	0,5467	1080	632	0,5856	1080	632	0,5850
2	1080	583	0,5394	1080	634	0,5867	1080	627	0,5806
3	1080	583	0,5394	1080	637	0,5900	1080	633	0,5861
4	1080	596	0,5522	1080	625	0,5794	1080	640	0,5922
5	1080	596	0,5517	1080	637	0,5900	1080	641	0,5933
6	1080	592	0,5478	1080	637	0,5900	1080	637	0,5900
7	1080	590	0,5467	1080	630	0,5833	1080	641	0,5933
8	1080	584	0,5411	1080	640	0,5928	1080	641	0,5933
9	1080	595	0,5506	1080	641	0,5944	1080	637	0,5900
10	1080	591	0,5472	1080	639	0,5917	1080	641	0,5933
Середнє значення			0,5463	Середнє значення		0,5884	Середнє значення		0,5897

Витрата = 1500 кг/год

	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	554	0,5128	1080	644	0,5967	1080	634	0,5867
2	1080	551	0,5100	1080	641	0,5933	1080	626	0,5794
3	1080	552	0,5111	1080	641	0,5933	1080	630	0,5833
4	1080	547	0,5067	1080	642	0,5950	1080	630	0,5833
5	1080	552	0,5111	1080	639	0,5917	1080	637	0,5900
6	1080	552	0,5111	1080	637	0,5900	1080	628	0,5817
7	1080	551	0,5106	1080	637	0,5900	1080	630	0,5833
8	1080	552	0,5111	1080	629	0,5833	1080	640	0,5928
9	1080	551	0,5100	1080	633	0,5867	1080	637	0,5900
10	1080	553	0,5117	1080	637	0,5900	1080	638	0,5906
Середнє значення			0,5106	Середнє значення		0,5910	Середнє значення		0,5861

Витрата = 2200 кг/год

	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	563	0,5211	1080	648	0,6000	1080	634	0,5872
2	1080	582	0,5389	1080	644	0,5967	1080	641	0,5933
3	1080	584	0,5411	1080	641	0,5933	1080	634	0,5867
4	1080	572	0,5300	1080	644	0,5967	1080	634	0,5867
5	1080	589	0,5456	1080	644	0,5967	1080	634	0,5867
6	1080	569	0,5272	1080	640	0,5924	1080	634	0,5867
7	1080	582	0,5389	1080	630	0,5833	1080	641	0,5933
8	1080	584	0,5411	1080	637	0,5900	1080	634	0,5867
9	1080	583	0,5400	1080	637	0,5900	1080	634	0,5867
10	1080	581	0,5383	1080	637	0,5900	1080	634	0,5867
Середнє значення			0,5362	Середнє значення		0,5929	Середнє значення		0,5881

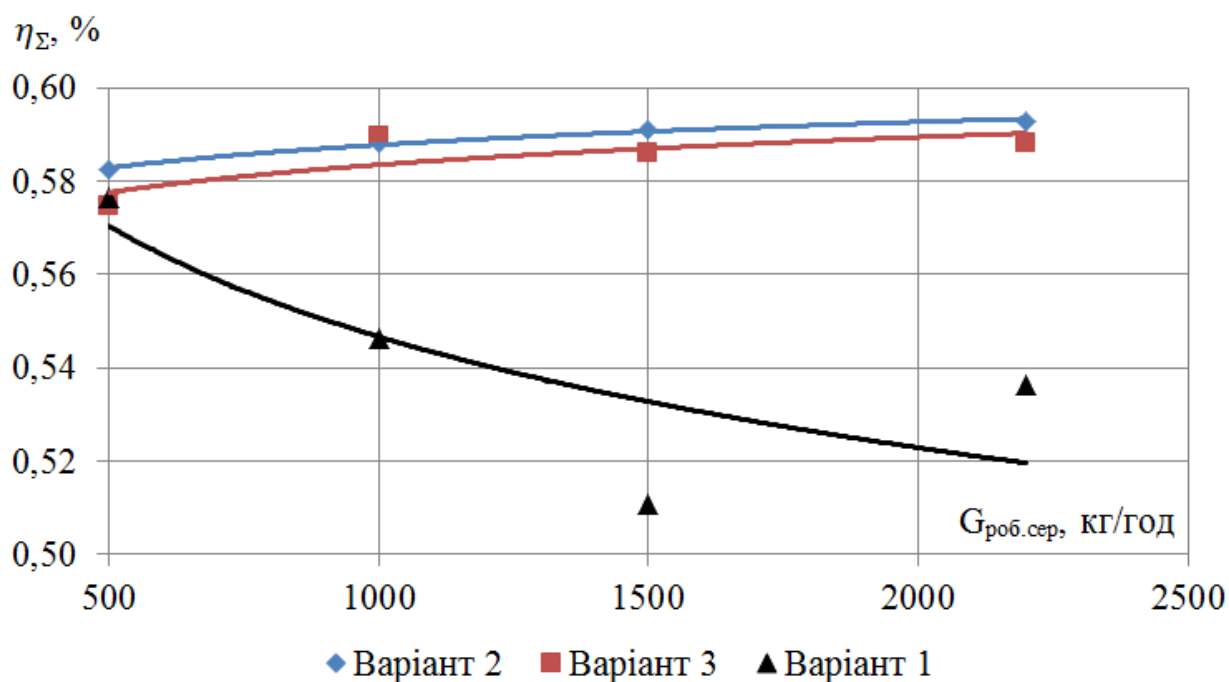


Рисунок 4.8 – Залежності коефіцієнта осадження полідисперсної фракції в турбоімпактічному струминному модулі сепаратора паливного газу

Збільшення витрати робочого середовища для геометрій сепараторів конструктивних схем 2-3 приводить до підвищення значень коефіцієнта осадження часток внаслідок інтенсифікації турбулізації потоку та позитивного впливу турбофоретичного ефекту на осадження частинок.

Із збільшенням витрати робочого середовища від 500 до 2200 кг/год значення коефіцієнта осадження зменшується для розрахункової геометрії конструктивної схеми 1. Це пояснюється особливістю конструкції даного модулю сепаратора, що призводить до значних значень перепаду тисків та неможливості її застосування для великих витрат робочого середовища (1000-2200 кг/год).

4.3.2. Дослідження ефективності очищення в гофрованому сепарційному модулі

Згідно з побудованою тривимірною розрахунковою геометрією з використанням узагальненої математичної моделі процесів осадження

полідисперсної фази виконано розрахунки процесів осадження полідисперсних частинок в гофрованому сепараційному модулі.

В табл. 4.2 представлені результати тривимірних розрахунків процесів осадження дисперсних частинок в гофрованому сепараційному модулі першого ступеня очистки для трьох варіантів конструктивних схем 1-3 і для різних витрат стиснутого газу.

За даними таблиці побудовані графіки залежностей (рис. 4.9) коефіцієнтів осадження після гофрованого сепараційного модулю першого ступеня очистки сепаратора паливного газу, що складається з 10 рядів коагуляційної сітки, від витрати робочого середовища.

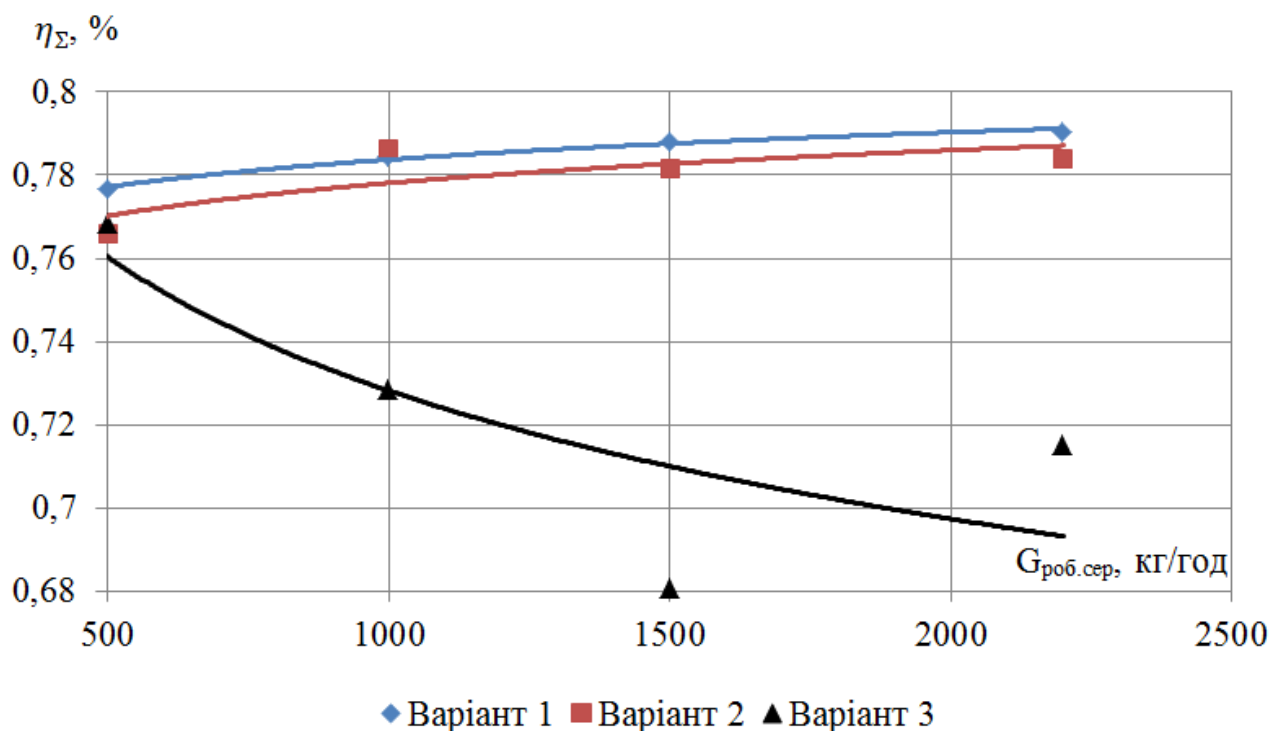


Рисунок 4.9 – Залежності коефіцієнта осадження полідисперсної фракції після гофрованого сепараційного модуля сепаратора паливного газу

Коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після гофрованого сепараційного модулю першого ступеня очистки сепаратора паливного газу приймає значення від 70 до 80 %.

Таблиця 4.2

Ефективність очищення після гофрованому сепараційного модуля

Витрата = 500 кг/год

	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	835	0,7733	1080	835	0,7733	1080	820	0,7593
2	1080	838	0,7763	1080	826	0,7651	1080	826	0,7644
3	1080	829	0,7674	1080	838	0,7759	1080	835	0,7733
4	1080	832	0,7704	1080	840	0,7778	1080	833	0,7711
5	1080	832	0,7704	1080	843	0,7810	1080	821	0,7600
6	1080	826	0,7644	1080	845	0,7822	1080	834	0,7726
7	1080	826	0,7644	1080	847	0,7841	1080	823	0,7622
8	1080	830	0,7681	1080	833	0,7714	1080	826	0,7644
9	1080	828	0,7667	1080	840	0,7778	1080	826	0,7644
10	1080	826	0,7644	1080	840	0,7778	1080	830	0,7689
Середнє значення			0,7686	Середнє значення		0,7766	Середнє значення		0,7661

Витрата = 1000 кг/год

	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	787	0,7289	1080	843	0,7807	1080	842	0,7800
2	1080	777	0,7193	1080	845	0,7822	1080	836	0,7741
3	1080	777	0,7193	1080	850	0,7867	1080	844	0,7815
4	1080	795	0,7363	1080	834	0,7726	1080	853	0,7896
5	1080	794	0,7356	1080	850	0,7867	1080	854	0,7911
6	1080	789	0,7304	1080	850	0,7867	1080	850	0,7867
7	1080	787	0,7289	1080	840	0,7778	1080	854	0,7911
8	1080	779	0,7215	1080	854	0,7904	1080	854	0,7911
9	1080	793	0,7341	1080	856	0,7926	1080	850	0,7867
10	1080	788	0,7296	1080	852	0,7889	1080	854	0,7911
Середнє значення			0,7284	Середнє значення		0,7845	Середнє значення		0,7863

Витрата = 1500 кг/год

	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	738	0,6837	1080	859	0,7956	1080	845	0,7822
2	1080	734	0,6800	1080	854	0,7911	1080	834	0,7726
3	1080	736	0,6815	1080	854	0,7911	1080	840	0,7778
4	1080	730	0,6756	1080	857	0,7933	1080	840	0,7778
5	1080	736	0,6815	1080	852	0,7889	1080	850	0,7867
6	1080	736	0,6815	1080	850	0,7867	1080	838	0,7756
7	1080	735	0,6807	1080	850	0,7867	1080	840	0,7778
8	1080	736	0,6815	1080	840	0,7778	1080	854	0,7904
9	1080	734	0,6800	1080	845	0,7822	1080	850	0,7867
10	1080	737	0,6822	1080	850	0,7867	1080	850	0,7874
Середнє значення			0,6808	Середнє значення		0,7880	Середнє значення		0,7815

Витрата = 2200 кг/год

	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	750	0,6948	1080	1008	0,8000	1080	846	0,7830
2	1080	776	0,7185	1080	1002	0,7956	1080	854	0,7911
3	1080	779	0,7215	1080	997	0,7911	1080	845	0,7822
4	1080	763	0,7067	1080	1002	0,7956	1080	845	0,7822
5	1080	786	0,7274	1080	1002	0,7956	1080	845	0,7822
6	1080	759	0,7030	1080	995	0,7898	1080	845	0,7822
7	1080	776	0,7185	1080	980	0,7778	1080	854	0,7911
8	1080	779	0,7215	1080	991	0,7867	1080	845	0,7822
9	1080	778	0,7200	1080	991	0,7867	1080	845	0,7822
10	1080	775	0,7178	1080	991	0,7867	1080	845	0,7822
Середнє значення			0,7150	Середнє значення		0,7905	Середнє значення		0,7841

При цьому найбільші значення цей коефіцієнт набуває для розрахункової геометрії конструктивної схеми 2. Аналогічно попереднім результатам дослідження турбоімпактного модулю сепараторів, збільшення витрати робочого середовища для геометрій конструктивних схем 2-3 приводить до приросту значень коефіцієнта осадження частинок внаслідок збільшення кінетичної енергії турбулентності та позитивного впливу турбофоретичного ефекту на осадження частинок. Із збільшенням витрати робочого середовища значення коефіцієнта осадження зменшується для розрахункової геометрії схеми 1 через особливості конструкції першого ступеня сепаратора.

4.3.3. Дослідження ефективності очищення в уніфікованому сепараторі паливного газу

Згідно з побудованою тривимірною розрахунковою геометрією з використанням узагальненої математичної моделі процесів осадження полідисперсної фази виконано розрахунки процесів осадження полідисперсних частинок в уніфікованому сепараторі паливного газу.

В табл. 4.3 представлені результати тривимірних розрахунків процесів осадження дисперсних частинок в уніфікованому сепараторі паливного газу для трьох варіантів конструктивних схем 1-3 і для різних витрат стиснутого газу.

За даними таблиці побудовані графіки залежностей (рис. 4.10) коефіцієнтів осадження в уніфікованому сепараторі паливного газу.

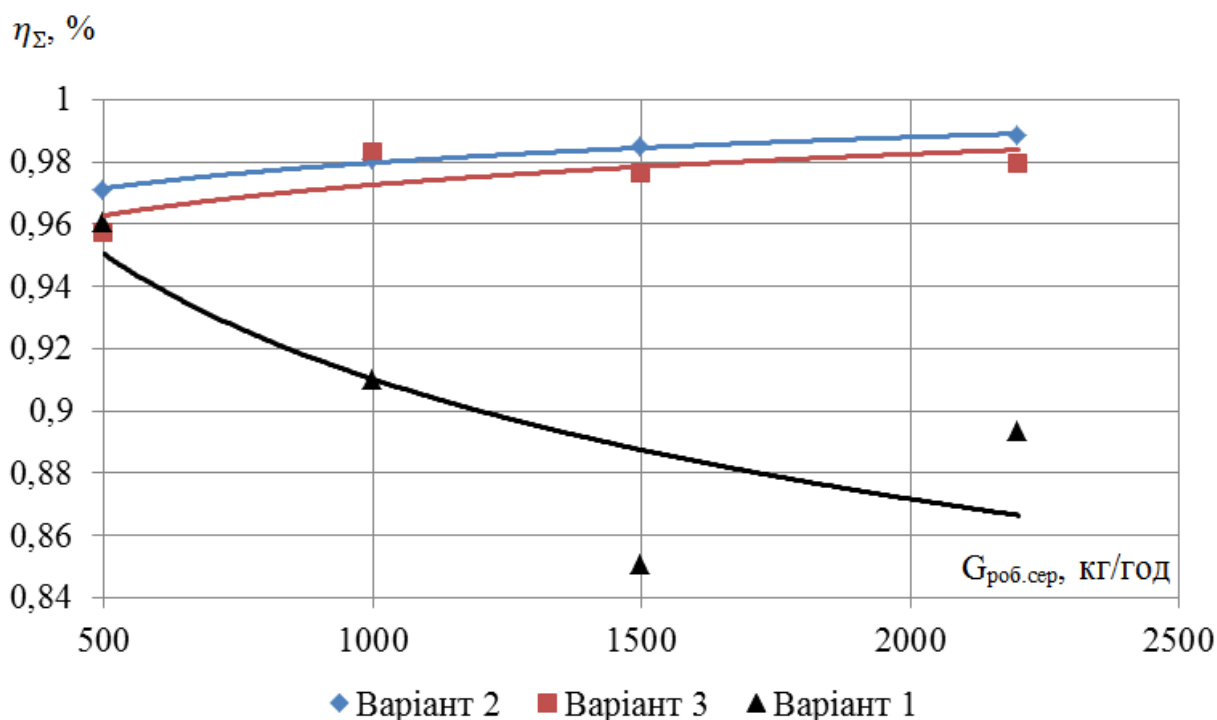


Рисунок 4.10 – Залежності коефіцієнта осадження полідисперсної фракції в уніфікованому сепараторі паливного газу

Сумарний коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після всіх ступенів очистки сепаратора приймає значення від 85 до 99 %. Згідно проведених тривимірних розрахунків гідродинамічної структури потоків та процесів осадження полідисперсної фази раціональною, з точки зору ефективності осадження частинок, є конструктивна схема 2, для якої значення сумарного коефіцієнта осадження полідисперсних частинок є максимальними для кожного окремого ступеня та для всієї конструкції в цілому. Доведено можливість застосування цієї конструктивної схеми в широкому діапазоні витрат робочого середовища із збереженням невисоких значень перепадів тисків та максимальних величин сумарного коефіцієнта осадження частинок. Геометрія конструктивної схеми 1 уніфікованого сепаратора паливного газу може застосовуватися лише для невеликих значень витрат робочого середовища (біля 500 кг/год). Застосування цієї схеми для більших витрат робочого тіла призводить до значних гідравлічних втрат та невисокої ефективності очистки.

Таблиця 4.3

Ефективність очищення в уніфікованому сепараторі паливного газу

Витрата = 500 кг/год

Витрата = 500 кг/год									
	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	1044	0,9667	1080	1044	0,9667	1080	1025	0,9491
2	1080	1048	0,9704	1080	1033	0,9563	1080	1032	0,9556
3	1080	1036	0,9593	1080	1047	0,9698	1080	1044	0,9667
4	1080	1040	0,9630	1080	1050	0,9722	1080	1041	0,9639
5	1080	1040	0,9630	1080	1054	0,9762	1080	1026	0,9500
6	1080	1032	0,9556	1080	1056	0,9778	1080	1043	0,9657
7	1080	1032	0,9556	1080	1059	0,9802	1080	1029	0,9528
8	1080	1037	0,9602	1080	1041	0,9643	1080	1032	0,9556
9	1080	1035	0,9583	1080	1050	0,9722	1080	1032	0,9556
10	1080	1032	0,9556	1080	1050	0,9722	1080	1038	0,9611
Середнє значення			0,9607	Середнє значення		0,9708	Середнє значення		0,9576

Витрата = 1000 кг/год

	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	984	0,9111	1080	1054	0,9759	1080	1053	0,9750
2	1080	971	0,8991	1080	1056	0,9778	1080	1045	0,9676
3	1080	971	0,8991	1080	1062	0,9833	1080	1055	0,9769
4	1080	994	0,9204	1080	1043	0,9657	1080	1066	0,9870
5	1080	993	0,9194	1080	1062	0,9833	1080	1068	0,9889
6	1080	986	0,9130	1080	1062	0,9833	1080	1062	0,9833
7	1080	984	0,9111	1080	1050	0,9722	1080	1068	0,9889
8	1080	974	0,9019	1080	1067	0,9880	1080	1068	0,9889
9	1080	991	0,9176	1080	1070	0,9907	1080	1062	0,9833
10	1080	985	0,9120	1080	1065	0,9861	1080	1068	0,9889
Середнє значення			0,9105	Середнє значення		0,9806	Середнє значення		0,9829

Витрата = 1500 кг/год

Витрата = 1500 кг/год									
	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	923	0,8546	1080	1074	0,9944	1080	1056	0,9778
2	1080	918	0,8500	1080	1068	0,9889	1080	1043	0,9657
3	1080	920	0,8519	1080	1068	0,9889	1080	1050	0,9722
4	1080	912	0,8444	1080	1071	0,9917	1080	1050	0,9722
5	1080	920	0,8519	1080	1065	0,9861	1080	1062	0,9833
6	1080	920	0,8519	1080	1062	0,9833	1080	1047	0,9694
7	1080	919	0,8509	1080	1062	0,9833	1080	1050	0,9722
8	1080	920	0,8519	1080	1050	0,9722	1080	1067	0,9880
9	1080	918	0,8500	1080	1056	0,9778	1080	1062	0,9833
10	1080	921	0,8528	1080	1062	0,9833	1080	1063	0,9843
Середнє значення			0,8510	Середнє значення		0,9850	Середнє значення		0,9769

Витрата = 2200 кг/год

Витрата = 2200 кг/год									
	Конструктивна схема 1			Конструктивна схема 2			Конструктивна схема 3		
№	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження	Загальна кількість частинок	Кількість осаджених частинок	Коефіцієнт осадження
1	1080	938	0,8685	1080	1080	1,0000	1080	1057	0,9787
2	1080	970	0,8981	1080	1074	0,9944	1080	1068	0,9889
3	1080	974	0,9019	1080	1068	0,9889	1080	1056	0,9778
4	1080	954	0,8833	1080	1074	0,9944	1080	1056	0,9778
5	1080	982	0,9093	1080	1074	0,9944	1080	1056	0,9778
6	1080	949	0,8787	1080	1066	0,9873	1080	1056	0,9778
7	1080	970	0,8981	1080	1050	0,9722	1080	1068	0,9889
8	1080	974	0,9019	1080	1062	0,9833	1080	1056	0,9778
9	1080	972	0,9000	1080	1062	0,9833	1080	1056	0,9778
10	1080	969	0,8972	1080	1062	0,9833	1080	1056	0,9778
Середнє значення			0,8937	Середнє значення		0,9882	Середнє значення		0,9801

На рис. 4.11-4.13 наведені розрахункові контури та вектори швидкостей робочого тіла для трьох конструктивних схем уніфікованого сепаратора паливного газу для ГТУ при витраті робочого тіла 1000 кг/год.

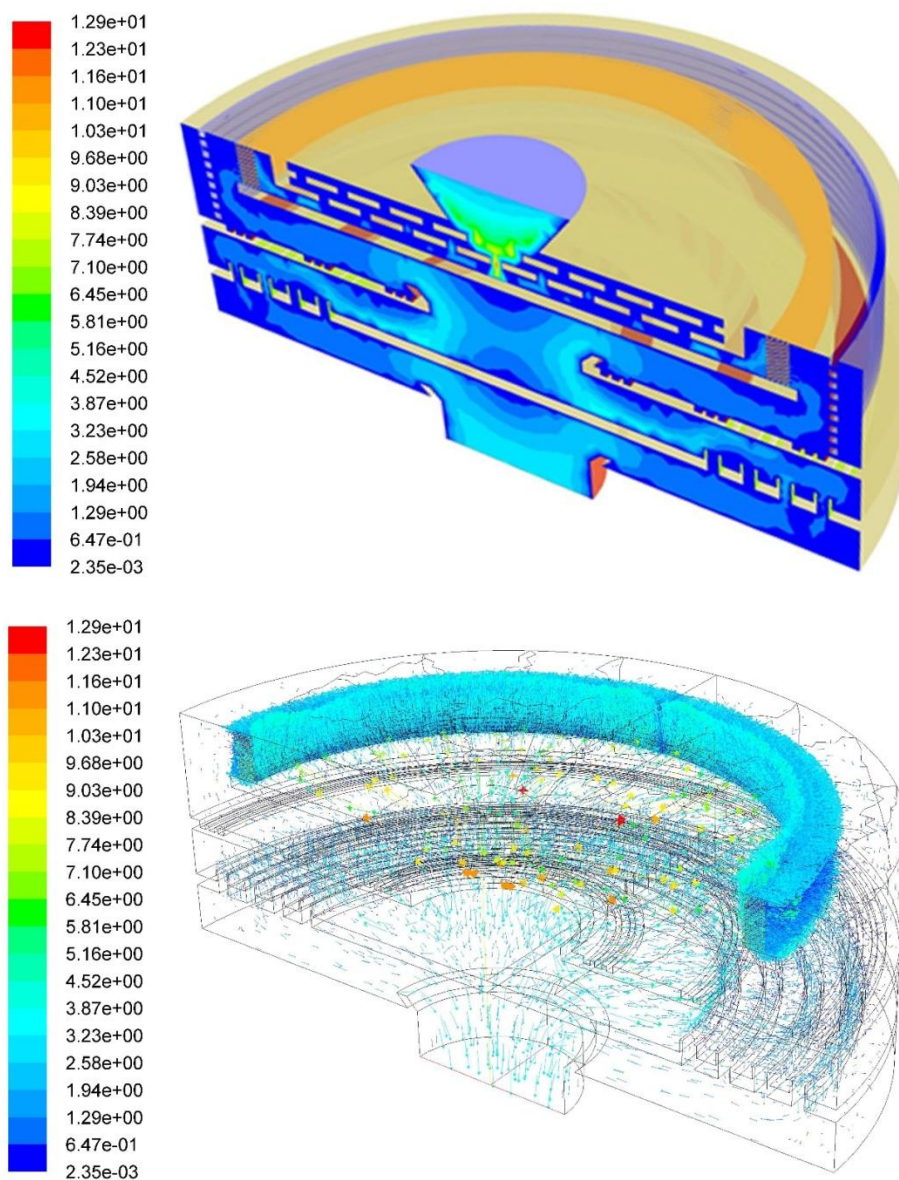


Рисунок 4.11 – Конттури та вектори швидкості (м/с) робочого тіла.
Конструктивна схема 1.

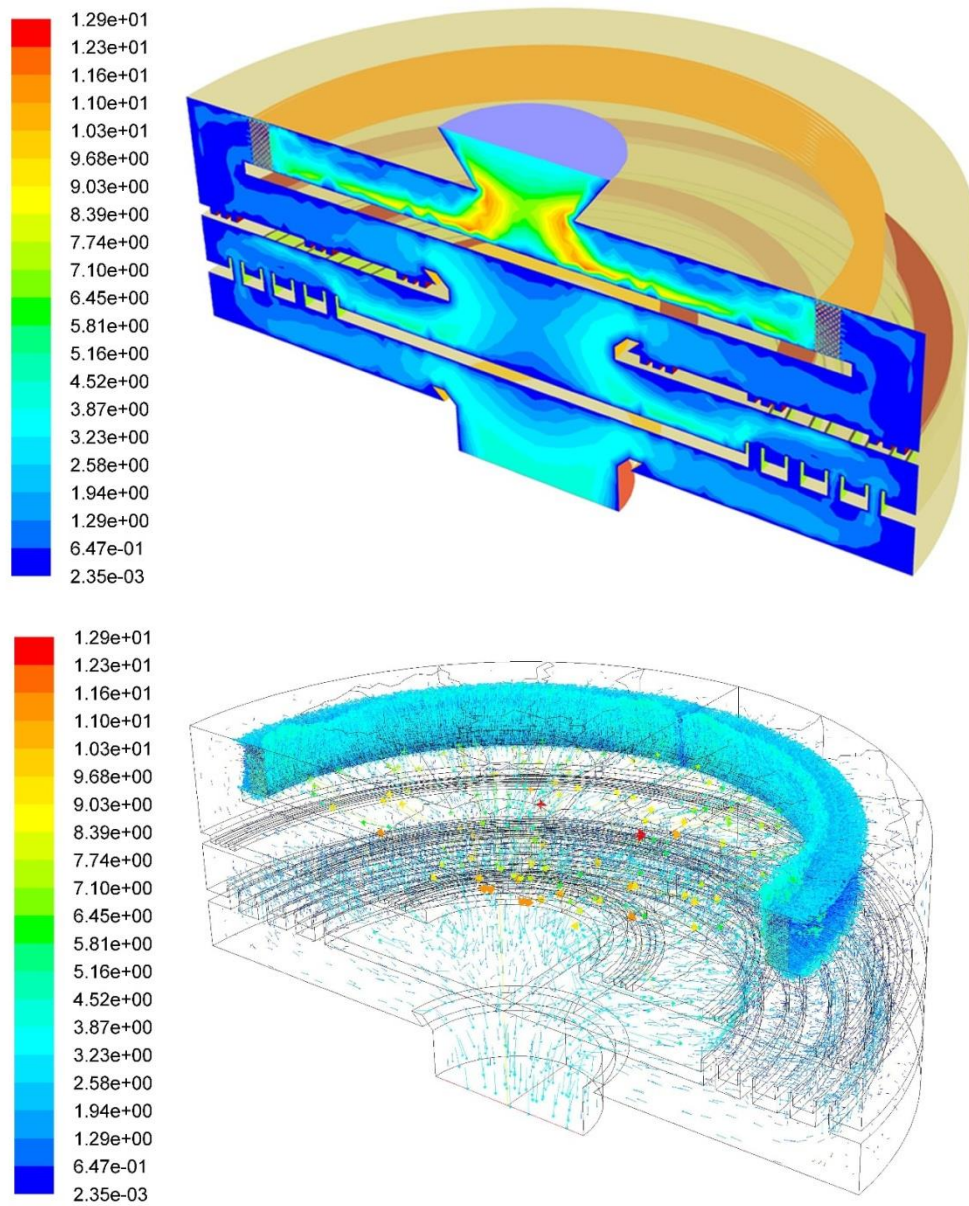


Рисунок 4.12 – Контури та вектори швидкості (м/с) робочого тіла.
Конструктивна схема 2.

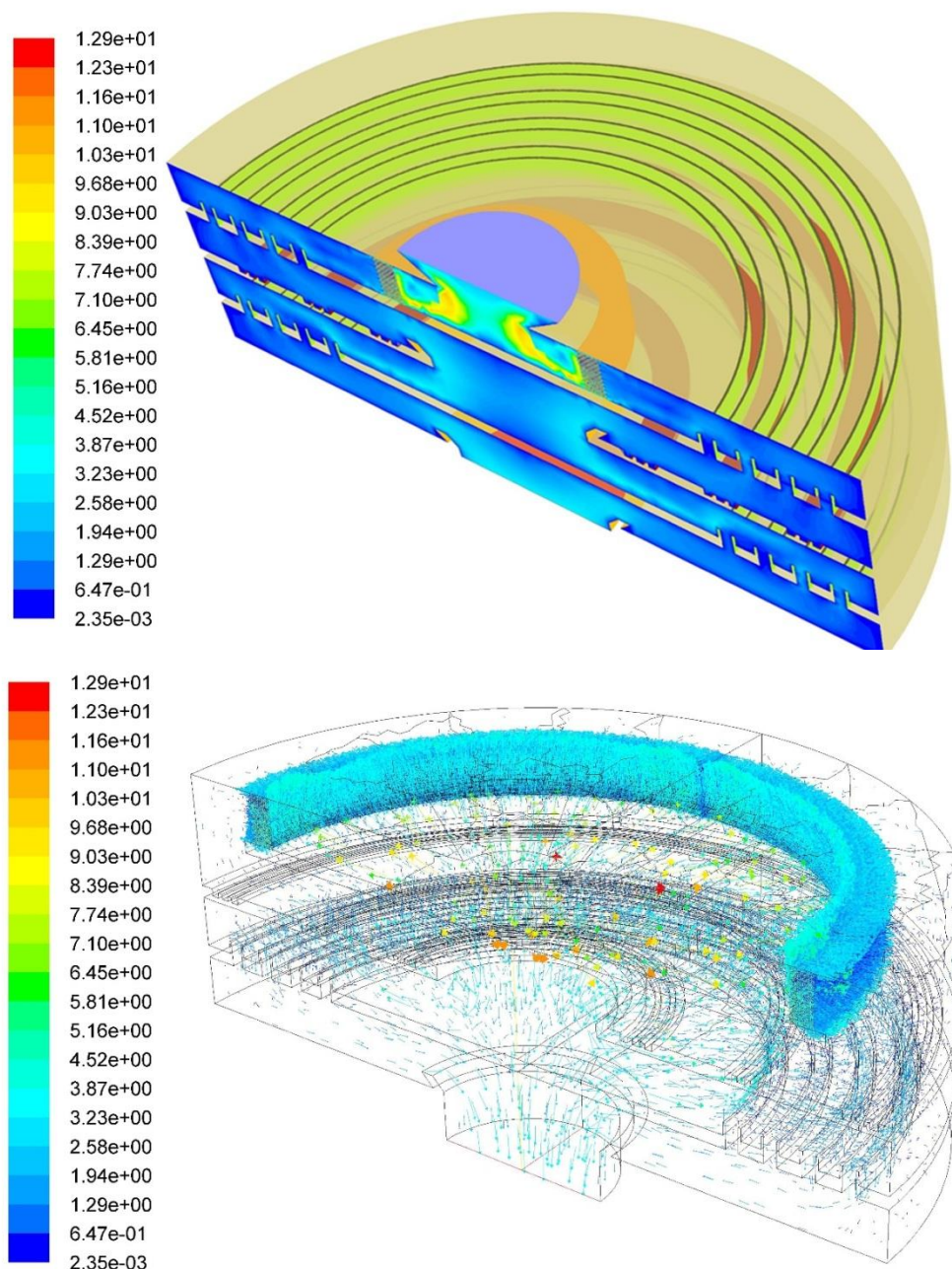


Рисунок 4.13 – Контури та вектори швидкості (м/с) робочого тіла.
Конструктивна схема 3.

Вони дають картину течії робочого тіла в строгій відповідності з особливостями робочої технологічної послідовності турбоімпульсної та коагуляційної інтенсифікації очищення стиснутих газів від дисперсних частинок, яку розглянуто в розділі 3.

На рис. 4.14. наведено розподіл частинок полідисперсної фази в перерізах уніфікованого сепаратора газу конструктивної схеми 2 в різні моменти часу після впорскування частинок, за допомогою якого розраховувались коефіцієнти осадження.

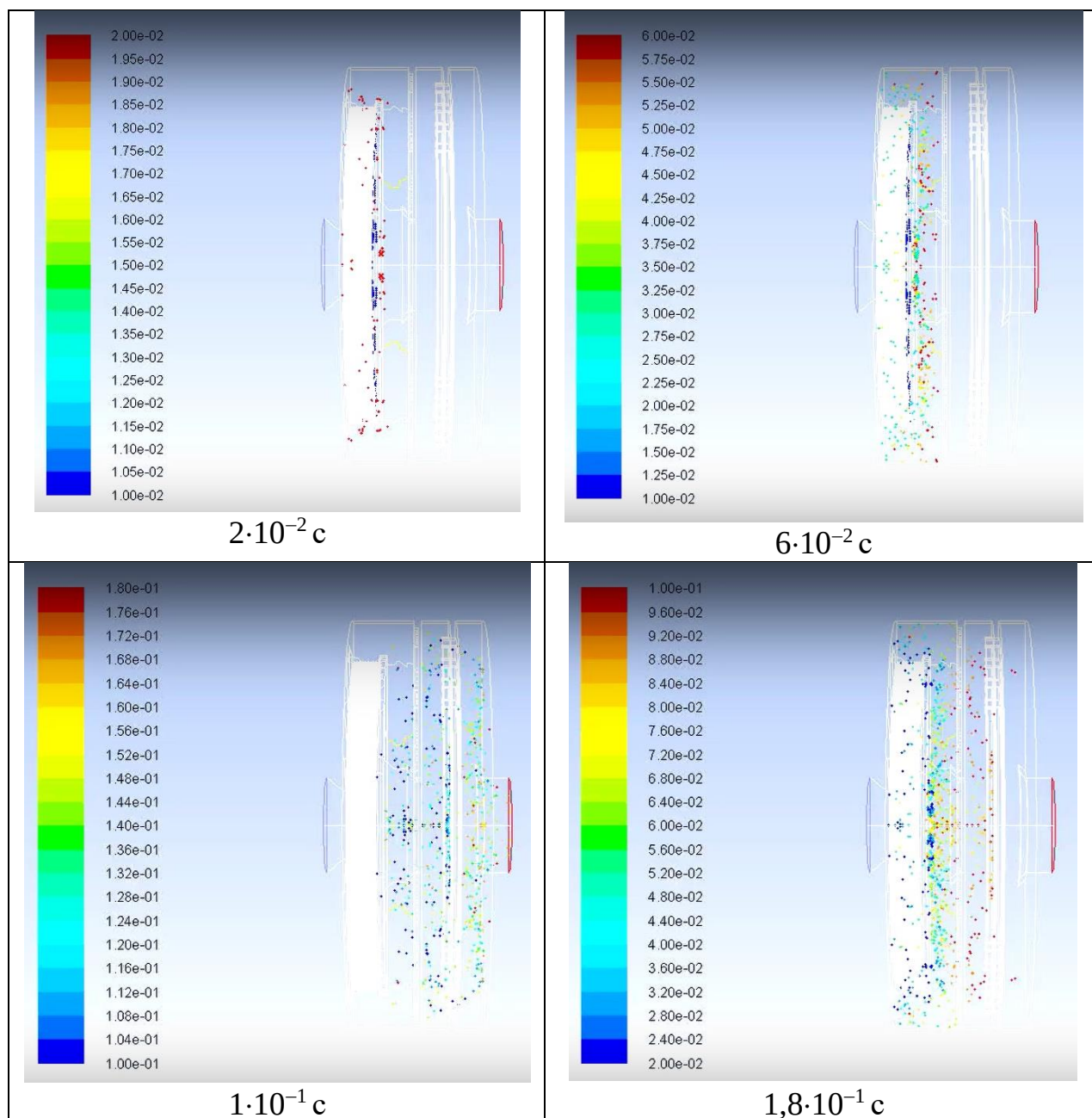


Рисунок 4.13 – Розподіл частинок полідисперсної фази для різних моментів часу

Основні результати і висновки по розділу 4

1. З метою детального дослідження основних гідродинамічних характеристик турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ, призначених для очищення робочого середовища від полідисперсної фази, розроблені тривимірні розрахункові моделі турбоімпактного струминного і гофрованого сепараційного модулів для трьох різних конструктивних схем сепаратора.

2. Розроблені узагальнені розрахункові тривимірні моделі уніфікованого сепаратора паливних газів, який складається зі чотирьох ступенів очистки, призначеного для роботи в діапазоні витрат робочого середовища 500-2000 кг/год.

3. Виконано розрахунки процесів осадження полідисперсних частинок в турбоімпактному струминному модулі сепараторів очищення паливного газу для ГТУ. Встановлено, що розрахунковий коефіцієнт осадження полідисперсної фракції в цьому модулі приймає значення від 50 до 60 %.

4. Виконано ряд тривимірних варіантних розрахунків процесів очищення стиснутого паливного газу в гофрованому сепараційному модулі, які дозволили встановити, що коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після цього модулю дорівнює 70-80 %.

5. Розроблено схемне рішення уніфікованого сепараційного модулю сепаратора паливного газу ГТУ з максимальною ефективністю очищення. Виконано теоретичні дослідження цього уніфікованого модулю, які показали, що сумарний коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після всіх чотирьох ступенів очистки приймає значення від 85 до 99 %. Доведено можливість застосування уніфікованого сепараційного модулю в широкому діапазоні витрат робочого тіла із збереженням невисоких значень перепадів тисків.

Результати досліджень опубліковано в [5,79,80].

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ТУРБОІМПАКТНИХ СЕПАРАТОРІВ СТИСНУТИХ ГАЗІВ.
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

5.1. Розробка конструкції сепаратора паливного газу для ГТУ

За результатами теоретичних досліджень ефективності роботи турбоімпаکتного сепаратора паливних газів для ГТУ були розроблені інженерно-конструкторські рішення для найбільш ефективного варіанта сепаратора.

На рис. 5.1 наведена розроблена в системі проектування Компас-3D тривимірна конструкція сепаратора паливного газу, яка була використана для побудови робочих креслень для виготовлення експериментального зразку сепаратора.

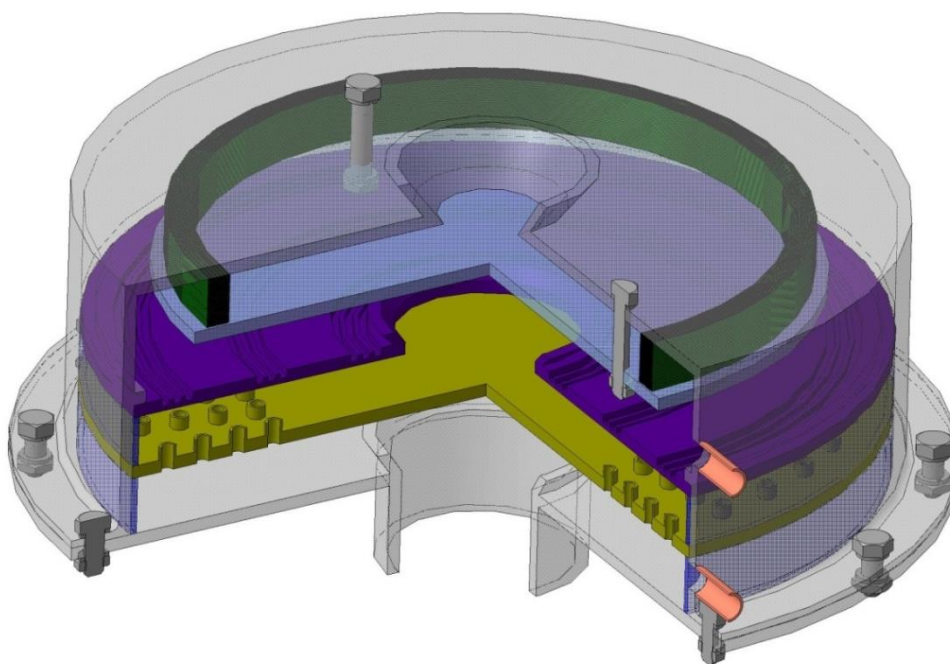


Рисунок 5.1 – Тривимірна конструктивна схема уніфікованого
турбоімпаکتного сепаратора паливного газу

Газ з необхідним робочим тиском потрапляє у конусну трубу, діаметр якої на вході дорівнює 70 мм та звужується до діаметра 40 мм. Завдяки звужуючому конусу збільшується швидкість робочого тіла.

В першому ступені очистки за допомогою елементів кріплення закріплена пластина діаметром 250 мм. На діаметрі 210 мм цієї пластини знаходиться гофрований сепараційний модуль, ширина якого становить 10 мм, а висота дорівнює розміру першого ступеня і складає 20 мм. Гофрований сепараційний елемент складається з десяти рядів проволочки діаметром 0,5 мм. Проволока встановлена у шаховому порядку, міжосьова відстань повздовжньої та вертикальної складової дорівнює 1 мм. Завдяки такому розташуванню гофрованого елемента забезпечується високий коефіцієнт осадження твердої та рідкої фракцій. Гофрований елемент притискається до диску та верхньої частини сепаратора за допомогою кріпильних елементів.

У нижній частині першого ступеня сепаратора знаходяться канавки прямокутної форми 3х2 мм на відстані 27 мм.

У нижній частині першої секції сепаратора паливного газу знаходиться зливний патрубок. Після осадження на стінки сепаратора твердої та рідкої фракцій під дією сили тяжіння вона видаляється через зливний трубопровід.

При вході газу у другу секцію очистки сепаратору паливного газу виконано спеціальний конусний торець, який перешкоджає потраплянню сконденсованої твердої та рідкої фракцій у наступну ступінь очистки.

У другій секції сепаратора на діаметрі 270, 240 та 180 мм відповідно знаходяться наскрізні прямокутні канавки 5х10 мм.

У другій секції очистки паливних газів розташовано диск з наскрізними патрубками, розміщених у чотири ряди. Наскрізні патрубки розташовані радіально на міжосьовій відстані 10–15 мм та виступають над поверхнею на 5 мм. Діаметр наскрізних патрубків дорівнює 5 мм, їх товщина 1 мм.

У нижній частині другої секції сепаратора паливного газу також знаходиться зливний патрубок, через який видаляється тверда та рідка фракція.

Креслення дослідного зразку сепаратору паливного газу показано на рис. 5.2. Сепаратор спроектовано для роботи в діапазоні об'ємних витрат газу від 20 до 150 м³/г, що відповідає параметрам гідродинамічному стану в проточній

частині сепаратору паливного газу ГТУ з витратою 500-2200 кг/год при тиску 1,6-3,6 МПа.

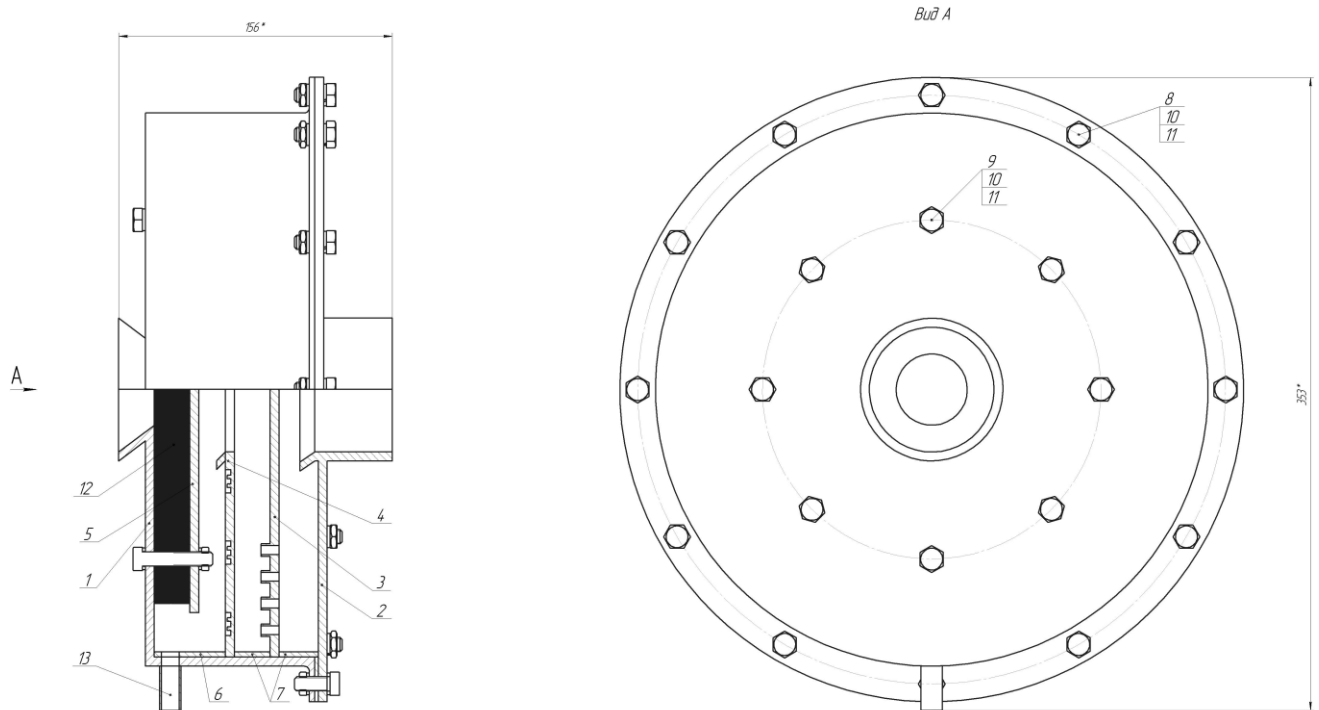


Рисунок 5.2 – Креслення дослідного зразку турбоімпактного сепаратора паливного газу:

1 – корпус; 2 – задня стінка; 3 – перегородка третього ступеня; 4 – перегородка другого ступеня; 5 – імпактна пластина першого ступеня; 6,7 кільцеві фіксатори; 8,9,10,11 – гвинти з шайбами; 12 – коагулятор; 13 – зливний патрубок

Згідно розроблених креслень виготовлено дослідний зразок турбоімпактного сепаратору паливного газу ГТУ. Його фотографії наведені на рис.5.3, а розміщення на експериментальному стенді показано на рис. 5.4.



Рисунок 5.3 – Фотографії дослідного зразку турбоімпактного сепаратора паливного газу для ГТУ



Рисунок 5.4 – Розміщення дослідного зразку турбоімпактного сепаратора паливного газу на експериментальному стенді

5.2. Результати експериментальних досліджень турбоімпаکتного сепаратора паливного газу для ГТУ

Програма стендових випробувань турбоімпаکتного сепаратора дозволяла охопити діапазон витрат повітря через нього від 30 до 150 м³/год, відповідний витратам стисненого паливного газу для робочих режимів ГТУ. Початкова концентрація високодисперсного аерозолю на вході сепаратора досягала 800 мг/м³.

Для обробки результатів використовувалася наступна методика. Спочатку проводилася фіксація параметрів двофазного середовища на вході і виході за допомогою відповідних пристроїв. Потім за формулами (2.6)-(2.8) визначалися показники ефективності сепаратора, які вносилися до відповідних таблиць.

Проточна частина сепаратора паливного газу містила турбоімпактні і коагулюючі модулі, які досліджувалися з метою отримання раціональних геометричних параметрів. Це досягалося шляхом збільшення числа шарів сіток в коагуляторі, варіюванням діаметрами дротів сіток та ін.

При обробці експериментальних даних розраховувався також виніс крапель з різних модулів сепаратора за формулою

$$g_{\text{вих}} = C_{\text{вих}} \cdot G_{\text{пов}} ,$$

де $G_{\text{пов}}$ – витрата газу, що очищається.

Крім того, знаходився приріст ефективності очищення за рахунок використання наступного модулю очистки в порівнянні з попереднім:

$$\Delta\eta_{\Sigma} = \eta_{\Sigma 1} - \eta_{\Sigma 2} .$$

Результати експериментальних досліджень наведено в табл. 5.1-5.5.

Таблиця 5.1

Результати експериментальних досліджень сепаратора при атмосферному тиску і витраті газу 30 м³/год, що відповідає витраті паливного газу 500 кг/год при тиску 3,0 МПа

№	$G_{\text{пов}},$ м³/год	$T_{\text{вх}},$ °C	$C_{\text{вх}},$ мг/м³	$g_{\text{вх}},$ кг/год	$\Delta P,$ кПа	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$\Delta \eta_{\Sigma}, \%$
						без коагулятора			з гофрованим коагулятором			
1	30	25	810	0.0245	0.7	170	0.0051	79.01	6	0.00018	99.26	20.25
2	30	25	805	0.0241	0.7	125	0.0037	84.47	4	0.00012	99.50	15.03
3	30	25	806	0.02418	0.7	117	0.0035	85.48	3	0.00009	99.63	14.14
4	30	25	808	0.0242	0.7	117	0.0035	85.52	13	0.00042	98.39	12.87
5	30	25	804	0.0240	0.7	145	0.0044	81.97	6	0.00018	99.25	17.29
6	30	25	805	0,0241	0.7	135	0.0041	83.23	4	0.00012	99.50	16.27
7	30	25	812	0.02436	0.7	163	0.0049	79.93	13	0.00042	98.40	18.47
8	30	25	815	0.02445	0.7	161	0,0048	83.56	16	0.00048	98.04	14.48
9	30	25	804	0.0240	0.7	162	0.0048	79.85	7	0,00021	99.13	19.28
10	30	25	808	0.0242	0.7	123	0.0037	84.78	7	0.00021	99.14	14.36
$\Sigma/_{10}$	30	25	807.7	0.02414	0.7	139.1	0.0042	82.78	7.9	0.00024	99.03	16.24

Таблиця 5.2

Результати експериментальних досліджень сепаратора при атмосферному тиску і витраті газу 60 м³/год, що відповідає витраті паливного газу 1000 кг/год при тиску 3,0 МПа

№	$G_{\text{пов}},$ м³/год	$T_{\text{вх}},$ °C	$C_{\text{вх}},$ мг/м³	$g_{\text{вх}},$ кг/год	$\Delta P,$ кПа	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$\Delta\eta_{\Sigma}, \%$
						без коагулятора			з гофрованим коагулятором			
1	60	25	816	0.0494	1.2	170	0.010	79.17	16	0.00096	98.04	18.87
2	60	25	801	0.0481	1.2	116	0.007	85.52	3	0.00018	99.63	14.11
3	60	25	804	0.0482	1.2	113	0.0068	85.95	1	0.00006	99.88	13.93
4	60	25	809	0.0485	1.2	112	0.0067	86.16	10	0.0006	98.76	12.61
5	60	25	803	0.0482	1.2	148	0.0088	81.57	8	0.00048	99.01	17.43
6	60	25	806	0.0484	1.2	132	0.0079	83.62	8	0.00048	99.01	15.38
7	60	25	812	0.0487	1.2	153	0.0092	81.16	13	0.00078	98.40	17.24
8	60	25	815	0.0489	1.2	132	0.0079	83.80	8	0.00048	99.02	15.21
9	60	25	801	0.0481	1.2	169	0.010	78.90	4	0.00024	99.50	20.60
10	60	25	811	0.0486	1.2	136	0.0082	83.23	10	0.0006	98.77	15.54
$\Sigma/_{10}$	60	25	807.8	0.0484	1.2	138.1	0.0083	82.91	8.1	0.00049	99.002	16.09

Таблиця 5.3

Результати експериментальних досліджень сепаратора при атмосферному тиску і витраті газу 90 м³/год, що відповідає витраті паливного газу 1500 кг/год при тиску 3,0 МПа

№	$G_{\text{пов}},$ м³/год	$T_{\text{вх}},$ °C	$C_{\text{вх}},$ мг/м³	$g_{\text{вх}},$ мг/год	$\Delta P,$ кПа	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$C_{\text{вих}},$ кг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$\Delta\eta_{\Sigma}, \%$
						без коагулятора			з гофрованим коагулятором			
1	90	25	821	0.073 9	1.9	120	0.0101	85.38	6	0.00054	99.27	13.89
2	90	25	825	0.074 3	1.9	110	0.0099	86.67	4	0.00036	99.52	12.85
3	90	25	809	0.072 8	1.9	118	0.0106	85.42	6	0.00054	99.26	13.84
4	90	25	813	0.072 3	1.9	107	0.0096	86.83	14	0.0013	98.28	11.44
5	90	25	816	0.073 4	1.9	107	0.0096	86.89	6	0.00054	99.26	12.38
6	90	25	806	0.072 6	1.9	105	0.0095	86.97	8	0.00072	99.01	12.04
7	90	25	811	0.072 2	1.9	115	0.0104	85.82	12	0.0011	98.52	12.70
8	90	25	817	0.073 5	1.9	134	0.012	83.60	5	0.00045	99.39	15.79
9	90	25	809	0.072 8	1.9	120	0.011	85.17	7	0.00063	99.14	13.97
10	90	25	814	0.072 4	1.9	123	0.0111	84.89	13	0.0013	98.40	13.51
$\Sigma/10$	90	25	814	0.073 3	1.9	116	0.0104	85.77	8	0.00072	99.01	13.24

Таблиця 5.4

Результати експериментальних досліджень сепаратора при атмосферному тиску і витраті газу 120 м³/год, що відповідає витраті паливного газу 2000 кг/год при тиску 3,0 МПа

№	$G_{\text{пов}},$ м³/год	$T_{\text{вх}},$ °C	$C_{\text{вх}},$ мг/м³	$g_{\text{вх}},$ кг/год	$\Delta P,$ кПа	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$\Delta\eta_{\Sigma}, \%$
						без коагулятора			з гофрованим коагулятором			
1	120	25	825	0,0990	2.6	114	0.014	86.18	6	0.00072	99.27	13.09
2	120	25	811	0,0973	2.6	90	0.011	88.90	7	0.00084	99.14	10.23
3	120	25	819	0,0983	2.6	89	0.011	89.13	8	0.00096	99.02	9.89
4	120	25	823	0,0987	2.6	99	0.012	87.97	12	0.00144	98.54	10.57
5	120	25	809	0.0971	2.6	82	0.0098	89.86	8	0.00096	99.01	9.15
6	120	25	814	0.0977	2.6	94	0.0112	88.45	5	0.0006	99.39	10.93
7	120	25	817	0.09804	2.6	95	0.0112	88.37	18	0.0022	97.80	9.43
8	120	25	808	0.0970	2.6	84	0.0101	89.60	6	0.00072	99.26	9.65
9	120	25	809	0.0971	2.6	87	0.0104	89.25	7	0.00084	99.14	9.89
10	120	25	825	0.0990	2.6	100	0.012	87.88	4	0.00048	99.52	11.64
$\Sigma/_{10}$	120	25	816.0	0.0979	2.6	93.4	0.0112	88.56	8.1	0.00097	99.01	10.45

Таблиця 5.5

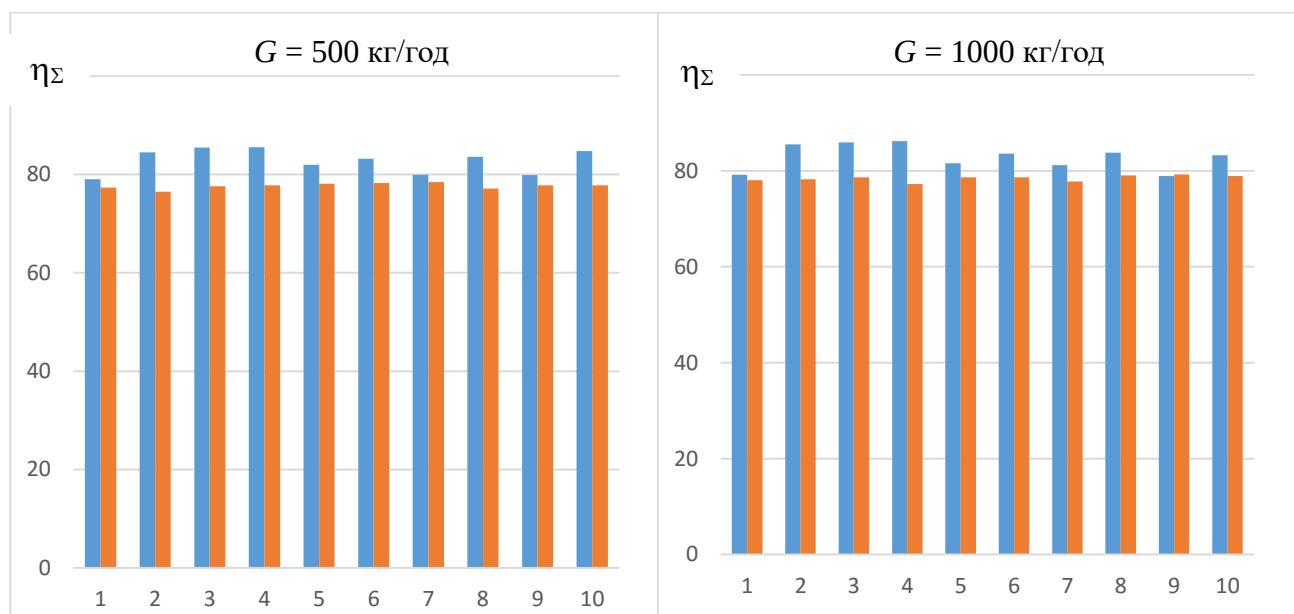
Результати експериментальних досліджень сепаратора при атмосферному тиску і витраті газу 150 м³/год, що відповідає витраті паливного газу 2200 кг/год при тиску 3,0 МПа

№	$G_{\text{пов}},$ м³/год	$T_{\text{вх}},$ °C	$C_{\text{вх}},$ мг/м³	$g_{\text{вх}},$ кг/год	$\Delta P,$ кПа	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$C_{\text{вих}},$ мг/м³	$g_{\text{вих}},$ кг/год	$\eta_{\Sigma}, \%$	$\Delta \eta_{\Sigma}, \%$
						без коагулятора			з гофрованим коагулятором			
1	150	25	830	0.1245	3.2	109	0.016	86.87	8	0.0012	99.04	12.17
2	150	25	824	0.1246	3.2	96	0.0142	88.35	5	0.00075	99.39	11.04
3	150	25	827	0.1241	3.2	97	0.0143	88.27	16	0.0024	98.07	9.79
4	150	25	829	0.1244	3.2	94	0.0141	88.66	8	0.0012	99.04	10.37
5	150	25	831	0.1246	3.2	97	0.0143	88.33	11	0.00165	98.682	10.35
6	150	25	819	0.1228	3.2	90	0.0135	89.01	7	0.00105	99.15	10.13
7	150	25	817	0.1226	3.2	83	0.0125	89.84	12	0.0018	98.53	8.69
8	150	25	816	0.1225	3.2	85	0.0126	89.58	9	0.00135	98.90	9.31
9	150	25	818	0.1227	3.2	89	0.0134	89.12	9	0.00135	98.90	9.78
10	150	25	825	0.1237	3.2	100	0.015	87.88	4	0.0006	99.52	11.64
$\Sigma/_{10}$	150	25	823.6	0.1236	3.2	94.0	0.0141	88.59	8.9	0.00134	98.92	10.33

З аналізу даних таблиць 5.1-5.5 видно, що ефективність очищення від аерозолів в турбоімпульсному сепараторі без коагулятора в усьому дослідженому діапазоні витрат газу складає від 82 до 88 %, а з використанням гофрованого коагулятора – від 98 до 99,5 % при аеродинамічному опорі від 0,7 до 3,2 кПа.

Ці дані підтверджують результати тривимірних розрахунків гідродинамічного стану в сепараторах стиснутого газу, наведених в розділі 4.

На рис. 5.5-5.6 приведено порівняльні діаграми сумарних коефіцієнтів ефективності очищення η_{Σ} , які отримані теоретичним шляхом застосуванням універсальної математичної моделі процесів турбоімпульсного переносу та при виконанні експериментальних досліджень (режими 1-10) на розроблених стендах.



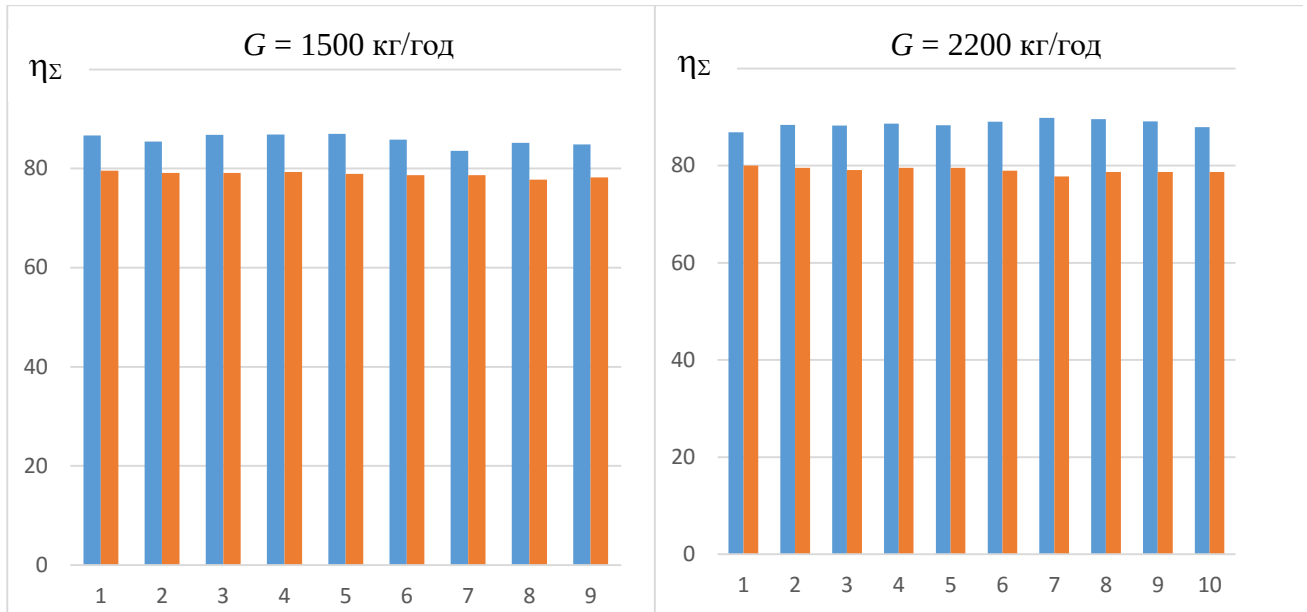
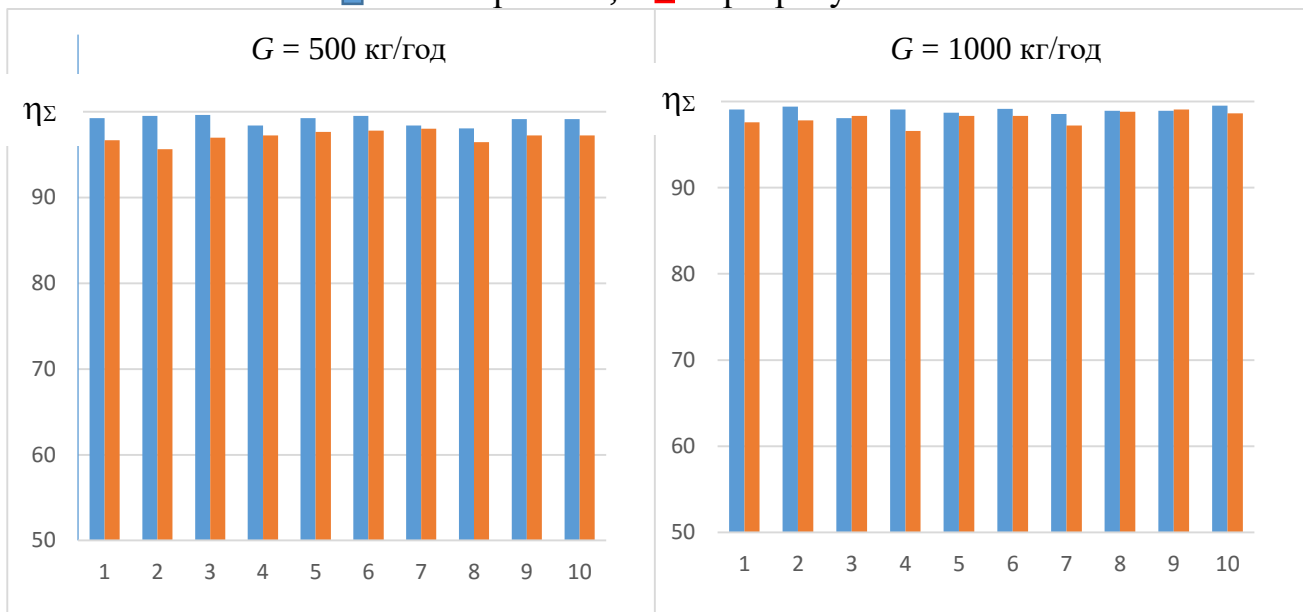


Рисунок 5.5 – Порівняння експериментальних і розрахункових значень коефіцієнта ефективності очищення сепаратора без гофрованого коагулятора:

■ – експеримент; ■ – розрахунок



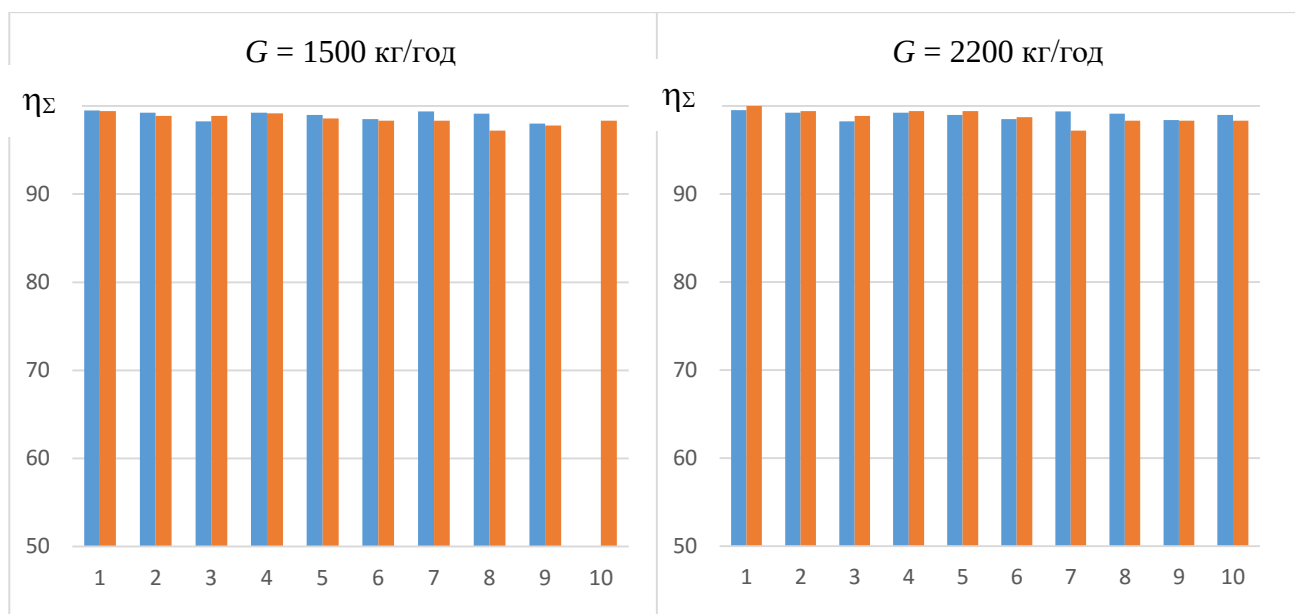


Рисунок 5.6 – Порівняння експериментальних і розрахункових значень коефіцієнта ефективності очищення сепаратора з гофрованим коагулятором:
■ – експеримент; ■ – розрахунок

На рис. 5.5 представлені дані по ефективності очищення сепаратора паливного газу без гофрованого коагулятора для витрат 500-2200 кг/год. Відмітимо, що результати розрахунків отримані з врахуванням загальної ефективності очищення та різниці $\Delta\eta$ між ефективністю першого ступеня сепаратора та турбоімпаکتного модуля. На рис. 5.6 представлені дані по ефективності очищення сепаратора паливного газу з гофрованим коагулятором. Представлені результати свідчать про задовільну кореляцію експериментальних і теоретичних результатів і можливим використання узагальненої математичної моделі турбоімпаکتного переносу для оптимізації параметрів пристроїв очистки стиснутих газів для ГТУ.

5.3. Розробка та експериментальні дослідження турбоімпаکتного масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу

В розділі 1 показана необхідність очистки стиснутих газів при використанні ГТУ замкнутого циклу. ГТУ, що працюють по замкнутому циклу, дозволяють збільшити в декілька разів тиск робочого тіла в усіх трактах установки,

підвищити корисну потужність при тих же розмірах основних агрегатів. Основною відмінністю таких установок від ГТУ відкритого циклу є те, що замість камери згоряння використовується спеціальний нагрівач, в якому робоче тіло (повітря, азот, гелій, вуглекислий газ та ін.) нагрівається до початкової температури перед турбіною і не приймає безпосередньої участі в процесі виділення теплоти з палива, в якості якого може бути використано як органічне, так і ядерне. Крім того, в схему установки між турбіною та компресором вводиться попередній охолоджувач робочого тіла, який забезпечує процес замикання циклу.

На відміну від ГТУ відкритого циклу в системах змащування і суфлювання ГТУ замкнутого циклу мають місце підвищені тиски робочого середовища, що вимагає створення відповідних масловіддільників для очистки стиснутих газів в таких установках.

Турбоімпактний масловіддільник для використання в ГТУ замкнутого циклу (рис. 5.7) розроблено на основі уніфікованого сепаратора стиснутого газу (див. рис. 4.12).

Він містить два ступеня очистки – вхідний і вихідний 1 і 12. У вхідному ступені розташована система «сопло - пластина» з коагулятором 5, а також проміжний коагулятор 7. Проміжний коагулятор закріплений між зворотною стороною пластини 6 і перегородкою 8, що розділяє корпус на секції. У проміжному коагуляторі рух газу спрямовано в протилежну сторону і супроводжується підвищенням швидкості, що дозволяє послідовно осаджувати на дротах сітки все більш дрібні частинки. У перегородці 8 є сопло 2, куди виносяться потоком з проміжного коагулятора укрупнені краплі. Навпроти сопла розташована пластина 9, між якою і перегородкою 8 розташовується зачисний коагулятор 10. Кожний ступінь очистки має патрубки підведення газу (відведення), а також зливу рідини 13, 14.

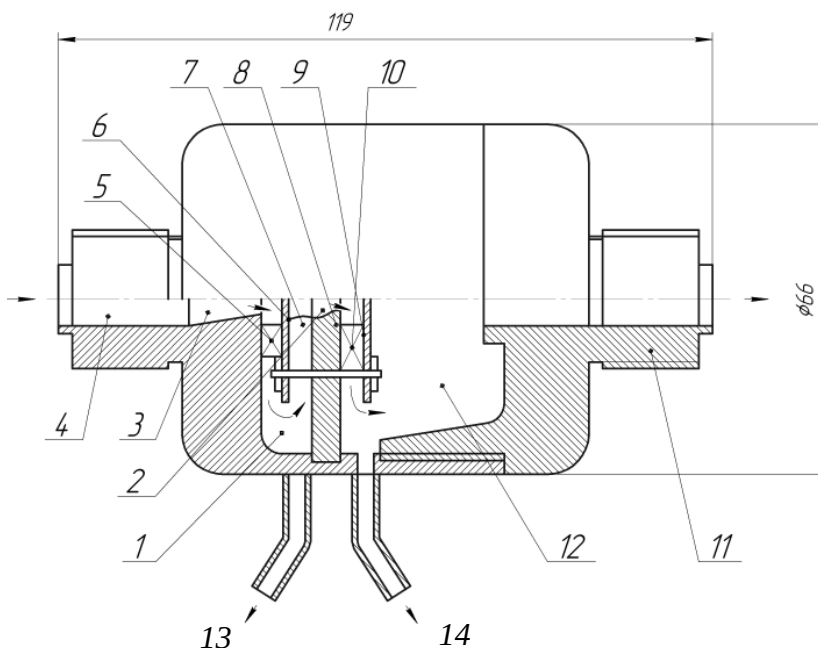


Рисунок 5.7 – Конструктивна схема турбоімпактного масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу:

1 – вхідний ступінь; 2,3 – сопла; 4 – вхідний патрубок; 5 – коагулятор; 6 – пластина; 7 – проміжний коагулятор; 8 – перегородка; 9 – пластина; 10 – зачисний коагулятор; 11 – вихідний патрубок; 12 – вихідний ступінь; 13,14 – зливні патрубки

Робота турбоімпактного масловіддільника здійснюється таким чином. Стиснутий газ, що очищується, надходить в патрубок підведення газу 4, а звідти – в сопло 3. В системі «сопло 3 - пластина 6 - коагулятор 5» здійснюється перший ступінь очистки газу від крапель рідини. Потім потік прямує до проміжного коагулятора 7. Це створює умови для послідовного фракційного очищення стиснутого газу від найдрібніших крапель і подальшого ефективного очищення в другому ступені. Укрупнені в коагуляторі 7 краплі потоком виносяться в сопло 2, яке разом з пластиною 9 і коагулятором 10 утворюють останній зачисний ступінь очистки. Очищений газ прямує у вихідний патрубок 11, а уловлене масло віддаляється з корпусу через патрубки зливу 13 і 14.

Зовнішній вигляд турбоімпактного масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу показано на рис. 5.8.



Рисунок 5.8 – Фотографія дослідного зразку турбоімпактного масловіддільника стиснутих газів системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу

Кількість рядів сітки в ступенях очистки наступна: в коагуляторі першого ступеня - 16 рядів сітки № 0,1; в проміжному коагуляторі - 16 рядів сітки № 0,1; в зачисному коагуляторі - 18 рядів сітки № 0,004. Довжина першого ступеня дорівнює 30 мм, другого - 45 мм. У другому ступені перед вихідним патрубком встановлюється конусоподібний колектор, що запобігає попаданню плівки масла у вихідний патрубок. Для усунення вторинного віднесення і можливих перетікань масла були здійснені наступні конструктивні заходи: турбоімпактний масловіддільник виконано із збільшеними розмірами ступенів очистки (внутрішній діаметр корпусу 100 мм, довжина першого ступеня 15 мм); крім цього в пластині першого ступеня очистки виконано концентричні масловідвідні канавки з прорізами в нижній частині.

Дослідний зразок турбоімпактного масловіддільника досліджувався на експериментальному стенді зі створення модельного двофазного середовища середнього тиску (див. рис. 2.3). Результати досліджень представлені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6

Результати експериментальних досліджень турбоімпаکتного масловіддільника стиснутих газів системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу

№	$G_{\text{пов}},$ г/ с	$T_{\text{вх}},$ °C	$C_{\text{вх}},$ г/м ³	$P,$ МПа	$\Delta P,$ МПа	$C_{\text{вих}},$ г/м ³	$g_{\text{вих}},$ кг/ГОД	$\eta_{\Sigma}, \%$	$C_{\text{вих}},$ г/м ³	$g_{\text{вих}},$ кг/ГОД	$\eta_{\Sigma}, \%$	$\Delta \eta_{\Sigma}, \%$
						перший ступінь			вихідний ступінь			
1	10.0	50	20.01	3.0	0.06	0.5	0.007	97.5	0.04	0.0006	99.81	2.31
2	10.0	50	35.76	3.0	0.06	0.55	0.0073	98.5	0.05	0.00065	99.86	1.36
3	10.0	50	35.98	3.0	0.06	0.52	0.0074	98.5	0.06	0.0008	99.83	1.33
4	10.0	50	20.67	3.0	0.06	0.60	0.0078	92.0	0.08	0.0009	99.71	7.71
5	10.0	50	40.87	3.0	0.06	0.54	0.0073	98.5	0.05	0.0007	99.88	1.38
6	10.0	50	36.89	4.0	0.06	0.5	0.0075	96.5	0.04	0.0006	99.90	3.30
7	10.0	50	35.38	4.0	0.06	0.51	0.0074	98.6	0.04	0.0006	99.89	1.39
8	10.0	50	39.87	4.0	0.06	0.55	0.0073	98.6	0.051	0.0007	99.87	1.27
9	10.0	50	36.79	4.0	0.06	0.52	0.0075	98.6	0.045	0.00065	99.88	1.28
10	10.0	50	37.98	4.0	0.06	0.51	0.0074	98.6	0.05	0.007	99.87	1.27

Проведені експериментальні дослідження показали, що в дослідженому діапазоні початкових концентрацій забруднювача (від 20 до 40 г/м³), тисків газу (від 3 до 4 МПа) при витраті стиснутого повітря 10 г/с сумарний коефіцієнт ефективності очищення турбоімпаکتного масловіддільника становить: для першого ступеня 92,0-98,6 %, а для двох ступенів 99,7-99,9 % при перепаді тиску біля 0,06 МПа. Вихідна концентрація масляного аерозолі в середньому становить 40-50 мг/м³, що повністю задовольняє сучасним вимогам до систем суфлювання ГТУ.

Навантаження ГТД імітувались зміною витрат маслоповітряної суміші через сепаратор: від 6 до 11 г/с, що відповідає основним режимам роботи двигуна установки.

Встановлено, що сумарний коефіцієнт ефективності очищення турбоімпаکتного масловіддільника становить біля 99,9 % на всіх досліджуваних режимів при варіюванні початковою концентрацією забруднювача $C_{\text{вх}}$ від 2 до 30 г/м³. При цьому перепад тисків дорівнює 0,06 МПа.

5.4. Впровадження результатів дисертаційної роботи

Впровадження результатів досліджень, представлених в дисертації, здійснювалось при виконанні ряду науково-дослідних робіт шляхом: а) розробки практичних рекомендацій з проектування проточних частин турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ; б) створення високоефективних сепараторів паливного газу сучасних ГТУ виробництва ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” (м. Миколаїв); в) створення турбоімпаکتного масловіддільника системи суфлювання перспективної ГТУ замкнутого циклу; г) використання результатів теоретичних і експериментальних досліджень в навчальному процесі Національного університету кораблебудування.

5.4.1. Розробка практичних рекомендацій з проектування проточних частин турбоімпактних сепараторів стиснутих газів ГТУ

На основі отриманих експериментальних даних розроблено практичні рекомендації з проектування проточних частин турбоімпактних сепараторів стиснутих газів ГТУ. Рекомендації приведено у табличній формі (табл. 5.7), вони дають можливість виконати необхідні розрахунки основних елементів проточної частини турбоімпактних сепараторів. Остаточні характеристики корпусу проточних частин вибираються на основі вимог до судин, що працюють під тиском.

Таблиця 5.7

Рекомендації на розрахунок проточної частини турбоімпактних сепараторів стиснутих газів

Найменування	Формула	Розмірність	Рекомендоване значення
--------------	---------	-------------	------------------------

Витрата газу	G	м ³ /с	Задається
Швидкість газу у вхідному патрубку	$U_{\text{п}}$	м/с	15-25
Швидкість у роздавальнику 1 турбоімпаکتного ступеня	$U_{\text{п1}}$	м/с	15-25
Діаметр роздавальника 1 турбоімпаکتного ступеня	D_1	м	$\sqrt{\frac{1,27G}{U_{\text{п1}}}}$
Швидкість витікання струменів через отвір 1 турбоімпаکتного ступеня	$U_{\text{о1}}$	м	25-35
Діаметр сопла	d_0	м	$\sqrt{\frac{1,27G}{U_{\text{о1}}}}$
Відстань від отворів до поверхні осадження (пластини)	h_0	м	$(0,5-1,0)d_0$
Швидкість газу на вході в коагулятор	$U_{\text{вхкр}}$	м/с	5-8
Висота гофри сітки	$h_{\text{гофр}}$	м	$(2-3) \cdot 10^{-3}$
Кут гофри	α	град	45-60
Нахил смуги гофри	β	град	60
Число рядів сітки коагулятора:	$n_{\text{рк}}$	шт	20-50
1 ступінь	0,25		6-10
2 ступінь	0,1		10-20
3 ступінь	0,009		4-10
4 ступінь	0,25		4-10
Розмір прохідного перерізу:			
1-3 ступенів	$S_{\text{к1-3}}$	м ²	$G/U_{\text{вхкр}}$
4 ступеня	$S_{\text{к4}}$	м ²	$0,8 \cdot S_{\text{к1-3}}$
Патрубок зливу	$d_{\text{зл}}$	м	$(6-15) \cdot 10^{-3}$

5.4.2. Турбоімпактні сепаратори паливних газів для ГТУ

На основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів в рамках виконання госпрозрахункової теми № 1875 «Розробка сепаратора для первинної очищення паливних газів від твердої та рідкої фракцій», номер

держреєстрації № 0111U009084, для ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” розроблено робочі креслення і виготовлено дослідний зразок турбоімпактного сепаратора паливних газів для ГТУ, загальний вид якого наведено на рис. 5.9.

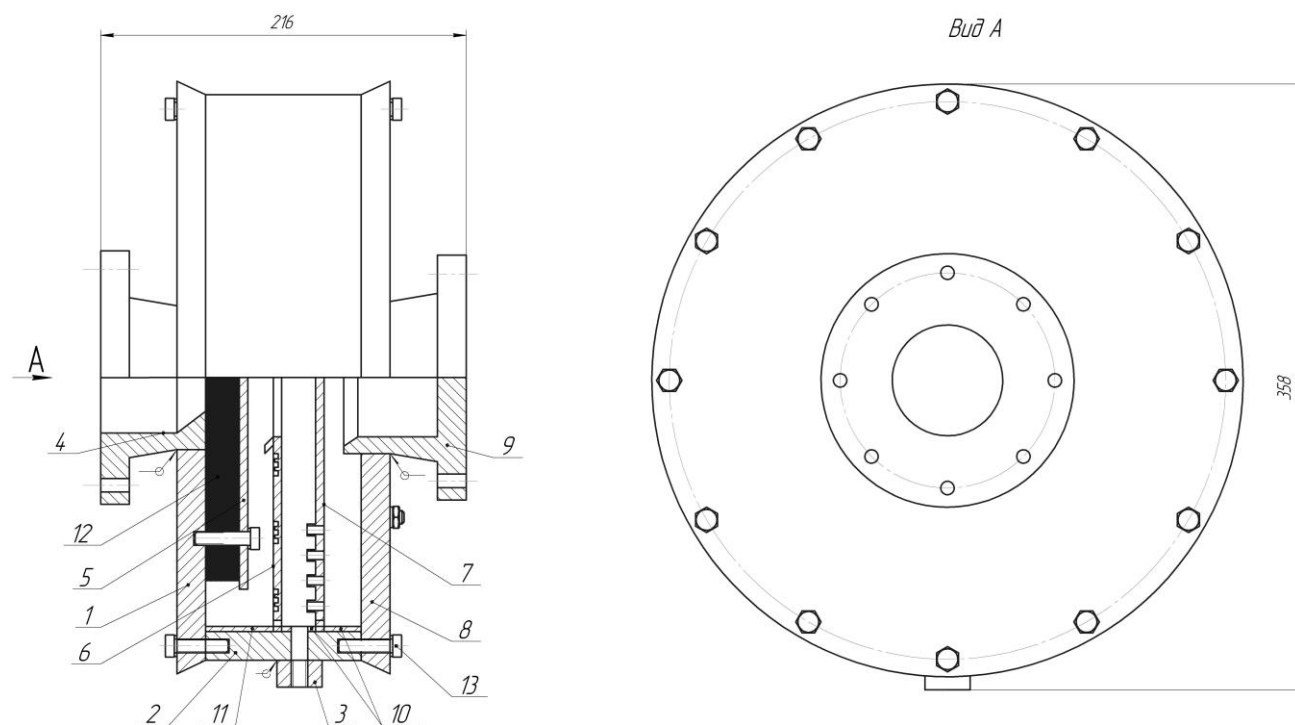


Рисунок 5.9 – Креслення дослідного зразку турбоімпактного сепаратора паливного газу:

- 1 – кришка вхідна; 2 – корпус; 3 – зливний патрубок; 4 – вхідний патрубок;
 5 – імпактна пластина першого ступеня; 6 – перегородка другого ступеня;
 7 – перегородка третього ступеня; 8 – кришка вихідна; 9 – вихідний патрубок;
 10,11 – кільцеві фіксатори; 12 – коагулятор; 10 – гвинти

Турбоімпактний сепаратор являє собою уніфікований сепаруючий агрегат, який, в залежності від витрат паливного газу, пропонується використовувати в системах очистки паливних газів високого тиску від твердих та рідких забруднень, і складається з двох, чотирьох та шести модулів, розташованих вертикально:

- для витрати газу 2000 кг/год - одного працюючого і одного резервного модулю (рис. 5.10);

- для витрати газу 4000 кг/год - двох працюючих і двох резервних модулю (рис. 5.11);
- для витрати газу 6500 кг/год - трьох працюючих і трьох резервних модулю (рис. 5.12).

Всі системи турбоімпактної очистки комплектуються запірною та вимірювальною апаратурою. Для підключення сепаратора до газової магістралі і для перемикання робочих і резервних модулів передбачені два кульових L-подібних крани. Передбачені голчасті крани для розвантаження кульових кранів при перемиканні, а також для втравлювання газу перед розкриттям агрегату, що обслуговується. Управління кранами здійснюється вручну, однак при необхідності може бути передбачено дистанційне керування.

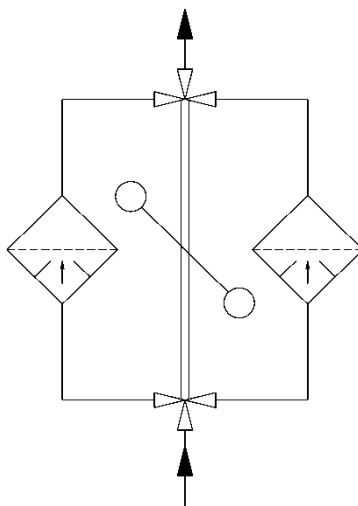


Рисунок 5.10 – Система очистки паливних газів з витратою 2000 кг/год

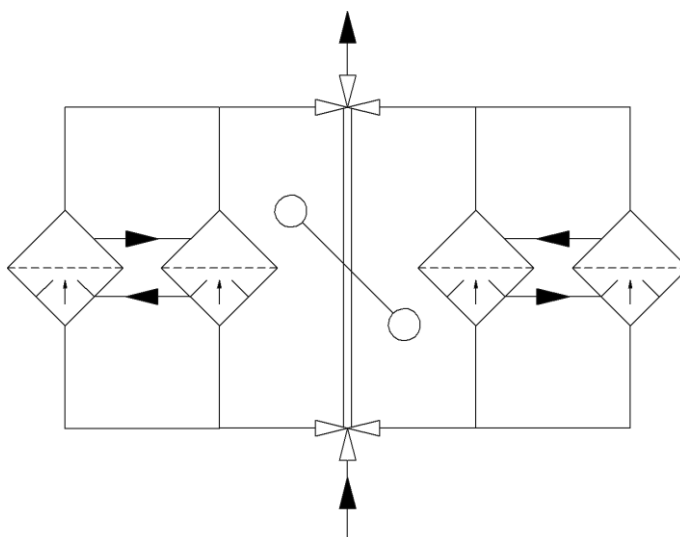


Рисунок 5.11 – Система очистки паливних газів з витратою 4000 кг/год

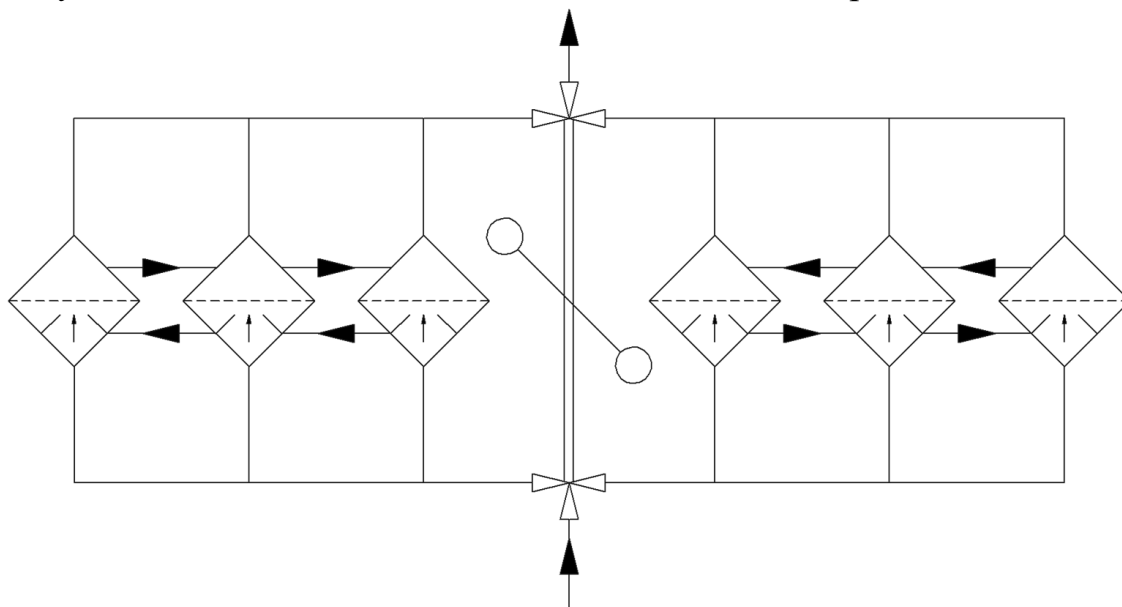


Рисунок 5.12 – Система очистки паливних газів з витратою 6500 кг/год

Конструкція турбоімпактного сепаратора забезпечує можливість встановлення:

- сигналізатора присутності рідкої фракції;
- реле різниці тисків - для сигналізації досягнення граничного перепаду тиску;
- мономеру для контролю величини надлишкового тиску у сепараторі з метою технічного обслуговування;

- датчика виміру температури газу;
- витратоміру для визначення витрати газу через сепаратор.

Вибір приладів здійснюється у вибухобезпечному виконанні.

Уніфікований турбоімпактний сепаратор паливного газу має пропускну здатність 2200 кг/год, перепад тиску - не більше 0,01МПа. Корпус виготовляється з товстостінної труби (сталь 12Х18Н9Т або 12Х13) без зварних швів, що виключає необхідність рентген-контролю зварних швів. Після турбоімпактного сепаратора встановлюється штатний сепараційного елемент. Запірна арматура служить для підключення фільтру до газової магістралі і для перемикання працюючих і резервних агрегатів з метою очищення і профілактики сепаратора.

Очищення сепараційних елементів здійснюється при перевищенні перепаду тиску на сепараторі в два рази в порівнянні з початковим перепадом. Очищення елементів здійснюється згідно інструкції з експлуатації.

По завершенні виконання госпрозрахункової теми № 1875 «Розробка сепаратора для первинної очищення паливних газів від твердої та рідкої фракцій», номер держреєстрації № 0111U009084, конструкцію турбоімпактного сепаратору паливних газів для ГТУ впроваджено в Науково-виробничому комплексі газотурбобудування «Зоря»-«Машпроект» (див. додатки).

5.4.3. Турбоімпактні масловіддільники для систем суфлювання ГТУ замкнутого циклу

На підставі виконаних досліджень створено дослідний зразок турбоімпактного масловіддільника для очищення газу систем суфлювання перспективних ГТУ замкнутого циклу (типу “Аksamит”). На основі конструкції його елементів подано заявки на отримання патентів на корисну модель (№ u201504079), по якому отримано позитивне рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель (номер висновку від 19.08.2015 № 14658/ЗУ/15) та на винахід (№ a201502335). Розроблено необхідні робочі креслення. Загальний вигляд турбоімпактного масловіддільника показаний на рис. 5.13.

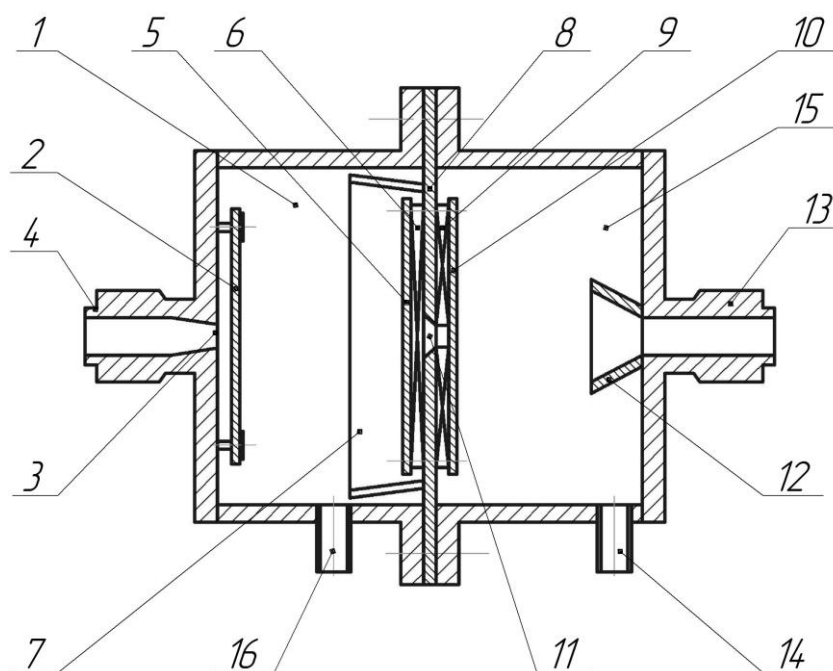


Рисунок 5.13 – Турбоімпактний масловіддільник для системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу

Масловіддільник складається з корпусу, розділеного на дві секції: першу - вхідну 1 і другу - вихідну 15; системи “сопло 3 і пластина 2 першої секції”; патрубка підведення газу 4; конусоподібної оболонки 7, всередині якої розташований проміжний коагулятор 6, розміщений між пластиною 5 і перегородкою 8; в центральній частині перегородки розташоване сопло 11. Крім того, в першій секції є патрубок зливу рідини 16. У другій секції 15 навпроти сопла 11 розташована пластина 10, між якою і перегородкою 8 встановлено ступінь тонкої очистки - коагулятор 9. Перед вихідним патрубком 13 другої секції розташовано конусоподібний колектор 12. Оболонка 7 і колектор 12 служать для запобігання попадання плівки в коагулятор 6 і вихідний патрубок 13. Для зливу уловленої рідини з другої секції є патрубок зливу 14.

Робота масловіддільника здійснюється наступним чином. Газ для очищення надходить через вхідний патрубок 4 в конфузор 3, де збільшує свою швидкість до 25-40 м/с і під нормальним кутом обтікає пластину 2. На пластині 2 відбувається інерційне осадження частинок, утворення плівки рідини і її відведення в нижню частину першої секції до патрубка 16. Невловлені

найдрібніші частинки надходять разом з газом, минаючи конусну оболонку 7, в проміжний коагулятор 6. Коагулятор виконується з гофрованих сіток. Переріз коагулятора 6 по мірі руху газу зменшується, що сприяє збільшенню швидкості і фракційному осадженню найдрібніших частинок.

Як показали виконані дослідження, повне осадження часток діаметром 2 мкм відбувається при швидкості 3 м/с, 1 мкм - 7 м/с. Осаджені в коагуляторі мікрочастинки за рахунок капілярних сил укрупнюються і виносяться потоком в конфузور - сопло 11, де газ прискорюється і обтікає пластину - диск 10 в просторі, вільному від коагулятора 9 другої секції. При цьому укрупнені краплі осідають. У другому зачисному коагуляторі 9 відбувається остаточне очищення газу від мікрочастинок. При цьому швидкість газу в коагуляторі знижується до досягнення у вихідному перерізі швидкості не більше 2 м/с. Це викликано необхідністю подальшого осадження виносимих великих крапель за рахунок сили тяжіння в другій секції 15. Очищений газ прямує через конус 12 у вихідний патрубок 13, а вловлена рідина - в зливний патрубок 14. Запобігання транспортування плівки з першої секції в другу служи конусна оболонка 7, а з другого ступеня в патрубок 14 - колектор 12.

В НДІ “Проблем екології і енергозбереження” Національного університету кораблебудування при безпосередній участі автора розроблено робочі креслення турбоімпаکتного масловіддільника для системи суфлювання ГТУ закритого циклу. На основі розроблених робочих креслень виготовлено дослідний зразок такого масловіддільника і проведені його попередні випробування.

Вони показали, що на всіх режимах навантаження ГТД масловіддільник повністю задовольняє вимогам, що пред'являються до масловіддільника системи суфлювання ГТУ «Аksamит»: концентрація масла на виході - не більше 0,1 г/м³, аеродинамічний опір дорівнює 0,15 МПа при тиску 3,6 МПа і витраті газу 10 г/с.

Результати роботи також використано в МОНУ при виконанні Держбюджетної теми № 1894 «Основи турбоімпактної інтенсифікації процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищеного тиску для енергетичних установок» (номер держреєстрації № 0113U000241), напрямок

«Енергетика та енергоефективність», а також в навчальному процесі НУК при підготовці бакалаврів, спеціалістів та магістрів за спеціальностями: «Турбіни», «Газотурбінні установки і компресорні станції», «Суднові енергетичні установки та устаткування» та «Екологія та охорона навколишнього середовища».

5.5. Розрахунок економічного ефекту

Розрахунок економічного ефекту виконано від впровадження турбоімпактних сепараторів паливних газів в системі паливopідготовки трьох ГТД ДН80 виробництва ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” з витратою природного газу 6500 кг/год. Розрахунок виконано на основі “Методики розрахунку економічної ефективності в народному господарстві” [51,52]:

$$E = \left[(B_1 - B_2) + \frac{(BE_1 - BE_2) - E_n(K_2 - K_1)}{P_2 + E_n} \right] A_2,$$

де B_1, B_2 – приведені витрати базових паливних фільтрів та турбоімпактних сепараторів; BE_1, BE_2 – річні експлуатаційні витрати для базової системи та системи з турбоімпактними сепараторами; E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності ($E_n = 0,15$); K_1, K_2 – супутні капітальні витрати при експлуатації базової і нової системи; P_2 – коефіцієнт реновації сепаратору $P_2 = 1/T_{вик} = 0,05$ ($T_{вик}$ – термін використання = 20 років); A_2 – кількість сепараторів (дорівнює кількості двигунів).

Річні витрати

$$BE = BE_3,$$

де BE_3 = витрати від замін штатних фільтрів, а

$$BE_3 = N_1 \cdot C_{1ф},$$

де N_1 – середня кількість замін фільтрів на рік; $C_{1ф}$ – вартість системи фільтрів, доларів США.

Вартість системи очистки природного газу на три двигуна ДН80 з базовими (штатними) фільтрами складає 20000 доларів США.

Середнє напрацювання фільтрів до заміни складає близько 3600-3800 годин. Час роботи ГТД газоперекачувального агрегату за рік: $T = 320 \text{ днів} = 7680 \text{ годин}$.

Тоді коефіцієнт N_1 на рік складає $7680/3800 \approx 2,0$.

Системи з турбоімпактними фільтрами потребують заміни елементів 1 раз у два роки (15360 годин).

Таким чином коефіцієнт N_2 складає $7680/15360 = 0,5$.

Вартість додаткових супутніх капітальних витрат K_2 на турбоімпактну систему оцінюється в 2000 доларів США.

Кількість працюючих двигунів $A_2 = 3$. Тоді економічний ефект складатиме:

$$\begin{aligned} E &= \left[(B_1 - B_2) + \frac{(BE_1 - BE_2) - E_n(K_2 - K_1)}{P_2 + E_n} \right] A_2 = \\ &= \left[(500 - 500) + \frac{((20000 \times 2) - (20000 \times 0,5) - 0,15(2000 - 0))}{0,05 + 0,15} \right] = \\ &= \left[0 + \frac{(29700)}{0,2} \right] \approx 150000 \text{ \$}. \end{aligned}$$

Таким чином, впровадження турбоімпактних сепараторів в систему очистки природного газу трьох ГТД ДН80 дає розрахунковий економічний ефект за шість років експлуатації для ПАТ «Укртрансгаз» біля 150 тис. доларів США.

Основні результати і висновки по розділу 5

1. Розроблено конструкцію та виготовлено дослідний зразок турбоімпактного сепаратора стиснутого газу ГТУ, яка дозволяє використовувати його на наступні натурні параметри паливного газу: витрата 500-2200 кг/год при тиску 1,6-3,6 МПа.

2. Проведено експериментальні випробування турбоімпактного сепаратора для ГТУ в стендових умовах, які показали, що ефективність очищення від аерозолів в турбоімпакті сепараторі без коагулятора в усьому дослідженому діапазоні витрат газу складає від 82 до 88 %, а з використанням гофрованого коагулятора – від 98 до 99,5 % при аеродинамічному опорі від 0,7

до 3,2 кПа. Ці дані підтверджують результати теоретичних досліджень гідродинамічного стану в сепараторах стиснутого газу.

3. Розроблено конструкцію та виготовлено дослідний зразок турбоімпаکتного масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу. Проведено його експериментальні дослідження в стендових умовах, які показали, що в дослідженому діапазоні початкових концентрацій забруднювача (від 20 до 40 г/м³), тисків газу (від 3 до 4 МПа) при витраті стиснутого повітря 10 г/с сумарний коефіцієнт ефективності очищення турбоімпаکتного масловіддільника становить: для першого ступеня 92,0-98,6 %, а для двох ступенів 99,7-99,9 % при перепаді тиску біля 0,06 МПа. Вихідна концентрація масляного аерозолі в середньому становить 40-50 мг/м³.

4. Розроблено практичні рекомендації з проектування проточної частини турбоімпактних сепараторів стиснутих газів ГТУ з використанням отриманих теоретичних і експериментальних даних.

5. На основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів для ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” розроблено робочі креслення і виготовлено дослідний зразок турбоімпаکتного сепаратора паливних газів для ГТУ.

6. На підставі виконаних досліджень розроблено робочі креслення і виготовлено дослідний зразок турбоімпаکتного масловіддільника для очищення газу систем суфлювання перспективних ГТУ замкнутого циклу (типу “М-29”). Його конструкція захищена патентом № 4807120.

7. Результати роботи використано в МОНУ при виконанні Держбюджетної теми № 1894 «Основи турбоімпаکتної інтенсифікації процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищеного тиску для енергетичних установок» (номер держреєстрації № 0113U000241), а також в навчальному процесі НУК при підготовці бакалаврів, спеціалістів та магістрів за спеціальностями: «Турбіни», «Газотурбінні установки і компресорні станції» та «Екологія та охорона навколишнього середовища».

8. Розрахунок економічного ефекту від впровадження турбоімпактних сепараторів паливних газів в системі паливopідготовки трьох ГТД ДН-80 з

витратою газу 6500 кг/год показав, що за шість років експлуатації на компресорній станції ПАТ «Укртрансгаз» він складе біля 150 тис. доларів США.

Результати досліджень опубліковано в [98,123].

ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

У дисертаційній роботі представлено розв'язання задачі створення високоефективного турбоімпаکتного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок на основі запропонованих схемних рішень з інтенсифікації процесів турбоімпаکتного переносу. На підставі проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу та узагальнення вітчизняних і закордонних літературних даних сформульовано основні напрямки вдосконалення гідродинамічних характеристик та створення високоефективних сепараторів стиснутих для газотурбінних установок на основі інтенсифікації процесів турбоімпактного переносу.

2. Адаптовано узагальнену математичну модель сепаратора стиснутих газів для ГТУ з урахуванням процесів двофазності, що дозволяє розв'язувати задачі підвищення ефективності уловлення аерозолів в турбоімпактних системах, та проведено її верифікацію.

3. Розроблено та створено експериментальні стенди для дослідження робочих процесів турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для ГТУ у вигляді відкритих аеродинамічних труб з використанням моделювання параметрів середовища підвищеного тиску.

4. Розроблено узагальнену багатосекційну схему комплексної турбоімпактної інтенсифікації очищення стиснутих газів за рахунок: а) підвищення швидкості та рівня турбулентності струменів під дією сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu, дифузіїфореzu і в відривних зонах; б) утворення плівки рідини з вловлених крапель з подальшим її відведенням за рахунок капілярних сил і сил тяжіння; в) осадження на сіткових гофрованих коагуляторах за рахунок сил інерції, турбулентної дифузії, турбофореzu та капілярних сил; г) уловлення скоагульованих крапель, що виносяться потоком, за рахунок сил тяжіння та інерції. Технологічна послідовність стадій очищення може змінюватись відповідно до схемних рішень і призначення сепараторів газу.

5. Розроблено і досліджено три схемних рішення новітніх турбоімпактних сепараторів стиснутих газів для газотурбінних установок, які відрізняються інтервалами між поверхнями осадження та розмірами ступенів очистки: відповідно 0,25; 0,5 та 1,0 діаметра вхідного конфузору.

6. Виконано теоретичні дослідження основних гідродинамічних характеристик робочого середовища в турбоімпактному струминному ступені очистки та в гофрованому сепараційному елементі: розподілу швидкості та

кінетичної енергії турбулентності у робочих ділянках в діапазоні витрат робочого середовища 500–2200 кг/год. Встановлено, що в окремих ділянках сепаратора швидкість потоку збільшується у 2–2,5 рази, що дозволяє інтенсифікувати осадження частинок за рахунок турбофоретичних ефектів. Визначено, що конструктивний варіант ступенів з розміром секції 0,5 діаметра вхідного конфузору (20 мм) є раціональним з точки зору ефективності очищення, перепаду тиску та розподілу кінетичної енергії турбулентності.

7. Виконано розрахунки процесів осадження полідисперсних частинок в турбоімпульсному струминному модулі сепараторів очищення паливного газу для ГТУ. Встановлено, що розрахунковий коефіцієнт осадження полідисперсної фракції в цьому модулі приймає значення від 50 до 60 %. Виконані тривимірні розрахунки процесів очищення стиснутого паливного газу в гофрованому сепараційному модулі дозволили встановити, що коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після цього модулю дорівнює 70-80 %.

8. Розроблено схемне рішення уніфікованого сепаратора паливного газу ГТУ з максимальною ефективністю очищення. Виконано його теоретичні дослідження, які показали, що сумарний коефіцієнт осадження полідисперсної фракції після всіх ступенів очистки приймає значення від 85 до 99 %. Доведено можливість застосування уніфікованого сепаратора в широкому діапазоні витрат робочого тіла із збереженням невисоких значень перепадів тисків.

9. На основі виконаних теоретичних досліджень розроблено конструкцію сепаратору паливного газу ГТУ, розроблено його робочі креслення та виготовлено дослідний зразок. Сепаратор спроектовано на наступні натурні параметри паливного газу: витрата 500-2200 кг/год при тиску 1,6-3,6 МПа.

10. Проведено експериментальні випробування турбоімпульсного сепаратора для ГТУ в стендових умовах, які показали, що ефективність очищення від аерозолів в турбоімпульсному сепараторі без коагулятора в усьому дослідженому діапазоні витрат газу складає від 82 до 88 %, а з використанням гофрованого коагулятора – від 98 до 99,5 % при аеродинамічному опорі від 0,7 до 3,2 кПа.

11. Розроблено конструкцію та виготовлено дослідний зразок турбоімпаکتного масловіддільника системи суфлювання ГТУ замкнутого циклу. Його експериментальні дослідження показали, що в дослідженому діапазоні початкових концентрацій забруднювача (від 20 до 40 г/м³), тисків газу (від 3 до 4 МПа) при витраті стиснутого повітря 10 г/с сумарний коефіцієнт ефективності очищення турбоімпаکتного масловіддільника становить: для першого ступеня 92,0-98,6 %, а для двох ступенів 99,7-99,9 % при перепаді тиску біля 0,06 МПа.

12. Розроблено практичні рекомендації з проектування проточної частини турбоімпактних сепараторів стиснутих газів ГТУ з використанням отриманих теоретичних і експериментальних даних.

13. На основі отриманих теоретичних і експериментальних результатів для ДП НВКГ “Зоря”-”Машпроект” розроблено робочі креслення і виготовлено дослідні зразки турбоімпаکتного сепаратора паливних газів для ГТУ та турбоімпаکتного масловіддільника для очищення газу систем суфлювання перспективних ГТУ замкнутого циклу, захищеного деклараційним патентом № 4807120. Результати досліджень використовуються в навчальному процесі НУК при підготовці бакалаврів, спеціалістів та магістрів за спеціальностями: «Турбіни», «Газотурбінні установки і компресорні станції» та «Екологія та охорона навколишнього середовища».

14. Розрахунок економічного ефекту від впровадження турбоімпактних сепараторів паливних газів в системі паливopідготовки трьох ГТД ДН-80 з витратою газу 6500 кг/год показав, що за шість років експлуатації на компресорній станції ПАТ «Укртрансгаз» він складе біля 150 тис. доларів США.

Додатки



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9, тел.(0512) 42-42-80, факс 42-46-52, e-mail: university@nuos.edu.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ
 проректор НУК з науково-педагогічної
 роботи та міжнародної діяльності,
 канд. техн. наук, професор НУК
 ТРУШЛЯКОВ Є.І.
 12 2015 р.



АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Рижкова Ростислава Сергійовича «Створення
 високоефективного турбоімпульсного сепаратора стиснутих газів для
 газотурбінних установок» у навчальний процес Національного університету
 кораблебудування імені адмірала Макарова

Даний акт свідчить про те, що розроблені Рижковим Р.С. математична модель гідродинамічних процесів та переносу полідисперсного середовища в сепараторах стиснутих газів для ГТУ на основі сучасних пакетів обчислювальної гідродинаміки та схемні рішення пристроїв турбоімпульсної очистки стиснутих газів впроваджені в навчальний процес НУК і використовується при читанні курсів лекцій з дисциплін «Енергозберігаючі технології в турбінобудуванні», «Системи автоматизованого проектування турбоагрегатів», а також при виконанні дипломних проектів та магістерських робіт за спеціальностями 8.05060402 «Турбіни», 8.05060406 «Газотурбінні установки і компресорні станції» та 8.04010601 «Екологія та охорона навколишнього середовища».

Заступник директора
 Машинобудівного інституту НУК

Б.В. Димо

Декан факультету екологічної
 та техногенної безпеки НУК

С.М. Літвак





УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграда, 9, тел.(0512) 42-42-80, факс 42-46-52, e-mail: university@nuos.edu.ua

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Рижкова Ростислава Сергійовича «Створення високоефективного турбоімпактного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок» при виконанні тематичного плану фундаментальних та прикладних науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Дисертаційне дослідження за темою «Створення високоефективного турбоімпактного сепаратора стиснутих газів для газотурбінних установок» виконано аспірантом Рижковим Р.С. в рамках пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки в Україні, напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність» відповідно до тематичного плану фундаментальних науково-дослідних робіт НУК за держбюджетною темою № 1894 «Основи турбоімпактної інтенсифікації процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищеного тиску для енергетичних установок» (номер держреєстрації № 0113U000241) та за госпрозрахунковою темою № 1875 «Розробка сепаратора для первинного очищення паливних газів від твердох та рідкох фракцій» (номер держреєстрації № 0111U009084), в яких автор брав участь в якості виконавця на посаді молодшого наукового співробітника.

Результати дисертаційних досліджень Рижкова Р.С. використані при виконанні тематичного плану фундаментальних та прикладних науково-дослідних робіт Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

Проректор НУК з наукової роботи, д-р техн. наук, професор



В.С. Блінцов



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник генерального директора -
Генеральний конструктор
ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект»Б.В. Ісаков
03 2014 р.

АКТ

впровадження результатів науково-дослідних робіт, що отримані
Рижковим Ростиславом Сергійовичем
 при виконанні дисертації на здобуття наукового ступеня
 кандидата технічних наук

Даний акт складений про те, що при виконанні науково-дослідних робіт за господарським договором № 2077 від 01.06.2012/1875 «**Розробка сепаратора для первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій**» між ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» і Національним університетом кораблебудування імені адмірала Макарова отримані Рижковим Ростиславом Сергійовичем, як виконавцем окремих розділів, результати розрахункових досліджень дозволили визначити оптимальну конструкцію уніфікованого сепараційного модулю, яка забезпечує мінімальні значення перепадів тисків на всіх режимах роботи.

Результати вищевказаних науково-дослідних робіт застосовуються на підприємстві при проектуванні та порівняльній оцінці ефективності сепараторів паливного газу, призначених для очистки робочого середовища від механічних домішок та рідких фракцій перед подачею газу у паливну систему газотурбінних двигунів виробництва ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект».

Заст. генерального конструктора –
 начальник конструкторського відділення, к.т.н.

В.М. Чобенко

Начальник відділу паливної апаратури

О.І. Засипко

ЛАУРЕАТУ

Премії Верховної Ради України
найталановитішим
молодим ученим
в галузі фундаментальних
і прикладних досліджень та
науково-технічних розробок

РИЖКОВУ

Ростиславу Сергійовичу

Голова Верховної Ради України



В. РИБАК

Постанова Верховної Ради України
від 6 грудня 2012 року
№ 5516—VI

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамович Г.Н. Турбулентное смешение газовых струй [Текст] / Абрамович Г.Н., Драшеников С.Ю., Секундов А.Н. // М.: Наука, 1974. – 272 с.
2. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй [Текст] / Абрамович Г.Н. // М.: Физматгиз, 1960. – 715 с.
3. Артемов Г.А. Совершенствование судовых газотурбинных установок [Текст] / Артемов Г.А. // Л.: Судостроение, 1984. – 140 с.
4. Артемов Г.А. Судовые установки с газотурбинными двигателями [Текст] / Артемов Г.А., Горбов В.М., Романовский Г.Ф. // Николаев: УГМТУ, 1997. – 234 с.
5. Басок Б.І. Інтенсифікація осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / Б.І. Басок, С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // «Промышленная теплотехника», международный научно-прикладной журнал. – 2014. – №1. – С. 20-26.
6. Басок Б.И. Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале [Текст] / Басок Б.И., Рижков С.С., Авраменко А.А. // Промышленная теплотехника. Международный научно – прикладной журнал. – Киев. - Т. 28. - № 3, 2006. – С.14-19.
7. Басок Б.И. Групповые методы в теплофизике [Текст] / Басок Б.И. Авраменко А.А. Кузнецов А.В. // Наукова думка: Киев, 2003.
8. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. [Текст] / В.В. Белоусов // М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
9. Билык Б.И. Исследование маслоотделителя для ГТД ДП 73 / Билык Б.И., Рижков С.С., Рижков С.С. (ст.) [Текст] // Тезисы докладов 4-й Международной научно–технической конференция «Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении». – Николаев, 2005. – С. 287-288.
10. Бич М.М. Смазка авиационных газотурбинных двигателей – / Бич М.М., Вейнберг Е.В., Сурнов Д.И. // М.: Машиностроение, 1979. – 147 с.
11. Богатых С.А. Циклонно–пенные аппараты [Текст] / Богатых С.А. //

Л.:Машиностроение, 1978. – 244 с.

12. Бруяцкий Е.В. Турбулентные стратифицированные струйные течения [Текст] / Бруяцкий Е.В. // К.: Наукова думка, 1986. – 296 с.

13. Булыгин П.А. Газотурбинные установки судов на подводных крыльях [Текст] / Булыгин П.А. // Л.: Судостроение, 1971. – 192 с.

14. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами [Текст] / Бусройд Р. // М.: Мир, 1975. – 384 с.

15. Баженов Г.В. Судовая газотурбинная установка М-25 [Текст] / Г.В. Баженов, В.И. Романов, В.Т. Лисов // Морской флот, 1976. – № 9. – С.43-46.

16. Венедиктов В,Д. Турбины и реактивные сопла на двухфазных потоках [Текст] / Венедиктов В,Д. // М.: Машиностроение, 1969."

17. Венцель В.В. Применение смазочных масел в двигателях внутреннего сгорания [Текст] / Венцель В.В. // М.: Химия, 1979. – 320 с.

18. Волошин В.П. Охрана морской среды [Текст] / Волошин В.П. // Л.:Судостроение, 1987. – 208 с.

19. Герц Е.В. Пневматические устройства и системы в машиностроении: справочник [Текст] / Е.В. Герц. – М.: Машиностроение, 1981. – 408 с.

20. Голиков В.А. Повышение эффективности и оптимизация режимов работы судового микроклимата: Авторефер. Дис. Д-ра техн.наук: 05.08.05 / Голиков В.А. // Укр.госуд.морск.техн. ун-т.- Николаев, 2000. – 36 с.

21. Гордон Г.М. Пылеулавливание и очистка газов [Текст] / Гордон Г.М., Пейсахов И.Д. // М.:Металлургия, 1968. – 499 с.

22. Грин Х. Аэрозоли- пыли, дымы и туманы [Текст] / Грин Х., Лейн В. // Л.: Химия, 1969. – 427 с.

23. Гусева Е.И. Осаждение частиц на стенках канала в турбулентном двухфазном потоке под действием различных внешних факторов [Текст] / Гусева Е.И., Зайчик Л.И. // Тез. Докл. 3–й Всесоюз. школы-семинара «Современные проблемы газодинамики и теплообмена».– М.: МГТУ, 1991.

24. Дейч М.Е. Газодинамика двухфазных сред [Текст] / Дейч М.Е. // М.: Энергия, 1968.

25. Долидович А.Ф. Муниципальные технологии газоочистки, предотвращающие загрязнение окружающей среды теплом и CO_2 [Текст] / Долидович А.Ф. // Промышленная теплотехника: Международный научно – прикладной журнал. – Том 25 (приложение к журналу) №4, Киев, 2003. – С. 31-33.

26. Долинский А.А. Разработка термофоретического каплеуловителя для испарительно-сушильных агрегатов [Текст] / А.А. Долинский, С.С. Рыжков, А.П. Гартви // Промышленная теплотехника. – 2006. –Т. 28. – № 6. – С.49-55.

27. Дыбан Е.П. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел [Текст] / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур // К.: Наук.думка, 1982. – 303 с.

28. Захаров Ю.В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины [Текст] / Ю.В. Захаров // С-П.: Судостроение, 1990. – 684 с.

29. Иевлев В.М. Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред [Текст] / В.М. Иевлев // М.: Наука, 1975. – 256 с.

30. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации [Текст] / В.П. Исаченко // М.: Энергия, 1977. – 240 с.

31. Исследование и интенсификация процессов турбо-термофоретического переноса дисперсной фазы при очистке и разделении рабочих двухфазных сред // Отчет о НИР. – № гос. Регистрации 0103U001794, Том 1 (Рыжков С.С. – Раздел 2). – УГМТУ, Николаев, 2003. – 96 с.

32. Исследование и интенсификация процессов турбо- термофоретического переноса дисперсной фазы при очистке и разделении рабочих двухфазных сред // Отчет о НИР. – № гос. Регистрации 0103U001794, Тщм 2 (Рыжков С.С. – Разделы 1.2, 1.3). – НУК, Николаев, 2004. – 102 с.

33. Исследование и интенсификация процессов турбо- т термофоретического переноса дисперсной фазы при очистке и разделении рабочих двухфазных сред // Отчет о НИР. – № гос. Регистрации 0103U001794, Том 3 (Рыжков С.С. – Разделы 2,3,4). – НУК, Николаев, 2005. – 61 с.

34. Калверта С. Защита атмосферы от промышленных загрязнений:

Справочник. Ч. 1 [Текст] / С. И Калверта, Г.М. Инглунда // М.: Металлургия, 1988. – 760 с.

35. Калверта С. Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справочник. Ч. 2 [Текст] / С. И Калверта, Г.М. Инглунда // М.: Металлургия, 1988. – 770 с.

36. Калинин Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах [Текст] / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Яхро // М.: Машиностроение, 1972. – 220 с.

37. Камаи Н. Исследование удара двумерной струи с учетом начальных возмущений [Текст] / Н. Камаи, Х. Танака // Нихон кикай гаккай рамбунсю, 1977. – Т.43. – С.2. – № 372. – С. 2957-2969 (рус.пер. М.:ВЦП, 1978, № А-71920). – С.1-31.

38. Каплеулавливающее устройство / А.с.349258 СССР, МКИ ВО1D./ Рыжков С.В. (СССР). – №1303247; Заявл.17.01.69; Опубл.18.05.72, Б.И. № 45. – 5 с.

39. Кириллов И.И. Основы теории влажно–паровых турбин [Текст] / И.И. Кириллов, В.М. Яблоник // Л.: Машиностроение, 1968.

40. Конвенция МАРПОЛ 73/78 . – ИМО, 1980.

41. Коузов П.А. Очистка от пыли и газов воздуха в химической промышленности [Текст] / П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрыбин // Л.: Химия, 1982. – 256 с.

42. Кэйс В.М. Конвективный тепло- и массообмен [Текст] / В.М. Кэйс //М.: Энергия, 1972. – 442 с.

43. Лебедь Н.Г. Гидродинамика и тепломассо-перенос в компактных судовых аппаратах [Текст] / Н.Г. Лебедь, В.М. Боград // Л.: Судостроение, 1985. – 134 с.

44. Левин Л.И. Исследование по физике грубодисперсных аэрозолей [Текст] / Л.И. Левин // М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 243 с.

45. Леонтьев А.И. Перенос частиц аэрозоля в неизотермическом турбулентном потоке [Текст] / А.И. Леонтьев, Э.А. Цалко // Теплофизика высоких температур, 1969. – Т. 7, № 4. – С. 715–722.

46. Лисов В.Т. ГТД судна «Капитан Смирнов» [Текст] / В.Т. Лисов // Судостроение. –1980. – № 3. – С. 30–32.

47. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. [Текст] / Л.Г. Лойцянский // М.: Наука, 1987. – 840 с.

48. Лукин В.Д. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности [Текст] / В.Д. Лукин, М.И. Курочкина // Л.: Химия, 1980. – 232 с.

49. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник [Текст] / А.В. Лыков // М.: Энергия, 1972. – 560 с.

50. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей [Текст] / Е.П. Медников // М.: Наука, 1981. – 176 с.

51. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений [Текст] // М.: Экономика, 1977.– 47 с.

52. Методика определения экономической эффективности создания и использования новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в судостроительной промышленности [Текст] // Л.: ЦНИИ ТС, 1979.

53. Михайлов Е.И. Комплексные воздухоочистительные устройства для энергетических установок [Текст] / Е.И. Михайлов и др. // Л.: Машиностроение, 1978.

54. Мокшин В.Н. Борьба со взрывами в картерах двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.Н. Мокшин, А.В. Клеменьтьев // Судостроение. –1960.– № 3. – С. 35-40.

55. Мягков Б.И. Очистка воздуха от масляного тумана на металлообрабатывающих предприятиях [Текст] / Б.Т. Мягков, О.А. Попов // М.: ЦНИИХИМНЕФТЕМАШ, 1981. – 40 с.

56. Николаевские газотурбинные двигатели и установки. История создания [Текст] / Под редакцией В.И. Романова // Николаев: «Юг-Информ», 2005. – 304 с.

57. Орлов В.В. О поперечном движении твердых частиц в поток с пульсирующим сдвигом [Текст] / В.В. Орлов // Инж.–физ. журнал, 1970. – Т.19,

№ 2. – С. 341–344.

58. Основи турбоімпаکتної інтенсифікації процесів переносу при очищенні багатофазних сумішей палив підвищеного тиску енергетичних установок: звіт з НДР. – № держ. реєстрації 0113U000241 : Тема №1894 / Кер. роботи С.С. Рижков. – Миколаїв, 2013.

59. ОСТ 5.5149-74. Отраслевой стандарт. Системы кондиционирования воздуха и вентиляции. Отделители воды. – М. – 1974. – 7 с.

60. Петренчук О.П. Экспериментальное исследование атмосферного аэрозоля [Текст] / О.П. Петренчук // Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 264 с.

61. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А.И. Пирумов // М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.

62. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб [Текст] / Е.Н. Письменный // Альтерпес. , Киев, 2004.

63. Письменный Е.Н. Расчет конвективных поперечно – оребренных поверхностей нагрева / Письменный Е.Н. // Альтерпес. – Киев, 2003.

64. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию [Текст] / П. Райст // М.: Мир, 1987. – 330 с.

65. Розробка сепаратора для первинної очистки паливних газів від твердої та рідкої фракцій : звіт з НДР. – № держ. реєстрації 0111U009084 : Тема №1875 / Кер. роботи С.С. Рижков. – Миколаїв, 2012.

66. Романовський Г.Ф. Будова, правила технічної експлуатації та обслуговування газотурбінних двигунів [Текст] / Г.Ф. Романовський, Ю.О. Султанський, В.І. Харченко . – Миколаїв: Видавництво НУК, 2011. – 156 с.

67. Романовский Г.Ф. Плазмохимические системы судовой энергетики [Текст] / Г.Ф. Романовский, С.И. Сербин // Николаев: УГМТУ, 1998. – 248 с.

68. Романовський Г.Ф. Сучасні газотурбінні агрегати. Том 1. Агрегати виробництва України та Росії [Текст] / Г.Ф. Романовський, С.І. Сербін, В.М. Потлайчук // Миколаїв: НУК, 2005. – 356 с.

69. Романовський Г.Ф. Теорія та розрахунок парових та газових турбін [Текст] / Г.Ф. Романовський, О.Я. Іпатенко, В.М. Потлайчук // Миколаїв:

УДМТУ, 2002. – 292 с.

70. Роуч П. Вычислительная гидродинамика [Текст] / П. Роуч // Пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 660 с.

71. Рижков О.С. Оцінка ефективності циклона батарейного типу за коефіцієнтом гідродинамічної ефективності [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков, Ю.В. Качанова // Збірник наукових праць НУК. – 2013. – Вип. 2. – С. 106-109.

72. Рижков О.С. Розрахунок ефективності трьох ступенів пристрою масловідділення [Текст] / О.С. Рижков, Р.С. Рижков, А.В. Попова // Збірник наукових праць НУК. – 2014. – Вип. 5. – С. 38-44.

73. Рижков Р.С. Вдосконалення масловологовіддільників енергосистем стисненого повітря на основі гідродинамічних розрахунків [Електронний ресурс] / Р.С. Рижков, О.С. Рижков // Вісник НУК. – 2013. – Вип. 2. – Режим доступу: <http://evn.uos.edu.ua>.

74. Рыжков С.В. Теплотехнические измерения в судовых энергетических установках [Текст] / С.В. Рыжков // Л.: Судостроение, 1980. – 264 с.

75. Рыжков С.В. Повышение эффективности сепарирующего устройства с помощью сотового коагулятора [Текст] / С.В. Рыжков, О.М. Хмара // Л.: Вопросы судостроения. – 1979. – № 16.

76. Рижков С.С. Результати дослідження впливу підвищення тиску на ефективність турбоімпактних сепараторів багатофазних сумішей палив [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Збірник наукових праць НУК. – 2013. – Вип. 4. – С. 56-61.

77. Рижков С.С. Розрахунок осадження рідкої фази у сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2014. – С.93-94.

78. Рижков С.С. Математична модель турбоімпактного переносу частинок при очищенні синтез-газу технології екопірогенезіс [Текст] / С.С.

Рижков, О.С. Борцов, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV міжнародна науково-технічної конференції.– Миколаїв, 2013. – С. 375-377.

79. Рижков С.С. Дослідження газодинаміки 3D моделі турбоімпаکتного сепаратора з радіальним коагуляційним елементом палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков, Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. –С.129-132.

80. Рижков С.С. Осадження рідкої фази у турбоімпактних сепараторах багатофазних сумішей палив підвищеного тиску [Текст] / С.С. Рижков , Р.С. Рижков, О.С. Борцов // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – 132-133.

81. Рижков С.С. Дослідження газодинамічних турбоімпактних сепараторів на основі програмного пакету ANSYS [Текст] / С.С. Рижков , Р.С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2014. –С.37-39.

82. Рижков С.С. Розробка масловологовіддільників енергосистем стисненого повітря на основі гідродинамічних розрахунків [Текст] / С.С. Рижков, О.С. Рижков, Р.С. Рижков // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2014. –С.92-93.

83. Рижков С.С. Дослідження коефіцієнту осадження турбоімпаکتного сепаратора багатофазних сумішей палив підвищеного тиску при різних витратах робочого середовища [Текст] / С.С. Рижков, О.С. Борцов, Р.С. Рижков // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: Матеріали IV міжнародна науково-технічної конференції. – Миколаїв, 2013. – С. 364-365.

84. Рыжков С.С. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред [Текст] /

С.С. Рыжков, Б.И. Басок // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23 (4–5). – С. 141-145.

85. Рыжков С.С. Забезпечення високого рівня екологічної безпеки при будівництві та експлуатації суден за рахунок впровадження аерозольних технологій [Електронний ресурс] / С.С. Рыжков // Вісник НУК. – 2010. – Режим доступу : <http://evn.nuos.edu.ua/article/view/24561>.

86. Рыжков С.С. (ст.) Интенсификация инерционно-турбофоретического улавливания высокодисперсных аэрозолей в коагуляторах газоочистных устройств [Текст] / С.С. Рыжков (ст.), Б.И. Билык // Зб. Наук. Праць УДМТУ. Миколаїв: УДМТУ. – 2002. – № 8(386). – С. 66-76.

87. Рыжков С.С. Исследование зон турбофоретического осаждения частиц в пограничном слое пластины обтекаемой струей [Текст] / С.С. Рыжков, Б.И. Билык // Зб. Наук. Праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – № 7(385). – С. 100-110.

88. Рыжков С.С. (ст.) Проблемы очистки воздуха машинных отделений судов с ядерными энергетическими установками [Текст] / С.С. Рыжков (ст.), Б.И. Билык // Матеріали Міжнародної конференції „Кораблебудування: освіта, наука, виробництво”. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – С.162-164.

89. Рыжков С.С. Расчет влияния перепада температур на осаждение высокодисперсных частиц на основе транспортного уравнения Рейнольдса [Текст] // Тези доповідей Міжнародної науково–технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених та молодих спеціалістів «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв, 2005. – С.122-123.

90. Рыжков С.С. Разработка обобщенной математической модели процессов турбофоретического переноса частиц в высокотурбулизированном потоке [Текст] / С.С. Рыжков, С.И. Сербин, Б.И. Билык // Материалы 4–й Международной научно-технической конференции «Проблемы экологии и энергосбережения в судостроении». – Николаев, 2005. – С. 256-258.

91. Рыжков С.С. Экспериментальные исследования осаждения частиц на пластине с выступами в области пристенной струи [Текст] / С.С. Рыжков, А.С.

Рыжков // Тези доповідей Міжнародної науково–технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених та молодих спеціалістів «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв, 2005. – С.129-130.

92. Рыжков С.С. Экспериментальные исследования осаждения частиц на пластине с выступами в объеме потока [Текст] / С.С. Рыжков // Тези доповідей Міжнародної науково–технічної конференції студентів, аспірантів, молодих вчених та молодих спеціалістів «Суднова енергетика: стан та проблеми», Миколаїв. – 2005. – С.131-132.

93. Рижков С.С. (ст.) Розрахунок викидів шкідливих речовин в атмосферу: Методичні вказівки [Текст] / С.С. Рижков (ст.), Ю.М. Харитонов, В.В. Благодатний // Миколаїв: УДМТУ, 2002 . – 44 с.

94. Руководство по контролю вредных веществ в воздухе рабочей зоны: Справ. Изд. [Текст] / С.И. Муравьева, М.И. Буковский, Е.К. Прхорова и др. – М.: Химия, 1991. – 368 с.

95. Рузавин Г.И. Методология научного исследования [Текст] / Г.И. Рузавин. – М.: ЮНИТ-ДАНА, 1999. – 317 с.

96. Сажин Т.М. Удержание NO_x и SO_2 из дымовых газов в электрических полях» [Текст] / Т.М. Сажин, А.Т. Кречун, К.Н. Боте // Промышленная теплотехника: Международный научно–прикладной журнал. – Киев.

97. Сербин С.И. Совершенствование газоочистных устройств на основе моделирования газодинамических процессов [Текст] / С.И. Сербин, А.С. Рыжков // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв, 2008. - №5. – С. 72 – 81.

98. Рижков Р.С. Експериментальні дослідження ефективності турбоімпаکتного сепаратора паливного газу для ГТУ [Текст] / Р.С. Рижков, С.І. Сербін // Збірник наукових праць НУК. – 2015. – Вип. 2. – С. 76-82.

99. Создание, внедрение маслоотделителей для ГТД ДГ 90 И ДН 80 с высокой эффективностью и улавливанием паров масла // Отчет о НИР № 1425. – № гос. регистрации 0103U001789. – УГМТУ, (Рыжков С.С. - Разделы 4; 5.2; 5.3). – Николаев, 2003. – 101 с.

100. Створення універсальних транспортних суден та засобів океанотехніки : монографія /С.С. Рижков, В.С. Блінцов, Г.В. Єгоров, Ю.Д. Жуков, В.Ф. Квасницький, К.В. Кошкін, І.В. Кривцун, В.О. Некрасов, В.В. Севрюков, Ю.В. Солоніченко. – Глава 8.

101. Страус В. Промышленная очистка газов [Текст] / В. Страус // М.: Химия, 1981. – 583 с.

102. Судовые и стационарные газотурбинные установки закрытого цикла [Текст] / С.Н. Гаврилов, Г.Г. Жаров, А.А. Канаев, И.З. Копп, Ю.В. Смолкин . – Л.: Судостроение, 1971. – 288 с.

103. Троицкий Б.Л. Основы проектирования судовых энергетических установок [Текст] / Б.Л. Троицкий, Е.А. Сударева // Л.: Судостроение, 1980. –133 с.

104. Христич В.А. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды [Текст] / В.А. Христич, А.Г. Тумановский // К.. Техника, 1983. – 144 с.

105. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг // М.: Наука, 1969. – 744 с.

106. Шрабер А.А. Турбулентные течения газозвеси [Текст] / А.А. Шрабер и др. // К.: Наукова думка, 1987. – 240 с.

107. Annex VI of MARPOL 73/78. Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships and NO_x Technical Code // IMO, London, UK MPG Books Ltd. 1998. – 150 p.

108. ANSWER. Version 4.00 // User's Manual. – Analytic & Computational Research, Inc., 2000. – 364 p.

109. Bradbury L. The Structure of a Self –Preserving Turbulent Plane Jet [Text] /L. Bradbury // J. Fluid Mech., 1965. – No. 23. – P. 1-64.

110. Brock J.R.L. On the Theory of Thermal forces acting on Aerosol Particles [Text] / J.R.L. Brock // J. Colloid Sci., 1962. – No. 17. – P. 768-780.

111. Brooks J.M. Report to Air Resources Board on the proposed identification of diesel exhaust as toxic air contaminant. Part A: Exposure assessment [Text] / J.M. Brooks, G.A. Shiroma, D.J. Anies, P.D. Venturini // California EPA, Office of

Environmental Health Hazard Assessment, Air Toxicology and Epidemiology Section, 1998, Jan. –103 p.

112. Caporaloni M. Transfer of Particles in Nonisotropic Air Turbulence [Text] / M. Caporaloni, F. Tampieri // J. Atmos. Sci., 1975. – No. 32, N3. – P. 565-568.

113. Dennis R. Fabric Filters Model Format Change: Volume II. User's Guide [Text] / R. Dennis, et al. // Report No.PB 297755/AS, April 1979.

114. Diesel engine exhaust // IARC Monographs. – 1989. – Vol. 46. – 560 p.

115. Filtration + Separation// Volume 39. – No. 9, November, 2002 // Elsevier Science UK. – 64 p.

116. Filtration + Separation/ Volume 39. – No. 10, December, 2002 // Elsevier Science UK. – 48 p.

117. Filtration + Separation/Word Buyers' Guide and Directory, 2005 // Elsevier Science UK. – 200 p.

118. Hall D.E. A review of recent literature investigating of the measurement of automotive particulate; the relationship with environment aerosol, air quality and health effect [Text] / D.E. Hall, D.B. King, T.B. Morgan, et al. // Ibid. – 1998. - № 982602. – P. 53-65.

119. Henein N.A. Analysis of Pollutant Formation and Control and Fuel Economy in Diesel Engines [Text] / N.A. // Prog. Energy Combust. Sci.: Pergamon Press, 1976. – Vol. 1. – P. 165-207.

120. International Standard ISO 8573-1 // Air Quality Standards.

121. Ryzhkov S.S. Jet- contact separator of exhaust gases of ship engines [Text] / S.S. Ryzhkov // Proceedings of the third international conference on marine industry, Varna: Bulgaria, 2001. – Vol. 2. – P. 137-145.

122. Ryzhkov S.S. Reduction of losses of oils in ship diesel engines at the expence of increase of efficiency of clearing crank-cases gases [Text] / S.S. Ryzhkov // Proceedings of the third international conference on marine industry. – Varna: Bulgaria, 2001. – Vol. 2. – P. 111-114.

123. Ryzhkov R.S. Experimental Investigations Of Efficiency Of The Turboimpact Breathing Systems Separator For Gas Turbine Installation Of Closed

Cycle [Text] / R.S. Ryzhkov, S.I. Serbin // Shipbuilding & Marine Infrastructure. – 2015. – No. 2.

124. Spalding D.B. Mathematical Models of Turbulent Flames: A Review [Text] / D.B. Spalding // Combustion Science and Technology. – 1976. – Vol.13. – P. 3-35.

125. Strauss W. Industrial Gas Cleaning [Text] / W. Strauss // Pergamon Press, Oxford, 1975. – 263 p.

126. CFD Modeling Software & Solutions from Fluent / ANSYS, Inc // <http://fluent.com>.