

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого

Кафедра Машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

_____ Сергій Блаженко
(підпис) (прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2023 р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Олександр Гавва
(підпис) (прізвище та ініціали)

« ____ » _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв

на тему: Імітаційне моделювання потокового стаціонарного змішувача для рідких фармацевтичних форм

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ОФ-2-бм

Николаєнко Євгеній Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

_____ (підпис)

Керівник: доц. Доломакін Юрій Юрійович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

_____ (підпис)

Консультанти _____

(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент проф. Олішевський В.В.

(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____

(підпис)

Київ – 2023 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут *Навч.-науковий інженерно-технічний інст. ім. акад. І.С. Гулого*

Кафедра *Машини і апарати харчових та фармацевтичних виробництв*

Освітній ступінь *магістр*

Спеціальність *133 «Галузеве машинобудування»*

(код і назва)

Освітньо-професійна програма *Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв*

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

проф. Гавва О.М.

“ ” _____ 2022 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Ніколаєнко Євгеній Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Імітаційне моделювання потокового стаціонарного змішувача для рідких фармацевтичних форм*

керівник роботи *Доломакін Юрій Юрійович, доцент, к.т.н.*

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закл. вищої осв. від “07” листопада 2022 року № 794-кс

2. Строк подання здобувачем роботи *01 лютого 2023 р.*

3. Вихідні дані до роботи *технічний паспорт обладнання; кресленики обладнання; навчальна нормативна та спеціальна література*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *анотація, зміст; вступ, основні типи малооб'ємних змішувачів, структура потоку в малооб'ємних змішувачах, теорія розрахунку потоків у статичному змішувачі, послідовність моделювання у програмі Comsol, результати моделювання, методика розрахунку змішувача, охорона праці, загальні висновки, список використаних літературних джерел, додатки*

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація на 24 аркушах

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 5 листопада 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Анотація, зміст</i>	<i>15.11.22</i>	
2	<i>Вступ</i>	<i>20.11.22</i>	
3	<i>Літературний огляд і аналіз використаних джерел</i>	<i>05.12.22</i>	
4	<i>Теорія розрахунку потоків у статичному змішувачі</i>	<i>25.11.22</i>	
5	<i>Послідовність моделювання у програмі Comsol для статичного змішувача</i>	<i>15.12.22</i>	
6	<i>Результати моделювання</i>	<i>10.01.23</i>	
7	<i>Трасування частинок</i>	<i>15.01.23</i>	
8	<i>Методика розрахунку змішувача</i>	<i>19.01.23</i>	
9	<i>Охорона праці</i>	<i>25.01.23</i>	
9	<i>Загальні висновки</i>		
10	<i>Список використаних літературних джерел</i>	<i>28.01.23</i>	
11	<i>Презентація</i>	<i>05.02.23</i>	

Здобувач

(підпис)

Євгеній Ніколаєнко

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

доц. Доломакін Ю.Ю.

(прізвище та ініціали)

Анотація

Метою роботи було виконати імітаційне моделювання малооб'ємного змішувача для його використання у фармацевтичній промисловості, основною перевагою якого є його використання у замкнених системах, що є актуальним з точки зору кантомінації рідких компонентів готових лікарських форм.

У роботі описано підклас змішувачів, а саме статичних змішувачів, званих також нерухомими або рядними, у яких рідина прокачується крізь трубу, що містить стаціонарні лопаті. Ця техніка змішування особливо добре підходить для ламінарного потокового змішування, оскільки вона генерує лише невеликі втрати тиску в цьому режимі потоку.

Наведені та описані конструкції подібних змішувачів, виконано імітаційне моделювання засобами CFD, розраховані основні компоненти конструкції. Описано заходи з охорони праці при експлуатації такого устаткування.

Робота представлена пояснювальною запискою на 94 аркушах, та презентацією на 24 плакатах.

Ключові слова: статичний змішувач, імітаційне моделювання, фармацевтична промисловість, гідродинаміка, малооб'ємні конструкції

Abstracts

The aim of this work was to perform simulation modeling of a low-volume mixer for use in the pharmaceutical industry, the main advantage of which is its use in closed systems, which is relevant in terms of containment of liquid components of finished dosage forms.

This paper describes a subclass of mixers, namely static mixers, also called fixed or inline mixers, in which the liquid is pumped through a pipe containing stationary blades. This mixing technique is particularly well suited for laminar flow mixing, as it generates only small pressure losses in this flow regime.

The paper presents and describes the design of such mixers, performs CFD simulations, and calculates the main components of the design. Occupational safety measures for the operation of such equipment are described.

The work is presented in an explanatory note on 94 pages and a presentation on 24 posters.

Keywords: static mixer, simulation modeling, pharmaceutical industry, hydrodynamics, small-volume structures

Зміст

Вступ.....	7
1. Літературний огляд і аналіз використаних джерел.....	9
1.1. Основні типи малооб'ємних змішувачів.....	9
1.1.1. Статичні змішувачі як теплообмінники.....	22
1.2. Структура потоку в малооб'ємних змішувачах.....	25
2. Теорія розрахунку потоків у статичному змішувачі.....	33
2.1. Асимптотична спрямованість у змішувачі.....	35
2.2. Розрахунок швидкості зсуву потоку.....	37
3. Послідовність моделювання у програмі <i>Comsol</i> для статичного змішувача.....	39
3.1. Опис моделі.....	39
3.2. Фізична модель.....	40
3.3. Послідовність дій по моделюванню.....	45
4. Результати моделювання.....	60
4.1. Швидкість потоку рідини.....	60
4.2. Поле зміни тиску потоку у середині змішувача.....	62
4.3. Трасування частинок.....	64
4.4. Концентрація.....	71
4.5. Ймовірність контакту.....	75
4.6. Методика розрахунку змішувача.....	78
4.6.1 Розрахунок.....	81
5. Охорона праці.....	83
Висновок.....	92
Використана література.....	93

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Доломакін Ю.Ю.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> НУХТ, ОФ-2-6м	<i>Розробник документа</i> Ніколаєнко Е.М.	<i>Назва, додаткова назва</i> Зміст	210760.KP.01.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 6/94

Вступ

Інтенсифікація виробництва вимагає створення конструкцій з підвищеною швидкістю обертання перемішуючих пристроїв, що призводить до зниження надійності такого обладнання. До недоліків традиційних механічних змішувачів також можна віднести їх відносну громіздкість, складність конструкції (наявність підшипникових вузлів, ущільнень, рухомих частин, електроприводів), високі енерговитрати на змішування, відносно великі виробничі площі, необхідні для монтажу. Для підвищення ефективності процесу змішування, а отже, і інтенсифікації теплових та масообмінних процесів, виникає необхідність розробки нових конструкторських рішень зі створення більш досконалого змішувального обладнання.

При розробці сучасних методів інтенсифікації технологічних процесів намітилася тенденція до розробки обладнання, що забезпечує оптимальне використання енергії, високу продуктивність і ефективність при мінімальних габаритах і простоті конструкції. Таким чином, обладнання нового покоління повинно включати в себе пристрої, що дозволяють перемішувати в пристроях малої потужності, що представляють собою окремі ділянки трубопроводу з вмонтованими в них малооб'ємними змішувачами. Поперечні розміри таких пристроїв трохи відрізняються від поперечних розмірів припливно-нагнітальних трубопроводів, в результаті чого їх можна встановлювати безпосередньо на технологічний трубопровід. Такі малооб'ємні змішувачі, вбудовані в трубопровід, можуть бути активними (динамічними) або пасивними (статичними).

Перемішування може бути спонтанним або досягатися за рахунок примусової конвекції.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Доломакін Ю.Ю.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>		
<i>Власник документа</i> НУХТ, ОФ-2-6м	<i>Розробник документа</i> Ніколаєнко Е.М.	<i>Назва, додаткова назва</i> Вступ	210760.KP.01.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 7

У першому випадку змішування викликається молекулярною дифузією або масообміном в умовах вільної конвекції, що виникає в результаті різниці температур або щільності рідин, що контактують. Тривалість таких процесів дуже велика і в промисловості мимовільне змішування майже не використовується. Тому широке поширення набуло змішування за рахунок перенесення частинок однієї рідини в іншу в процесі турбулентної дифузії.

Таким чином, завдання полягає в тому, щоб створити такі умови, які б сприяли взаємному проникненню розмішуваних реагентів. Ці умови можуть бути створені за допомогою примусової конвекції. При цьому рідина приводиться в турбулентний рух, в результаті чого відбувається турбулентний масообмін. Слід зазначити, що величина турбулентності у всьому об'ємі апарату неоднакова. Наприклад, у стін вона буде менше і, отже, необхідно прагнути до того, щоб весь об'єм рідини проходив через зони максимальної турбулентності.

При перемішуванні особливе значення мають два фактори [4]:

1) ступінь турбулентності;

2) величина циркуляції, інтенсивність якої визначається часом, необхідним для проходження всього об'єму рідини через певний перетин.

Найпоширеніший метод - турбулізація високошвидкісним потоком. Згідно з літературою, турбулізація потоку відфільтрованої рідини (внаслідок збільшення числа Re в три рази від значення $2 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^5$) при переробці різної сировини призводить до підвищення проникності мембран у 1,5...2 рази. Це пов'язано з інтенсивним перемішуванням граничного висококонцентрованого шару.

1. Літературний огляд

1.1 ОСНОВНІ ТИПИ МАЛООБ'ЄМНИХ ЗМІШУВАЧІВ

Статичні змішувачі

Найбільшого поширення набули змішувачі з гвинтовими елементами. Основними елементами цих пристроїв є невеликі металеві спіральні стрічки («гвинтові елементи»). Їх виготовляють шляхом скручування плоскої пластини під деяким кутом уздовж осі. Зібрані елементи вставляються в циліндричну трубку (корпус змішувача) таким чином, щоб по всій довжині чергувалися ліво- і право вигнуті спіралі, а між стінкою і бічними гранями спіралі не було зазору. (рис. 1).

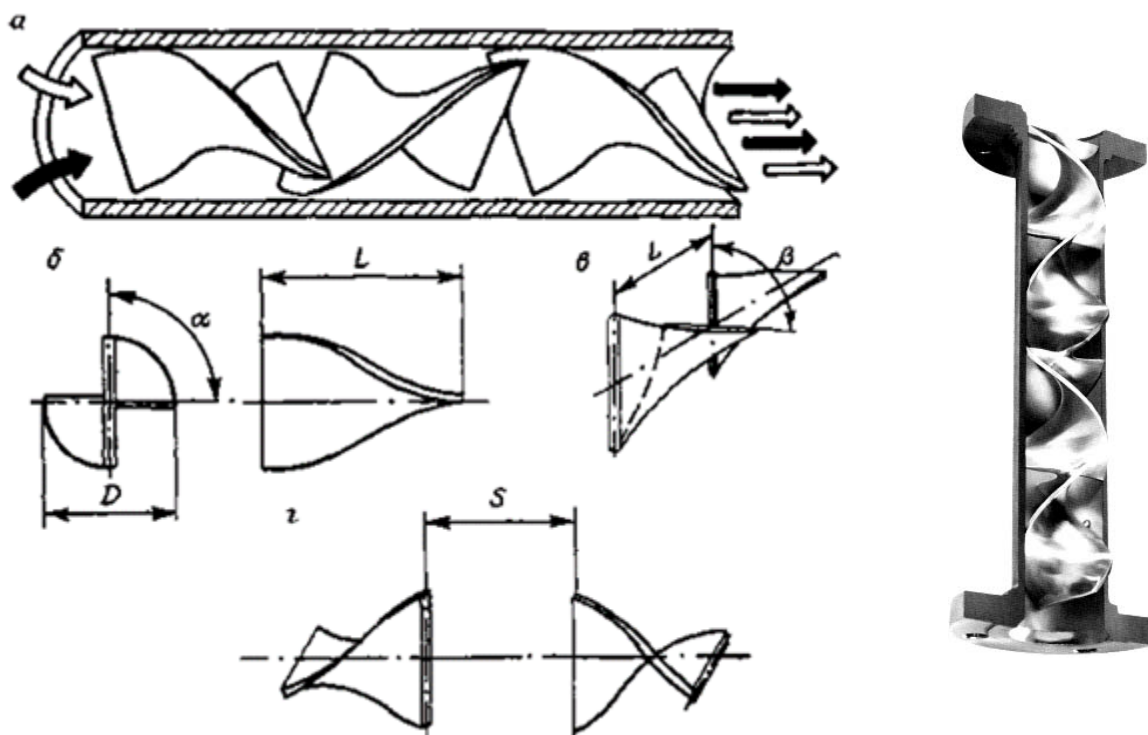


Рис. 1. Схема статичного змішувача (а), конструкція (б) і схеми установки (в, з) змішувальних елементів.

D - діаметр каналу; L - довжина елемента; α - кут закручування спіралі; β - кут зіткнення торцевих країв; S - відстань між сусідніми елементами

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Доломакін Ю.Ю.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ, 0Ф-2-6м	Розробник документа Ніколаєнко Е.М.	Назва, додаткова назва Літературний огляд	210760.KP.01.000.ПЗ			
	Документ затверджено Гавва О.М.		Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 9

Геометрія окремого елемента визначається такими параметрами, як напрямок його скручування, кут скручування α , а також співвідношення діаметра D і довжини елемента L (рис. 1, б і в). Взаємне розташування елементів визначається кутом β між кінцевими краями сусідніх елементів, а в деяких випадках і відстанню S між ними (рис. 1, з).

Для здійснення процесу гомогенізації змішані компоненти необхідно один раз пропустити через трубу з гвинтовими елементами. Шуканий ступінь гомогенізації суміші регулюється кількістю елементів. Статичні змішувачі успішно використовуються в лініях безперервного виробництва хімічної та харчової продукції.

Також, наприклад, для турбулізації відфільтрованого середовища рекомендується використовувати спеціальні турбулізуючі вставки, які виконують роль перемішувача пристрою. Такими вставками може бути статичний змішувач який використовується в трубчастих фільтраційних пристроях. Доцільність його використання очевидна при низьких значеннях числа Re (до 1500).

Можливе використання рухомих турбулізуючих пристроїв.

Конструкції турбулізуючих елементів можуть бути найрізноманітнішими. Можлива гнучка форма турбулізуючого елемента у вигляді ланцюга або стрічки, шарнірної одним кінцем на пористому каркасі. При русі середовища елемент коливається по всьому розрізу трубчастої мембрани, що сприяє турбулізації потоку у її поверхні.

Турбулізація середовища з одночасним очищенням мембрани може здійснюватися гвинтовими лопатями з еластичного матеріалу, що контактує з поверхнею мембрани, які обертаються під дією потоку рідини.

Для інтенсифікації процесу можливе використання пульсації. За допомогою пульсаційного потоку ви можете досягти підвищення продуктивності до 40... 50% на завершених технологічних процесах.

Особливість пульсуючого режиму руху розділяемого розчину полягає в збільшенні витрати у пристінних шарах рідини. При наявності в розчині

твердих частинок вони переміщуються від стінок до осі потоку, що знижує ймовірність їх осідання на поверхні мембран, а це дозволяє зберегти високу проникність.

Змішувачі з гвинтовими елементами. З безлічі конструкцій статичних змішувачів особливо широко застосовуються змішувачі з гвинтовими елементами. Основними елементами цих пристроїв є невеликі металеві спіральні стрічки, які в літературі дізналися назву «гвинтові елементи». Вони виготовляються шляхом скручування плоскої пластини під певним кутом уздовж поздовжньої осі. Статичний змішувач складається з окремих таких елементів або елементів, з'єднаних в кілька штук. Зібрані елементи розміщуються в циліндричній трубі, що утворює корпус змішувача, причому таким чином, щоб по всій його довжині чергувалися ліво- і правосторонні спіралі (рис. 1, а). Обов'язковою умовою працездатності змішувача є точність підгонки змішувальних елементів, тобто відсутність зазорів між стінкою труби і бічними гранями спіралей. Для здійснення процесу гомогенізації змішані компоненти потрібно всього один раз пропустити по трубі з гвинтовими елементами. Шуканий ступінь гомогенізації суміші регулюється кількістю елементів.

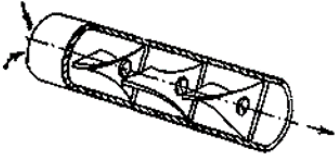
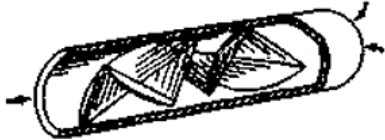
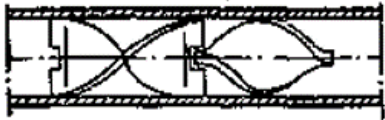
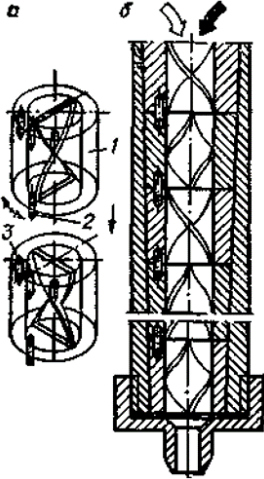
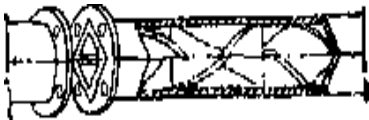

Ця проста схема виявилася надзвичайно ефективною, і по теперішній час змішувачі з гвинтовими елементами впроваджені в найрізноманітніші галузі. Пошуки оптимальної геометрії робочих органів змішувачів тривають.

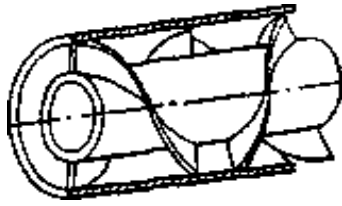
В даний час створені численні конструкції статичних змішувачів з гвинтовими елементами різного призначення. Інформація про деякі з них представлена в табл. 1.

Статичні змішувачі з гвинтовими елементами

Табл. 1

Тип змішувача	Конструктивні особливості
----------------------	----------------------------------

	<p>Спіральна поверхня елементів оснащена наскрізними отворами (Створення додаткових зсувних деформацій і «перерізання» потоків, спрямованих на вихід змішувача) Патент США № 3286992, патент Великобританії № 1413825</p>
	<p>Поверхня перемішувачів складається з плоских граней (Спрощення технології виготовлення елементів) Патент США № 3643927, Французька заявка 22559444</p>
	<p>Елементи виконані плоскими хвостовиками, прорізи яких служать для фіксації елементів (Запобігання довільній зміні кута контакту кінцевих кромки)</p>
	<p>Елементи встановлюються в циліндричні або конічні гільзи (Одночасна фіксація і регулювання кута контакту торцевих кромки)</p> <p><i>a</i> – циліндричні гільзи; <i>б</i> – конічні гільзи 1 – рукав; 2 – стрижень; 3 – розетка для фіксації кута торцевих країв</p>
	<p>Корпус змішувача має призматичну форму, гвинтовим елементам надана геометрія, необхідна для їх щільного монтажу в каналі</p>
	<p>Гвинтова поверхня елементів створюється серією стрижнів, жорстко прикріплених до стінок каналу або до поверхні центральної труби</p>



Гвинтові елементи розташовуються на поверхні центральної труби або валу (Регулювання теплового режиму і використання змішувачів в якості теплообмінників Патенти США № 4049241 і 3794300)

Також широко поширена паралельна установка елементів в одну упаковку (патент США № 3424437, швейцарський патент № 5993096). Це дає можливість при обробці значних обсягів сировини, що вимагають застосування змішувальної труби великого діаметру, зменшити довжину змішувача в кілька разів (на кількість паралельних потоків) (рис. 2 і 3).

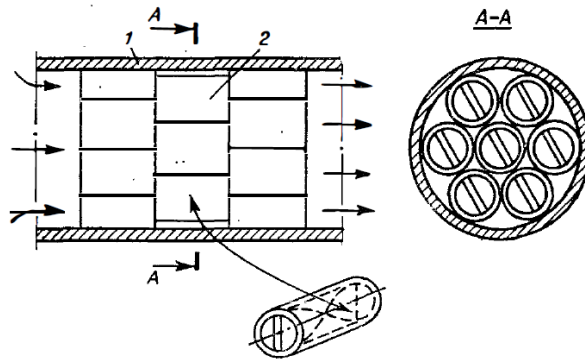


Рис. 2. Змішувач з пакетами перемішуючих перегородок:
1 - корпус; 2 - втулки з гвинтовим елементом

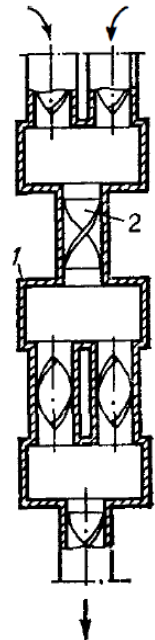


Рис. 3. Змішувач з паралельною установкою гвинтових елементів: 1 – корпус; 2 – гвинтовий елемент

Шнекові елементи, що використовуються в статичних змішувачах, дуже технологічні, їх легко виготовити вручну і такими високопродуктивними методами, як лиття або штампування. Відсутність механічних навантажень робить вибір матеріалів необмеженим. Однак переважно підбирати матеріали корпусу змішувача і самі гвинтові елементи, щоб корпус можна було легко зруйнувати, а елементи залишилися цілими. Сенс таких конструкцій полягає в швидкій заміні змішувача на новий або в здійсненні оперативного очищення елементів. Не виключається виготовлення

корпусу з еластичного матеріалу, такого як гума, тобто у вигляді гнучкої труби. Це розширює сферу застосування пристрою, дозволяє оптимально використовувати простір, виділений під ту чи іншу технологічну операцію.

У вітчизняній промисловості найбільш поширеним є статичний змішувач з впаяними в довгі ланки елементами, які розміщені в розбірному корпусі в поздовжньому напрямку (рис. 4). Відомий ряд подібних конструкцій, що відрізняються лише способами дозування або введення компонентів в канал змішувача [11, 85).

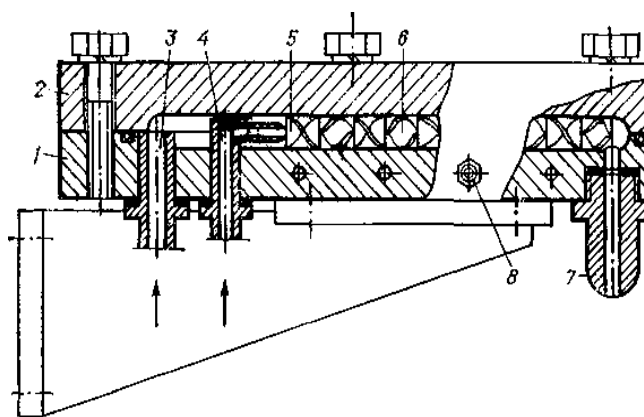


Рис. 4. Проточний змішувач з гвинтовими перемішувачими елементами у розбірному корпусі:

1, 2 – розбірний корпус; 3, 4 – патрубки для подачі комплектуючих; 5, 6 – гвинтові елементи; 7 – насадка; 8 – патрубок для подачі теплоносія

Змішувачі з проміжними камерами. Включення в конструкцію змішувача проміжних порожнистих камер, що чергуються зі статичними змішувальними вставками, дає можливість посилити рекомбінаційний ефект шарів перемішаних компонентів, а також вирівняти поля швидкостей або температурні поля окремих потоків, які по-різному видаляються зі стінок змішувача.

Найбільш поширеною конструкцією змішувачів з проміжними камерами називають в літературі «генератор міжфазної поверхні (Interfacial surface generator ISG)». На рис. 5 представлений змішувач з циліндричними вставками. Кінці циліндричних вставок мають на обох кінцях поглиблення з кутом 120° між плоскими гранями. Насічки повертаються одна щодо іншої на 90° . При з'єднанні двох вставок ці насічки утворюють проміжні камери у

вигляді проміжних камер у вигляді тетраедри, при яких сповільнюється рух змішаних компонентів. На впускній стороні циліндричній вставці надається клиноподібна форма для орієнтації і фіксації суміжних елементів. Потік змішаних матеріалів розділений вставкою на чотири потоки циліндричними каналами, які починаються біля базової лінії першої виїмки і закінчуються в другій виїмці на лінії, перпендикулярної підставі. Конструкція вставок забезпечує напрямок крайніх зовнішніх каналів всередину і внутрішніх каналів назовні. У проміжних камерах відбувається грубе перемішування. У проміжних камерах відбувається грубе перемішування, потоки обумовлені їх рекомбінацією і зміною початкового напрямку руху. Тонке перемішування і дисперсія матеріалів здійснюється в вставних каналах. Ефект змішування також посилюється за рахунок скручування кожної пари каналів (одна пара крутиться за годинниковою стрілкою, а інша проти годинникової стрілки).

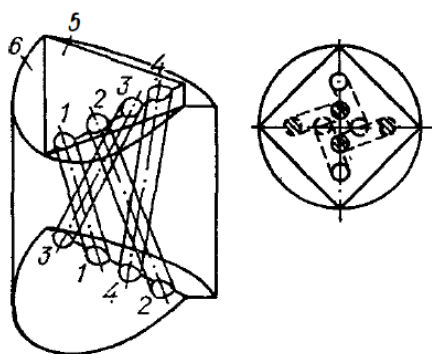


Рис. 5. Вставний змішувальний елемент з циліндричними каналами:

1...4 – циліндричні канали; 5 – грань виїмки; 6 – грань для фіксації

Існують і більш прості по конструкції, але не менш ефективні змішувачі. На рис. 6 – змішувач (патент США № 3582048), в якому диски 4 з декількома наскрізними каналами 5 монтуються дистанційними втулками 6 на деякій відстані один від одного в циліндричному корпусі 3 і таким чином утворюють проміжні камери для додаткового змішування компонентів.

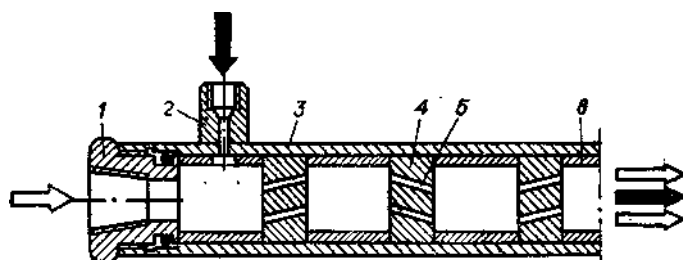


Рис. 6. Статичний змішувач з дисковими вставками
 1, 2 – арматура для подачі компонентів; 3 – корпус;
 4 – диск; 5 – наскрізний канал; 6 – дистанційна втулка

У ряді конструкцій проміжні камери не створюються шляхом розміщення змішувальних вставок в одному корпусі, а виконані у вигляді окремих багатограних або циліндричних об'ємів (патент США № 3404869) (рис. 7). Перехід з однієї камери в іншу здійснюється по сполучних каналах-трубопроводах. Перевагою даного змішувача є його низька металева ємність і можливість змінювати положення камер в просторі, домагаючись ефективного використання пристрою.

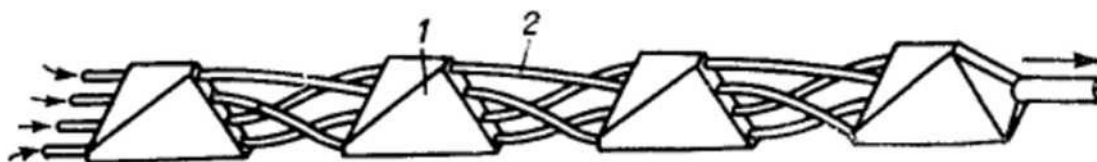


Рис. 7. Змішувач з проміжними камерами:
 1 – проміжна камера; 2 – з'єднувальний канал

Незважаючи на те що в зарубіжній технічній літературі пріоритет створення статичних змішувачів явно віддається американським фірмам, такі змішувачі з'явилися більше 30 років тому. Однією з перших конструкцій статичного змішувача з проміжними камерами був так званий гідравлічний змішувач, що складається з порожнистих кульок, які грали роль проміжних камер і з'єднувалися патрубками (рис. 8). Аналогічні розробки є і в інших винаходах (Патент США № 352391, Чехія № 214380).

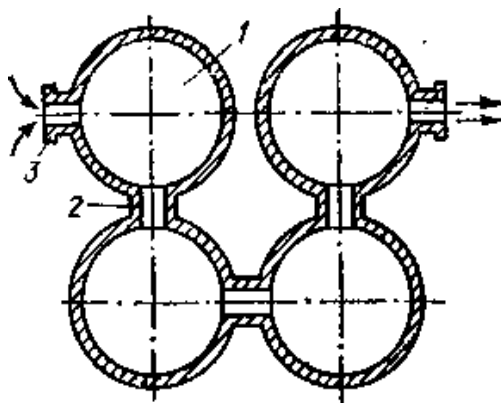


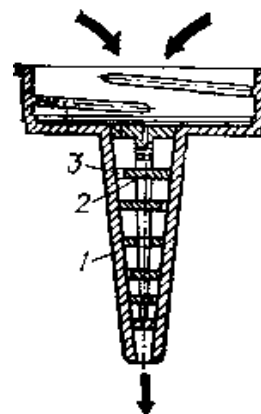
Рис. 8. Гідрозмішувач для рідин:
 1 – порожнисті кулі;
 2, 3 – з'єднувальні патрубки

Наступні змішувачі можуть використовуватися в різних процесах хімічної технології, наприклад, в якості елементів наповнювальних пристроїв

швидкотвердіючих мас. На рис. 9 представлена кришка навісного обладнання для змішування декількох рідких середовищ (Патент США № 3193964). Пристрій складається з конічного корпусу і серії поперечних дисків, закріплених на одній осі і оснащених наскрізними периферійними щілинами-каналами. Конічна форма корпусу значно полегшує розбирання сопла в разі застигання суміші.

Рис. 9. Насадка для змішування рідин:

- 1 – корпус;
- 2 – диски;
- 3 – наскрізні периферійні канали



Змішувачі з пластинчастими і гофрованими елементами. Проблема багаторазового поділу і рекомбінації змішаних компонентів статичним способом в деяких конструкціях вирішується установкою набору пластин під певними кутами до потоків (патенти США 3051452 і 3051453) рис. 10. Плоскі елементи, розташовані послідовно уздовж корпусу, забезпечують поділ рідин на окремі потоки і їх спрямований рух по складних каналах, де вони багаторазово воз'єднуються і повторно подрібнюються до високого ступеня гомогенізації (Патент США № 3620106).

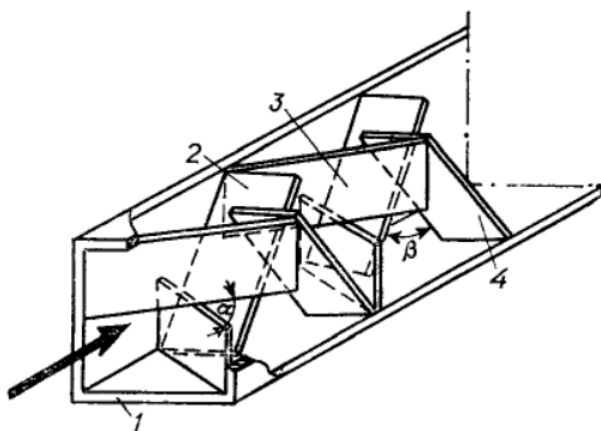


Рис. 10. Змішувач з пластинчастими елементами:

- 1 – корпус;
- 2...4 – різно спрямовані пластини;
- α , β – кути нахилу пластин

Широке поширення набули змішувачі, в яких елементи набрані у вигляді своєрідної просторової решітки взаємно перпендикулярних пластин,

орієнтованих уздовж циліндричного тіла (рис. 11) по потоку (патент США 3406947).

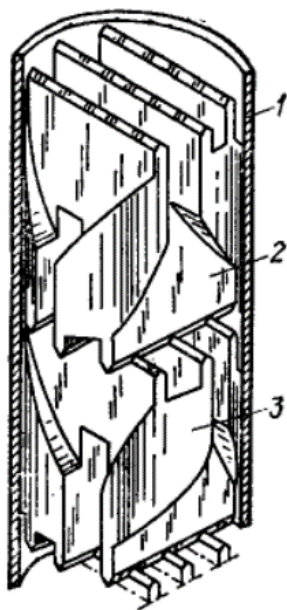


Рис. 11. Змішувач з гратчастим розташуванням пластинчатих елементів:

1 – корпус;
2, 3 – змішувальні елементи

Прагнення максимально розширити міжфазну поверхню змішаних матеріалів без збільшення розмірів змішувача призвело до створення ще одного типу статичних змішувачів - пристроїв, в яких елементами є пакети з гофрованих металевих або пластикових пластин, що контактують поверхні яких утворюють пересічні канали (рис. 12). Змішувачі цього типу випускаються рядом зарубіжних компаній (Кох, США; Байер, Німеччина; Сульцер, Швейцарія). В роботі статичних змішувачів інших типів поділ і возз'єднання потоків виконується при проходженні матеріалів по каналах, утвореним елементами. Особливість роботи змішувачів з гофрованими елементами полягає в тому, що окремі потоки безпосередньо стикаються в пересічних напрямках між собою, виконуючи при цьому активний масообмін (рис. 13).

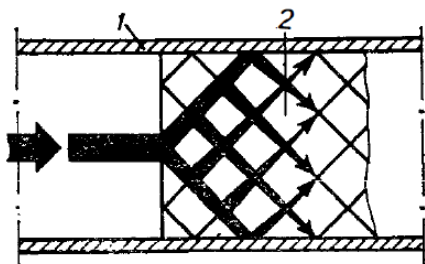


Рис. 12. Змішувальна головка з

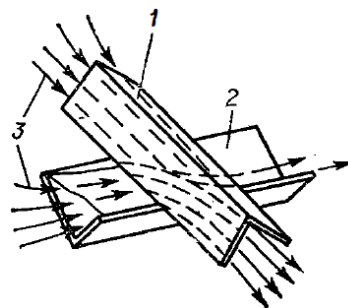


Рис. 13. Потоки в пересічних каналах

гофрованими елементами:
1 – корпус; 2 – пакет гофрованих
пластин

гофрованих плит:
1, 2 – канали; 3 – вхідні змішувані
потоки

Процес змішування регулюється підбором кількості гофрованих змішувальних плит. Оскільки кількість перетинів каналів збільшується пропорційно площі поперечного перерізу змішувача і, отже, кількість перетинів порівну на одиницю маси потоку, то ступінь перемішування не залежить від діаметра оболонки. Існують різні конфігурації змішувальних пластинчастих гофр, які виготовляються в залежності від типу компонентів, що змішуються, допустимого перепаду тиску і необхідного ступеня диспергування.

Інші конструкції змішувачів. Простота і висока ефективність статичних змішувачів стимулюють створення нових конструктивних рішень в даній області. Серед численних конструкцій слід назвати так звані трубчасті змішувачі (патенти США 3642090 і 3647187). Корпус цих змішувачів являє собою жорстку або гнучку гільзу труби, відформовану таким чином, щоб гофрувати (рис. 14) або складки (рис. 15) на внутрішній поверхні створені умови для інтенсивного перемішування матеріалів, що подаються.

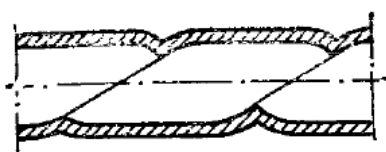


Рис. 14. Трубчастий змішувач з «гофрами» на внутрішній поверхні

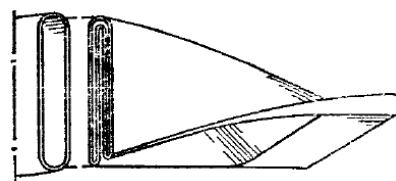


Рис. 15. Змішувач складений з трубчастих секцій

З цією ж метою різні спіралі поміщаються в трубчасті змішувачі (US Patent 3908702) (рис. 16).

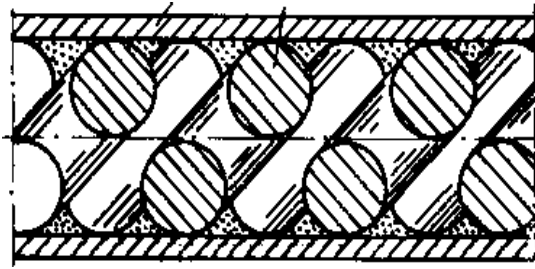


Рис. 16. Трубчастий змішувач зі спіральною вставкою:
1 – корпус; 2 – спіральна вставка

Змішування рідин також може бути досягнуто шляхом створення раптового розширення або звуження трубопроводу (рис. 17), тобто зміною розмірів і конфігурацій трубопроводів, що викликає зміну швидкості потоку робочого середовища і виникнення посиленого вихрового утворення (заявка Великобританії № 1340913).

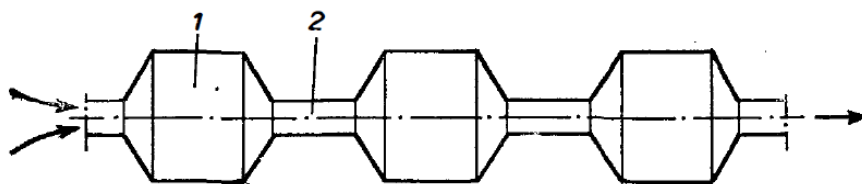


Рис. 17. Змішувач у вигляді труби періодичного профілю:
1 – розширення трубопроводу ; 2 – звуження трубопроводу

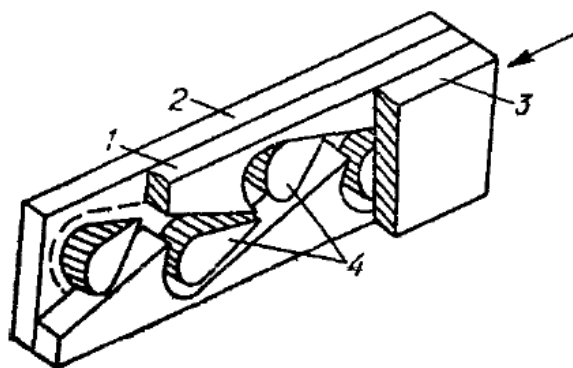
При різкому розширенні потік рідини зривається з кута і розширюється не раптово, як трубопровід, а поступово, а в кільцевому просторі між потоком і стінкою труби утворюються вихори, які викликають безперервний обмін частинками потоку основної рідини і її вихрової частини. При раптовому розширенні трубопроводу втрати енергії витрачаються виключно на вихрове утворення, пов'язане з відділенням потоку від стінок, тобто на підтримку безперервного обертального руху рідких мас і їх постійного обміну.

Раптове звуження трубопроводу зазвичай викликає менші втрати енергії, ніж раптове розширення при такому ж співвідношенні ділянок трубопроводу. Втрата енергії в цьому випадку відбувається через тертя на вході у вузьку трубу і втрат на освіту вихорів. Освіта вихорів відбувається за рахунок того, що потік, обтікаючи кут входу в вузький трубопровід, відривається від нього і звужується; Кільцевий простір навколо звуженої частини потоку заповнено малорухомої закрученої рідиною.

Пошуки в напрямку підвищення експлуатаційної надійності привели до створення статичного змішувача з каплевидними елементами. Особливість цього пристрою полягає в тому, що каплевидної форми змішувальні елементи кріпляться до знімних стінок корпусу. Корпус являє собою каркас, який утворює ряд послідовно сполучених площин (рис. 18). Змішані компоненти, обтікаючи нерухомі елементи, безперервно розділяються на кілька потоків, тим самим збільшуючи інтерфейс компонентів і їх дисперсність.

Рис. 18. Статичний змішувач з каплевидними елементами:

- 1 – рама;
- 2, 3 – плити;
- 4 – змішувальні елементи



Каплевидна форма елементів змушує потоки рідини рухатися з різною швидкістю, яка збільшується в міру їх відходу від поверхні цих органів, в результаті чого відбувається відносний рух шарів, що покращує перемішування. Кріплення каплевидних елементів до знімних бічних стінок корпусу забезпечує їх наявність для очищення або заміни.

У деяких випадках до статичних змішувачів відносяться також давно відомі змішувачі з різними турбулайзерами (рис. 19), інжекторні і викидні змішувачі (рис. 20).

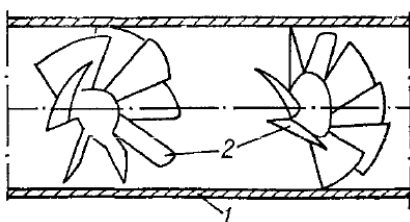


Рис. 19. Змішувач з турбулізуючими вставками:
1 – корпус; 2 – турбулізуючі вставки

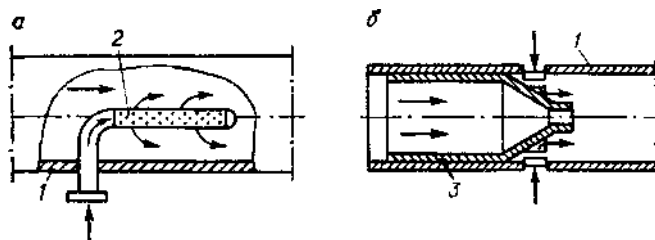


Рис. 20. Інжекторні (а) і ежекторні (б) проточні змішувачі:
1 – трубопровід; 2 – сопло;
3 – вставка-дифузور

Метод уприскування полягає в тому, що один компонент подається під

тиском через сопло по осі трубопроводу, по якій протікає другий компонент. Ефект змішування посилюється за рахунок того, що струмінь потоку, що стікає з сопла, всмоктує рідину, що рухається по трубопроводу.

При методі викиду один зі змішаних компонентів всмоктується в основний потік за рахунок різниці тисків, створюваної вставкою дифузора.

Такі змішувачі класифікуються як статичні в деякому роді умовно, так як ці пристрої використовуються тільки для змішування малов'язких матеріалів за умови створення потоків з досить високим значенням критерію Рейнольдса ($Re \geq 2000$), при цьому діапазон застосовності статичних змішувачів ширше.

1.1.1 Статичні змішувачі як теплообмінники

Найбільш перспективним рішенням проблеми зменшення ваги і габаритів теплообмінника без помітного збільшення енергетичних витрат, необхідних для перекачування теплоносіїв, стало інтенсивне перемішування рідини, що рухається в трубі, за допомогою різних спіральних вставок або турбулізаторів, розміщених всередині труби, що показало можливість збільшення коефіцієнта теплопередачі у 1,5...5 разів.

На рис. 21 представлено теплообмінник з рубашкою, в трубі якого встановлені гвинтові змішуючі елементи. Безперервний рух часток потоку від центру труби до периферії і потім зворотно прискорює досягнення рівномірності розподілу температури, що зробило цю систему теплообміну придатною для розігріву матеріалів, чутливих до температури. Як приклад, у харчовій промисловості подібна система була використана для обробки продуктів (шоколад, мармелад і т.п.), пригораючих до стінок трубопроводів.

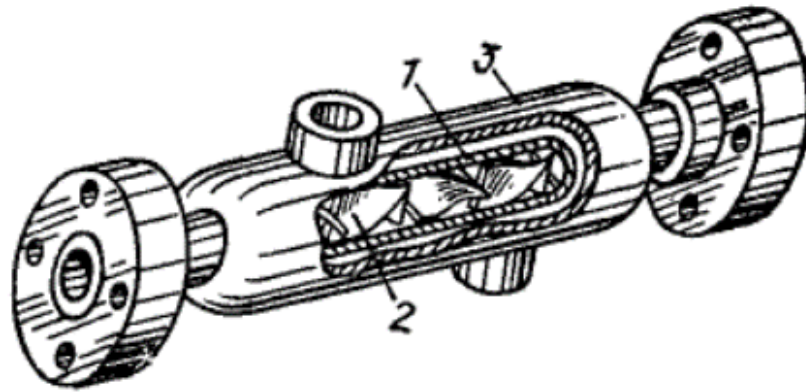


Рис. 21. Змішувач-теплообмінник:

1 – внутрішня труба; 2 – гвинтові елементи; 3 – рубашка теплообмінника

Конструкція теплообмінників може бути різною. Отже, на рис. 22 представлений комбінований апарат для теплообміну і змішування (Заявка Франції № 2255097). Він призначений для змішування та/або нагрівання та швидкого охолодження при виробництві однорідного складу чутливих до температури продуктів, таких як фотоемульсії. Пристрій являє собою циліндричний корпус 1, в якому встановлені змішувальні елементи 2. Особливістю конструкції пристрою є те, що змішувальні елементи встановлюються на поверхні внутрішньої труби 3, коаксіальної з циліндричним корпусом 1. Через трубу 3 рухається теплоносій (наприклад, вода).

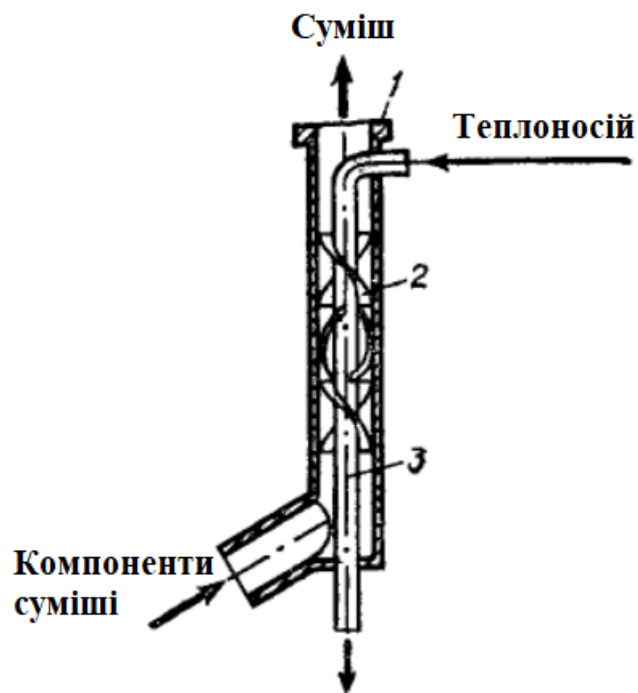


Рис. 22. Комбіновані апарати для теплообміну і перемішування:
 1 – корпус змішувача;
 2 – гвинтові елементи;
 3 – труба теплообмінника

Набагато краща тепла ефективність досягається в конструкції трубчастих змішувачів, нагрітих або охолоджуваних як зсередини, так і зовні. Приклади таких пристроїв представлені на рис. 23. Ці статичні змішувачі призначені для змішування і нагрівання компонентів фотоемульсії. На малюнку чорні стрілки показують маршрут приготування продукту, а білі – шлях нагрівання або охолодження середовища (теплоносія) через агрегат.

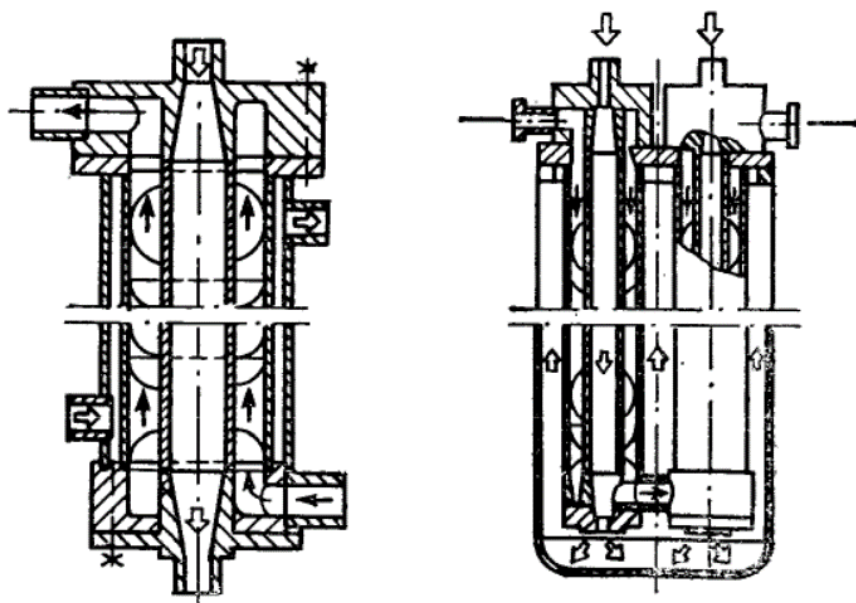


Рис. 23. Трубчасті змішувачі з підігрівом

1.2 СТРУКТУРА ПОТОКУ В МАЛООБ'ЄМНИХ ЗМІШУВАЧАХ

ПЕРЕМІШУВАННЯ В СТАТИЧНИХ ЗМІШУВАЧАХ

Змішувачі з гвинтовими елементами. Кожен тип статичного змішувача має свою структуру потоку, однак, загальним є те, що інтерфейс між компонентами досягається потоком зсуву та розщепленням та перестановкою потоків рідини. У статичних змішувачах з гвинтовими елементами рідина відшаровується кожен раз при переході з одного елемента в інший. У середині одного елемента рідина надходить по двох напівкруглих гвинтових каналах.

В цілому механізм змішування можна представити таким чином.

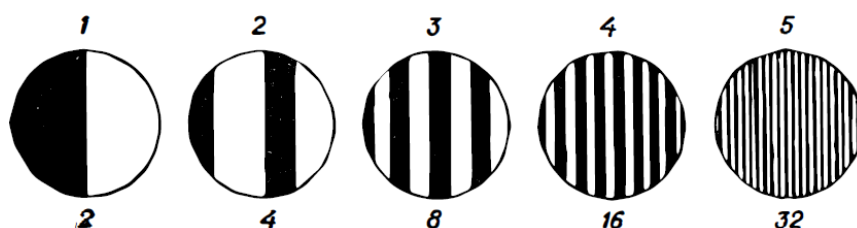


Рис. 24 Схема розподілу потоку на гранях гвинтових елементів.
Цифри вгорі – це кількість елементів, внизу – кількість смуг

У ламінарному потоці матеріал ділиться на торцевій кромці кожного елемента і слід по каналах, утворених поверхнею елементів. На кожному наступному елементі обидва потоки продовжують ділитися далі (рис. 24). В результаті кількість N смужок матеріалу збільшується відповідно до залежності

$$N = 2^n,$$

де n – кількість елементів.

У ламінарному або турбулентному потоці матеріал здійснює обертальний рух навколо свого гідравлічного центру в кожному каналі змішувача, що викликає радіальне перемішування (рис. 25). Весь матеріал безперервно і рівномірно перемішується, вирівнюється температура

швидкості і концентрація змішаних компонентів.

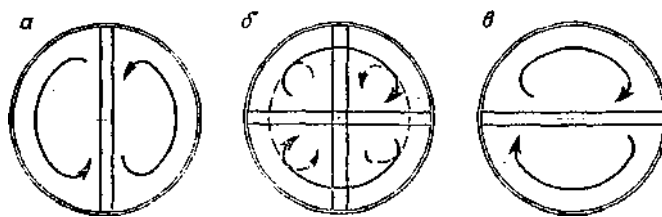


Рис. 25. Схема радіального руху потоків в змішувачі:
a – лівосторонній елемент; *б* – поверхня розділу; *в* – правий елемент

Такий механізм змішування занадто схематичний. При цьому не враховуються істотні особливості структури потоків, які виникають при змішуванні конкретних матеріалів.

Залежно від в'язкості оброблюваного середовища і швидкості потоку в статичних змішувачах можуть бути реалізовані як ламінарний, так і турбулентний режими. У ламінарному режимі найбільш поширеними процесами, що здійснюються в цих змішувачах, є процеси змішування середовищ, що відрізняються великою в'язкістю.

Відповідно до основних положень теорії ламінарного змішування, що вказують на істотну роль вершини поділу компонентів в утворенні однорідних сумішей, розглянемо характер збільшення міжфазної поверхні змішаних компонентів і його залежність від технологічних параметрів процесу і конструктивних особливостей обладнання (об'ємна швидкість подачі, кількість перемішуючих елементів, кути їх скручування і взаємної орієнтації).

Збільшення міжфазної поверхні компонентів відбувається в процесі послідовного зменшення товщини ламінарного потоку з подальшим його розкладанням на крапельки. Значення питомої міжфазної поверхні f можна розрахувати по відношенню до загальної площі поверхні крапель до їх об'єму:

$$f = 6\Theta/d_k,$$

де d_k – діаметр краплі; Θ – об'ємна частка диспергуємої фази.

Обробка фотографій процесу послідовного утворення крапель з потоку,

що подається в циліндричну трубу, дозволяє отримати експериментальні кореляції

$$d_k = 1,9d_{ц}$$

де $d_{ц}$ – діаметр циліндричної полоси ламінарного потоку.

Діаметр d_u є аналогом широко використовуваного в теорії ламінарного змішування, уявлення про товщину смужок дисперсного компонента, розмір якого характеризує якість змішування високов'язких рідин.

У випадку зі статичними змішувачами з гвинтовими елементами збільшення міжфазної поверхні компонентів здійснюється при проходженні ними перемішуючих елементів, а ефективність процесу диспергування по довжині змішувача різна. У границях 1-го і 2-го елементів відбувається інтенсивне зменшення товщини смуг диспергуємого компонента до розмірів, набагато менших, ніж проточний перетин шнекових каналів. У зв'язку з тим, що розміри смуг стають менше розмірів каналів, утворених гвинтовими елементами і корпусом, подальше зменшення товщини смуг відбувається в основному під впливом зсувної деформації, що розвивається в каналах, і гомогенізації суміші - за рахунок постійної переорієнтації і поділу потоків. Інтенсивність диспергування компонента, а отже, і збільшення міжфазної поверхні змішуємих матеріалів спочатку істотно залежить від величини зсувної деформації (кількості перемішуючих елементів), але після цього, досягнувши оптимального значення, припиняється. Як впливає з рис. 26, для конструкцій змішувачів з гвинтовими елементами максимально можлива ступінь перемішування досягається при проходженні 20...25 перемішуючих елементів і повністю задовольняє вимогам однорідності матеріалу.

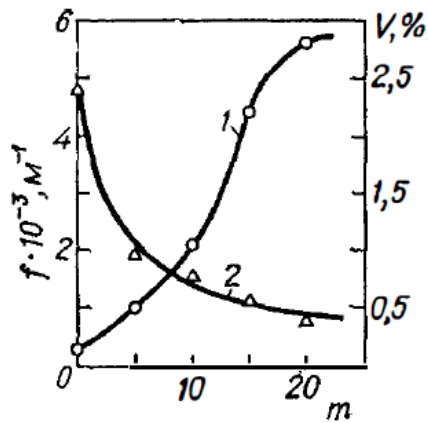


Рис. 26. Залежність питомої міжфазної поверхні $f(1)$ і коефіцієнта варіації концентрації $V(2)$ від кількості перемішуючих елементів

Такий характер процесу змішування зберігається. при різних швидкостях об'ємної подачі компонентів. Це підтверджує припущення в літературі про те, що енергія, що витрачається на перемішування в статичних змішувачах з гвинтовими елементами, залежить не від швидкості руху частинок матеріалу, а від геометричних характеристик окремих елементів.

Серед конструктивних факторів, які найбільше впливають на хід процесу змішування, необхідно відзначити взаємну орієнтацію торцевих граней змішувальних елементів. Так, при куті контакту між торцевими гранями 90° міжфазна поверхня після проходження матеріалу 15 змішувальних елементів мала таке ж значення, як і після того, як дисперсна складова пройшла 20-й елемент при значенні кута у 75° .

Таким чином, механізм дисперсного перемішування високов'язких рідин в каналах статичних змішувачів полягає в зменшенні товщини смуг дисперсного компонента при послідовних актах поділу потоку на торцевих гранях гвинтових елементів, що чергуються з дією зсувної деформації всередині одного змішувального елемента. Кількість таких ефектів визначається кількістю перемішуючих елементів.

Цей механізм характерний для змішування компонентів, які трохи відрізняються в'язкістю і концентраціями. Процес приготування різних сумішей, для яких особливо ефективні статичні змішувачі, характеризується тим, що в них змішуються компоненти, в'язкість яких відрізняється як мінімум в два рази, а концентрація компонента, що має меншу в'язкість,

становить близько 10%. У цьому випадку механізм диспергуючого змішування має свої особливості, зменшення товщини полос відбувається в основному під дією деформації зсуву, що розвивається у каналах гвинтових елементів, у сукупності з інтенсивним диспергуванням на впускній ділянці змішувача.

Тому, незалежно від характеристик змішуваних компонентів, щоб оцінити ефективність змішувальної дії, необхідно мати дані про величину деформації зсуву, що розвивається в одному гвинтовому елементі. Щоб розрахувати величину деформації зсуву, необхідно знати розподіл швидкостей частинок по лініях струму. З цією метою була виміряна фактична швидкість трасуючих частинок, що перетинають нормальну площину до напрямку потоку (рис. 27). Аналіз отриманих даних свідчить про те, що поле швидкостей змішаних компонентів в робочих органах змішувачів з гвинтовими елементами має параболічний характер (рис. 28). Зміна об'ємної швидкості подачі, кута скручування елементів гвинта і кута контакту торцевих граней не змінює параболічного характеру руху змішаних матеріалів. Крім того, при об'ємних швидкостях подачі, відповідних реальному процесу приготування суміші, відсутні розриви безперервності або вихори потоку, а завдяки низькій швидкості рух матеріалів та їх високій в'язкості характер потоку залишається ламінарним ($Re \leq 100$).

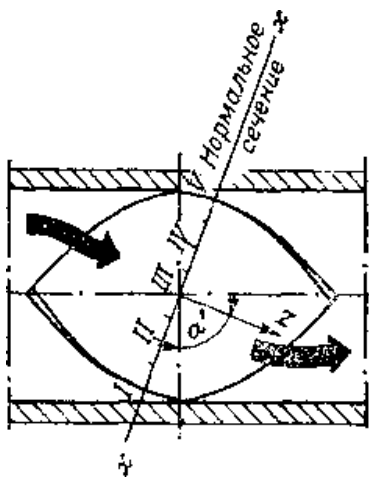
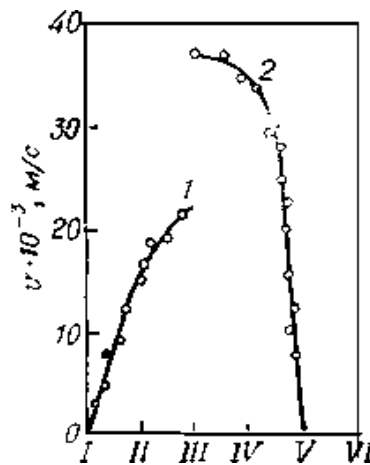


Рис. 27 Схема вимірювань в умовах розвинутого потоку:



Точки нормального перерізу

Рис. 28 Площинна схема розподілу швидкості потоку v по нормальній лінії

$I...V$ – точки нормального перетину

поток для різних об'ємних швидкостей подачі (в м/с):
 $1 - 1,5 \times 10^{-3}$; $2 - 14,6 \times 10^{-3}$

Слід зазначити, що швидкості частинок на внутрішній поверхні корпусу змішувача близькі до нуля, що говорить про наявність адгезії матеріалу на стінах. Вимірювання температури витрати на вході і виході статичного змішувача свідчить про те, що немає помітного нагріву компонентів під впливом зсувної деформації що розвивається.

Таким чином, відсутність безперервності розривів і ламінарний характер потоку компонентів, що рухаються в робочій порожнині змішувача, дозволяють використовувати основні рівняння гідродинаміки для розробки математичної моделі технологічного процесу. Крім того, можуть бути висловлені припущення про адгезію матеріалу і ізотермічності процесу.

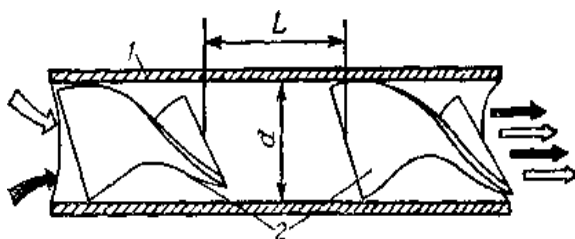


Рис. 29 Конструкція змішувача для гасіння турбулентності потоку:

1 – корпус; 2 – перемішуючі елементи

При певному співвідношенні в'язкості перемішуємого середовища і об'ємної швидкості подачі в змішувачі може виникнути турбулентний потік. У деяких випадках така турбулентність потоку небажана, так як відбувається великий перепад тиску в рідинах, що проходять через змішувач, спостерігаються явища гідравлічного удару рідини по корпусу і перемішуючих елементах. Тому вдаються до штучного придушення турбулентності, модернізуючи конструкцію змішувача. Наприклад, на рис. 29 показано конструкцію статичного змішувача (Великобританія № 1351811), елементи якого розташовані уздовж труби таким чином, щоб передня кромка

одного елемента перебувала на певній відстані від задньої кромки наступного елемента. Відстань між краями елементів встановлюється залежно від критерію Рейнольдса Re :

$$l = [1 + 2,5 \lg Re] d,$$

де d – діаметр змішувача.

Значення Re визначається розрахунковим шляхом, якщо відома витрата, яку можна знайти експериментальним шляхом або обчислити з відповідних залежностей.

Змішувачі з проміжними камерами. У кожному елементі змішувача чотири круглих вхідних канали перпендикулярні чотирьом круглим вихідним каналам (рис. 30, *a*). Канальні отвори робляться таким чином, щоб вхід в канал був зовні, а вихідний - всередині.

У результаті цього досягається радіальне перемішування. З потоком всередині кожного змішувального елемента перемішування не відбувається (відбувається радіальний перерозподіл чотирьох потоків) і утворюється порожнина між двома елементами, розташованими послідовно, що має форму тетраедра. Чотири потоки, що виходять з першого елемента змішувача, об'єднуються для формування нових міжфазних поверхонь (рис. 30, *б*). Течія, що відбувається в області тетраедра, за своєю суттю є дивергентно-конвергентною. Вона призводить до значного розтягування елементів поверхні розділу. У такому розтягнутому стані рідина знову ділиться на чотири потоки, потрапляючи на входи другого перемішувального елемента, де знову відбувається радіальний розподіл потоків. В результаті протікання і рекомбінації потоків рідини кількість смуг N_s збільшується у чотири рази. Слідуючи за потоком, що проходить через ряд змішувальних елементів, можна помітити, що між кількістю смуг і кількістю елементів існує наступна залежність:

$$N_s = 4^n,$$

де n – кількість елементів.

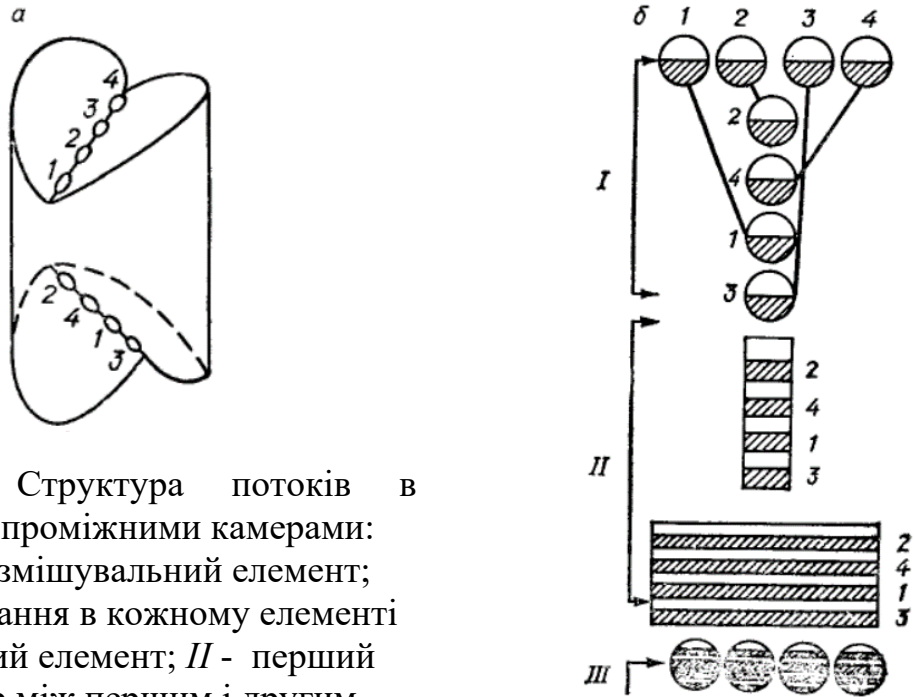


Рис. 30. Структура потоків в змішувачі з проміжними камерами:
a – один змішувальний елемент;
б – змішування в кожному елементі
 (I - перший елемент; II - перший тетраедр між першим і другим змішувальними елементами;
 III – другий елемент)

Змішувачі з пластинчастими і гофрованими елементами.
 Особливість роботи змішувачів з пластинчастими або гофрованими елементами полягає у тому, що окремі потоки безпосередньо контактують в протилежних напрямках один з одним, виконуючи при цьому активний масообмін (див. рис. 13). Кількість шарів, утворених таким чином, що характеризують ступінь дисперсності змішаних матеріалів, приблизно оцінюється з залежності:

$$S = 0,5Nm(2m)^{n-1} \quad (1.1)$$

де S – кількість утворених шарів; N – кількість компонентів; m – кількість пластин в пакеті; n – кількість пакетів.

Досвід показує, що для досягнення певної якості змішування (кількості шарів) при змішуванні компонентів з великими відмінностями в'язкості потрібно більше перемішуючих елементів, ніж розраховується рівнянням (1.1).

2. Теорія розрахунку потоків у статичному змішувачі

Статичні мішалки часто використовуються в промисловості для перемішування матеріалів, як прискорювачі тепло- і масообміну або навіть як хімічні реактори в різних сферах застосування. Конструкції зазвичай складаються з порожньої труби з вставленими в неї змішувальними елементами, які збурюють потік і змішують потоки матеріалу. Оскільки вони не містять рухомих частин, енергія для потоку отримується за рахунок перепаду тиску на змішувачі.

Схематичне зображення шестиелементного змішувача на рисунку 2.1 ілюструє геометрію та важливі параметри у змішувачі. Різні режими течії зазвичай розрізняють на основі числа Рейнольдса у відкритій трубі.

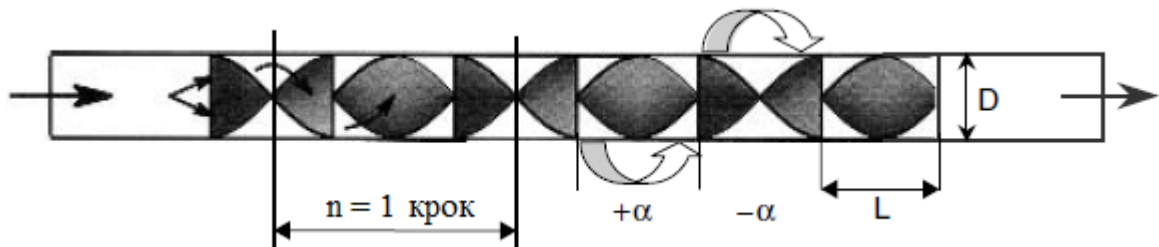


Рис. 2.1 Геометрія шестиелементного статичного змішувача Кенікса. Відношення довжини до діаметру елемента (L/D) становить 1,5, а кут повороту - 180° у стандартному виконанні

Характер перемішування досліджується шляхом моделювання 10% (за об'ємом) впорскування трасера з такою ж густиною і в'язкістю, як і в основну рідину. Замкненого розв'язку для траєкторій частинок для тривимірних течій не існує. Схеми змішування трасерів можуть бути отримані експериментально за допомогою схем впорскування барвника або обчислювально шляхом інтегрування вздовж поля швидкостей. Траєкторія 200000 частинок-трасерів розраховується згідно з рівняннями після того, як вони були інжектвані на 1 мм далі за течією від першого елемента в центрі поперечного перерізу. На рис. 2.2 *a-d* показано картини змішування для $Re = 10(\sqrt[3]{10})$ після 8, 12, 16 і 20 елементів змішувача. Інерційні ефекти на потік при цьому Re малі. Очевидно, що мітка, введена спочатку в центр труби, не поширюється рівномірно по всій області течії. Навпаки, конвективний, розтягнутий і згорнутий потік призводить до утворення пластинчастої системи, що складається з тисяч смуг з широким розподілом локальних масштабів довжини. Структура продовжує розвиватися зі збільшенням кількості періодів течії; ламелі стають дедалі тоншими в результаті ітеративного процесу розтягування і згор-

Відповідальна організація НУХТ	Технічне узгодження Доломакін Ю.Ю.	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа			
Власник документа НУХТ, 0Ф-2-6м	Розробник документа Ніколаєнко Е.М.	Назва, додаткова назва Теорія розрахунку потоків	210760.KP.01.000.ПЗ			
	Документ затверджено Гавва О.М.		Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 33

тання. Коли рідина проходить через все більшу кількість елементів, суміш демонструє все більш тонкі смуги, організовані в топологію, що самозберігається, і самоподібний процес домінує в еволюції структури.

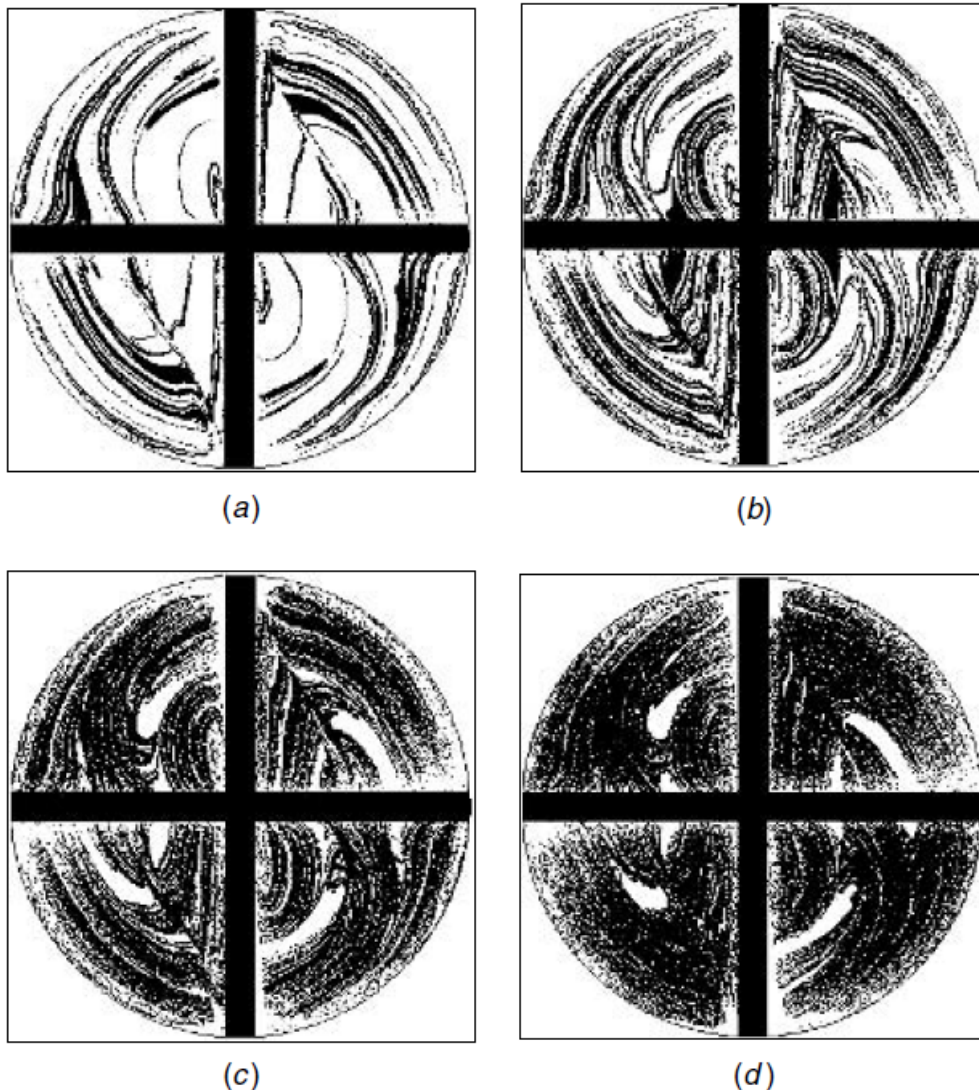


Рис. 2.2 Впорскування присадки з рівною в'язкістю (10% за об'ємом) безпосередньо перед впускним отвором показує нерівномірність змішування в стандартному змішувачі Кенікса. Трасуючі картини змішування для $Re = 10(10)^{1/3}$ показані після (a) 8, (b) 12, (c) 16 і (d) 20 елементів змішувача

Рисунок 2.2 ілюструє внутрішню самоподібність структури перемішування. Зі збільшенням часу хаотична течія створює частково перемішану структуру, яка по суті ідентична структурі, зафіксованій періодом раніше, за винятком того, що в кожній області спостерігається більша кількість тонких смуг. Такі самоподібні структури не залежать від початкових умов. Коли структура перемішування реєструється через певні проміжки часу, вона "завжди виглядає однаково", незалежно від початкового розташування забарвленої рідини в експериментах або розташування струменя в моделюванні (за винятком випадків, коли трасер вводиться острівцем).

2.1 Асимптотична спрямованість у змішувачі

Асимптотична спрямованість (АС) – це локальна властивість хаотичних потоків, яка створює інваріантний просторовий шаблон суміші в різні моменти часу. Матеріальна лінія, яка потрапляє в певну область потоку, приймає орієнтацію, характерну для цього положення і незалежну від часу. Тому періодичні знімки поперечного перерізу за течією виглядають однаково якісно, з кожним знімком виявляється все більше і більше деталей.

Ця властивість, яка контролює топологію хаотичних течій, легко спостерігається в тривимірних потоках. Методика, що використовується для виявлення АС у потоці, подібна до методу обчислень розтягування з невеликою модифікацією. Якщо невеликий матеріальний елемент представити у вигляді нескінченно малого вектора, прикріпленого до елемента рідини в потоці, його положення і зсув можна розрахувати за рівняннями. Однак замість того, щоб прикріплювати до частинки рідини лише один такий вектор, беруть набір з трьох ортогональних одиничних векторів (рис. 2.3). Еволюція трьох векторних компонент, прикріплених до однієї траєкторії, показує, як локальне просторове положення впливає на орієнтацію ниток рідини в певній області. Три вектори можна розглядати як матеріальні лінії, що знаходяться в безпосередній близькості одна від одної і мають різну початкову орієнтацію. Відносний напрямок кожного вектора в ансамблі можна відстежувати, вимірюючи косинус кута між векторами в міру того, як вони конвективно переміщуються потоком. Випадковим чином розподіляємо "векторні триноги" на вході. Косинус кута між будь-якими двома компонентами спочатку дорівнює 0, а поступове вирівнювання векторів вздовж однієї траєкторії виражається в тому, що прикладений кут α_n зменшується і косинус наближається до 1.

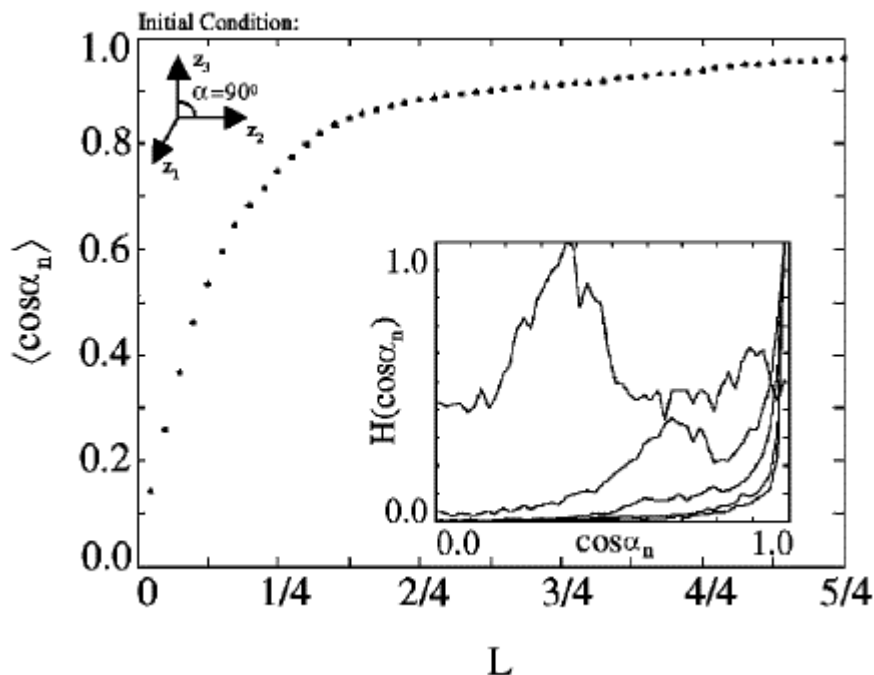


Рис. 2.3 Середнє значення $\cos \alpha_n$ наближається до 1, коли початково ортогональні вектори стають все більш вирівняними. α являє собою кут, утворений двома векторами. Вставка: Функція щільності ймовірності $\cos \alpha_n$ у змішувачі для однієї десятої від загального середнього часу перебування

Переорієнтація та швидке вирівнювання векторів показує, як потоки рідини в певному місці мають тенденцію орієнтуватися вздовж заданого напрямку. Багато наборів з трьох векторів було розсіяно на вході в змішувач, і на послідовних відстанях вниз за течією записувався замкнутий кут між компонентами кожного набору. Середнє значення косинусів ($\cos \alpha_n$), яке відображається на рис. 2.3, починається від 0 на вході і швидко наближається до 1, що вказує на зближення до єдиного напрямку розтягування в кожній просторовій позиції в потоці. Напрямок, до якого адаптуються всі три вектори, є функцією конкретного просторового положення, і він є різним для кожного набору. Оскільки потік є просторово періодичним, поле орієнтацій при заданому фазовому куті є стаціонарною властивістю системи. Перед проходженням потоку через повний елемент змішувача кут між векторними компонентами близький до 0. Це свідчить про сильну спрямованість у всіх просторових точках потоку. Нитки матеріалу, незалежно від їхньої попередньої орієнтації, потрапляють у певне просторове положення в хаотичному потоці, і всі вони приймають локальний напрямок розтягування. Функція густини ймовірності $\cos \alpha_n$ показана на вставці на рис. 2.3. Початковий розподіл є дельта-функцією Дірака з центром в нулі $[\delta(0)]$, оскільки всі набори векторів спочатку мають прямі кути між собою. Кожна крива на графіку є PDF($\cos \alpha_n$) в послідовні одиниці часу в потоці. Важливою особливістю є швидкий зсув розподілу від 0 до 1, що свідчить про зменшення охопленого кута від 90° до 0° .

2.2 Розрахунок швидкості зсуву потоку

Інтенсивність перемішування та контакт між компонентами суміші можна виміряти, обчислюючи зсув малих векторів, прикріплених до трекерів рідини. Для 2D хаотичних течій для поля зсуву можна отримати розв'язки в замкненій формі. Складніше для 3D, де потоки рідини витягуються і стискаються в різних напрямках. Подовження (або розтягнення) малих векторів при їх конвекції потоком обчислюється для 200000 мікроелементів. Чисельними методами розв'язуються рівняння одночасно в усій тривимірній області течії, а потім величина швидкості зсуву обчислюється за допомогою рівняння з додаванням третьої, z , компоненти. Швидкість зсуву на декількох відстанях за течією показано на рис. 2.4. Поперечний переріз змішувача на кожній відстані за течією зображено колами, а елемент змішувача - білою лінією по діаметру. Початкова орієнтація векторів зсуву швидко змінюється, і вони вирівнюються з основним напрямком зсуву потоку в межах першої пари елементів змішувача. Після цього вирівнювання початкова орієнтація векторів вже не має значення.

Накопичене видовження кожного трасеру будується як функція початкового положення і позначається кольором відповідно до величини. Области з високим витягуванням відповідають високій інтенсивності перемішування, де матеріали, що впорскуються в потік, швидко поширюються по області. З іншого боку, області з низьким зсувом відповідають областям з поганим перемішуванням, які повільно обмінюються матеріалом з рештою потоку. Когерентні структури, які з'являються в кожному перерізі змішувача, є відокремленими областями або островами, які руйнуються лише під дією повільної дифузії. Дві такі великі області помітні при цьому режимі течії ($Re = 21,5$), по одній з кожного боку змішувача біля центру труби (рис. 2.4 *d*). Вища швидкість потоку в цьому змішувачі не обов'язково призводить до кращого змішування. Ці відокремлені області існують при $Re = 100$ і охоплюють майже 10% загальної площі потоку. Ці цифри показують, що ці структури з'являються в пристрої при значно менших швидкостях потоку і охоплюють ширший діапазон умов течії, ніж вважалося раніше.

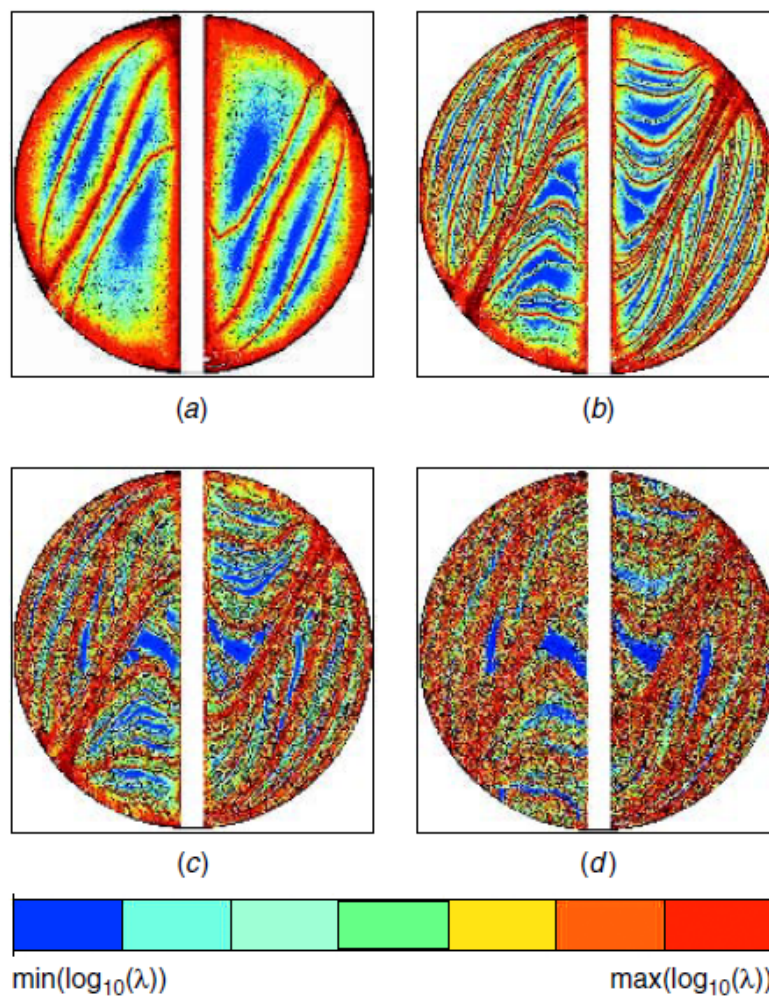


Рис. 2.4 Контури поля зсуву у змішувачі при $Re = 10(10)^{1/3}$. Площини перерізу відповідають осьовим відстаням після (a) 2, (b) 6, (c) 10 і (d) 22 елементів змішувача

Діапазон значень швидкості зсуву відрізняється в кожному перерізі, поступово збільшуючись по мірі проходження потоку через все більшу кількість елементів змішувача. На рисунку 2.4a після двох елементів змішувача мінімальна величина зсуву становить $4,80 \times 10^{-2}$, максимальна – $4,62 \times 10^8$, а середнє арифметичне накопичення зсуву на один трасуючий елемент – $4,84 \times 10^4$. При проходженні рідини через 22 елементи діапазон значно ширший і охоплює 17 порядків з мінімальним значенням $2,41 \times 10^{-1}$, максимальним – $2,01 \times 10^{15}$ і середнім – $1,20 \times 10^{10}$.

Асимптотична спрямованість і самоподібність, причина і наслідок універсальної динамічної поведінки в хаотичних потоках, одразу помітні в кожному наборі з трьох знімків. Деякі особливості структури перемішування з'являються рано, після того, як рідина проходить лише через два елементи змішувача. На наступних зрізах з'являються нові складки в межах існуючих. Загальні риси кожної структури перемішування після 2, 6 або 10 елементів (рис. 2.4 a-c) залишаються такими ж, але на кожному елементі додається більше деталей.

3. Послідовність моделювання у програмі *Comsol* для статичного змішувача

Статичні змішувачі добре зарекомендували себе в широкому спектрі інженерних дисциплін завдяки своїй ефективності, низькій вартості, простоті монтажу та мінімальним вимогам до технічного обслуговування. Оцінюючи, чи можна використовувати змішувач для певної мети, важливо визначити, чи є отримана суміш достатньо однорідною.

Додаток *Comsol* можна використовувати для оцінки ступеня змішування в системі, що включає від однієї до п'яти спіральних лопатей, розміри яких також можуть бути різноманітними.

Ми можемо спочатку розрахувати траєкторії руху частинок у змішувачі. Потім, використовуючи вбудовані інструменти постобробки, ми можемо кількісно і якісно оцінити роботу змішувача.

3.1 Опис моделі

Модель імітує перемішування рідини і твердої фази яка розчиняється у воді при кімнатній температурі. Геометрія складається з труби з трьома крученими вставками-лопатями що створюють різнонаправлений рух потоків (рис. 1).

Радіус трубки, R , становить 5 мм; довжина – $14R$, а довжина кожної вставки – $3R$. Вхідний потік ламінарний із середньою швидкістю 10 мм/с. На виході труби постійний опорний тиск 0 Па.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Доломакін Ю.Ю.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>		
<i>Власник документа</i> НУХТ, 0Ф-2-6м	<i>Розробник документа</i> Ніколаєнко Е.М.	<i>Назва, додаткова назва</i> Послідовність моделювання	210760.KP.01.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 39

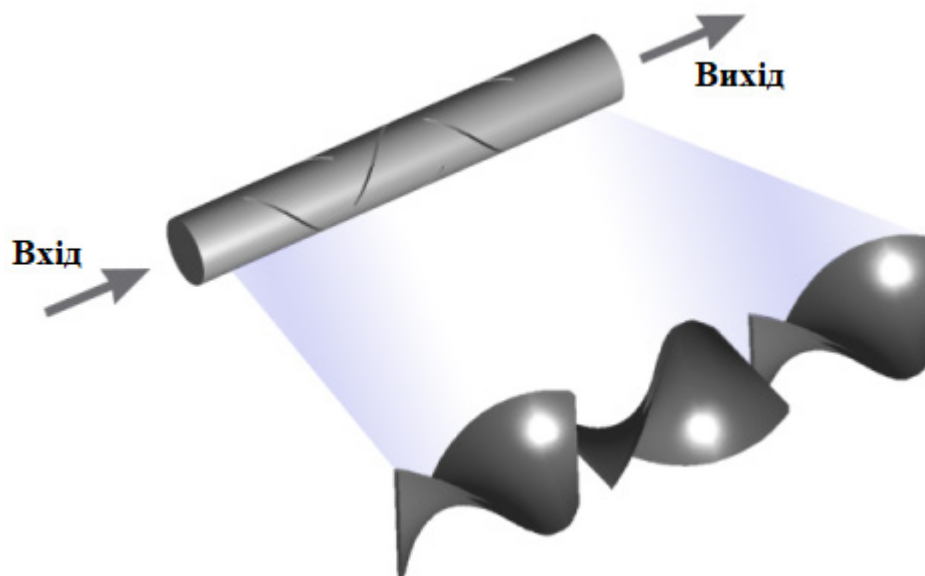


Рис. 1 Зображення ламінарного статичного змішувача, що містить три лопаті з чергуванням обертань

3.2 Фізична модель

Інтерфейс Laminar Flow використовується в *Comsol* і вирішує рівняння Нав'є-Стокса:

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] \\ \rho(\nabla \cdot \mathbf{u}) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Тут μ позначає динамічну в'язкість (одиниця СІ: кг/(м·с)), \mathbf{u} – швидкість, м/с, ρ - щільність рідини, кг/м³), а p – тиск, Па. Ці властивості потоку рідини не впливають на будь-яку зміну концентрації розчиненого виду і імпортуються з Бібліотеки матеріалів.

Перенос речовин, який визначається в розділі Transport of Diluted Species «Транспорт розчинених речовин», складається з конвекції та дифузії. На виході використовується вузол Outflow boundary для призначення зникаючої дифузії в нормальному напрямку. На вході застосовується ступінчаста зміна концентрації за допомогою вхідного вузла. Концентрація на вході визначається як:

$$c_{\text{ex}} = \begin{cases} 0 & x < -\frac{\delta}{2} \\ c_0 & x \geq \frac{\delta}{2} \end{cases} \quad (2)$$

Концентрація плавно змінюється в невеликій перехідній зоні $\delta = 0,3$ мм. Через різкий градієнт концентрації і включення конвекції необхідна дрібна сітка, щоб уникнути осциляцій поля концентрації. Число Рейнольдса в змішувачі, виходячи з середньої швидкості і діаметра труби, становить близько 60. Це вказує на те, що потік є ламінарним і потік рідини (рівняння 1) не вимагає особливо щільної сітки біля стінок. Число Пекле для масопереносу, з іншого боку, є значно вищим.

$$Pe = \frac{ud_p}{D} = 1200$$

Це означає, що градієнт концентрації буде тоншим, ніж зсувні шари в потоці. Отже, для масопереносу потрібна вища роздільна здатність, ніж для потоку рідини. Оскільки концентрація не впливає на потік рідини, можна спочатку розв'язати рівняння Нав'є-Стокса на грубій сітці, а потім перенести розв'язок на дрібнішу сітку і розв'язати задачу масопереносу. У цій моделі роздільна здатність ще більше підвищується за рахунок використання елементів другого порядку для концентрації речовини.

Рух дрібних частинок у рідині регулюється другим законом Ньютона:

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \mathbf{v}$$

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}) = \mathbf{F}_t$$

де \mathbf{q} - позиція частинки, \mathbf{v} - швидкість частинки, м/с, m_p - маса частинки, кг, і \mathbf{F}_t - повна сила, Н.

Це рівняння можна розв'язати за допомогою набору рівнянь другого порядку для компонент вектору положення або двох наборів зв'язаних рівнянь першого порядку для компонент положення і швидкості. Однак у нашому розрахунку використовується спрощене припущення для розв'язання одного набору рівнянь першого порядку.

У нас в повній силі домінує сила опору F_D . Оскільки частинки дуже малі і швидкість частинок відносно рідини не надто велика, застосовується закон опору Стокса:

$$F_D = 3\pi\mu d_p(\mathbf{u} - \mathbf{v})$$

де u - швидкість рідини, м/с; μ - динамічна в'язкість рідини, Па с і d_p - діаметр частинок, м.

У нашому моделюванні діаметр частинок становить 0,5 нм, а навколишня рідина має динамічну в'язкість 10^{-3} Па с.

Часовий масштаб прискорення

Характерний масштаб часу для прискорення частинки за рахунок опору Стокса має вигляд:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$$

У цьому моделюванні густина частинок становить $\rho_p = 2200$ кг/м³. Таким чином, характерний часовий масштаб, який іноді називають часом відгуку швидкості частинок або часовим масштабом Лагранжа, становить близько $\tau_p = 30$ нс. Для порівняння, найшвидші частинки в цій моделі досягають вихідного отвору приблизно за 2 с. Крім того, час, коли дана частинка може зіткнутися зі значним градієнтом швидкості рідини, не відомий апріорі, і цей час, ймовірно, буде різним для всіх частинок. Таким чином, для повного розрахунку прискорення частинок у неоднорідному полі швидкостей знадобилося б близько 100 мільйонів часових кроків. Це був би дуже трудомісткий спосіб моделювання такого простого потоку частинок.

Менш витратний на обчислення підхід полягає у використанні формули першого порядку, яка називається ньютонівською, що ігнорує інерційні члени в інтерфейсі Particle Tracing for Fluid Flow. У цьому формулюванні швидкість частинки задається на кожному часовому кроці таким чином, щоб сила на кожную частинку дорівнювала нулю. У нашому випадку єдиною силою на кожную частинку є сила опору, тому швидкість частинки автоматично визначається таким чином, що $F_D = 0$. Це відновлює

тривіальний розв'язок для частинок-трасувальників, які слідуєть за потоком рідини, $u = v$.

Якщо модель розширити для включення інших сил, таких як гравітація, електромагнітні або термофоретичні сили, то ця формула призначить швидкість частинки таким чином, що сила опору на кожну частинку буде повністю врівноважена іншими прикладеними силами.

Загальною мірою для оцінки просторової однорідності частинок є показник дисперсії, який визначається як відношення дисперсії до середнього значення:

$$D = \frac{\sigma^2}{\mu}$$

Середнє значення та дисперсія обчислюються шляхом розбиття випускного отвору на ряд областей, або квадратів, рівної площі. Оскільки вихідний отвір круглий, його можна розбити на кільцеві області рівної площі N_r , накресливши концентричні кола з радіусами:

$$r_i = \sqrt{\frac{i}{N_r}} \quad \text{де } i = 1, 2, 3 \dots N_r - 1$$

Кільцеві області можна розділити на домени рівної площі N_ϕ , накресливши діаметри під кутами:

$$\phi_j = \frac{2\pi j}{N_\phi} \quad \text{де } j = 0, 1, 2 \dots N_\phi - 1$$

В результаті ділення утворюються квадрати однакової площі $N_q = N_r N_\phi$. Позначимо x_i кількість частинок в i -му квадраті, тоді середня кількість частинок у кожному квадраті дорівнює

$$\bar{x} = \frac{1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} x_i$$

Дисперсія кількості частинок у квадраті становить

$$\sigma = \frac{1}{N_q} \sum_{i=1}^{N_q} (x_i - \bar{x})^2$$

Загалом, зменшення індексу дисперсії відповідає покращенню рівномірності розподілу частинок. З параметрами за замовчуванням в додатку індекс дисперсності становить приблизно 900 при використанні трьох гвинтових вставок лопатей, 1200 при використанні двох лопатей і 1400 при використанні тільки однієї лопаті. Таким чином, індекс дисперсності кількісно показує те, що ми бачимо, дивлячись на графіки: що більша кількість змішувальних лопатей виробляє більш рівномірну суміш.

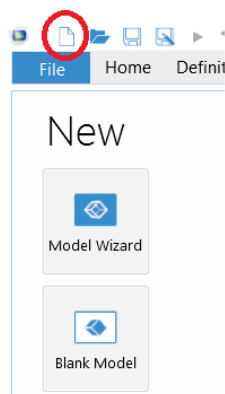
ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ

У ТАБЛИЦІ НАВЕДЕНІ ГЕОМЕТРИЧНІ, КІНЕМАТИЧНІ ТА СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ.


Ім'я	Вираз	Величина	Опис
th_bl_i	1,0[mm]	0,001 м	Товщина леза
l_bl_i	24[mm]	0,024 м	Довжина леза
r_mx_i	5,0[mm]	0,005 м	Радіус змішувача
n_bl	5	5	кількість лез
il_mx	12[mm]	0,012 м	Довжина входу змішувача
ol_mx	18[mm]	0,018 м	Довжина виходу змішувача
l_mx	$n_bl * l_bl_i + il_mx + ol_mx$	0,15 м	Довжина змішувача
rho_l	1.0e3[kg/m ³]	1000 кг/м ³	щільність рідини
visc_l	1.0e-2[Pa*s]	0,01 Па·с	в'язкість рідини
u_av	5,0[cm/s]	0,05 см/с	Середня швидкість
c_in	1.0[mol/m ³]	1 моль/м ³	Вхідна концентрація
D1	1.0e-10[m ² /s]	1×10 ⁻¹⁰ м ² /с	дифузія

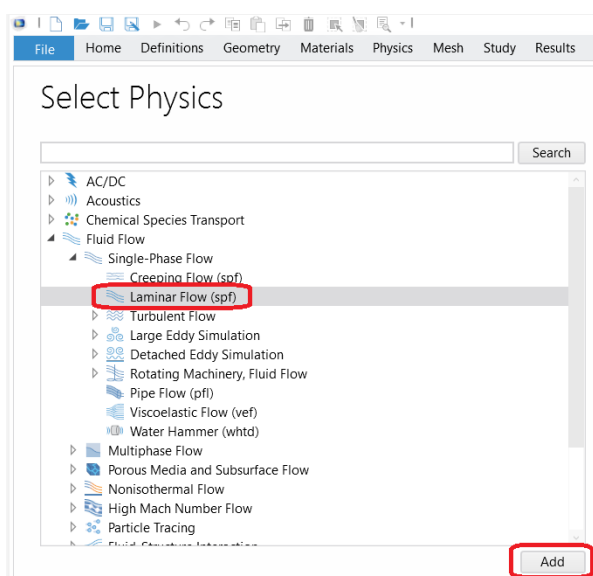
3.3 Послідовність дій по моделюванню



У меню "Файл" вибираємо  **Створити**.



У вікні Створення обираємо пункт  **Model Wizard**.

1. У вікні **Model Wizard** натискаємо кнопку  **3D**.
2. У дереві **Select Physics** обираємо **Fluid Flow > Single-Phase Flow > Laminar Flow (spf)**.
3. Натискаємо **Add** (додати).
4. У дереві **Select Physics** вибираємо **Chemical Species Transport > Transport of Diluted Species (tds)**.



5. Натискаємо **Add**.
6. Натискаємо кнопку  **Study** (дослідження).
7. У дереві **Select Study** обираємо **General Studies > Stationary**.
8. Натискаємо  **Готово**.

Глобальні параметри моделі


Параметри 1

1. У вікні **Model Builder** у розділі **Global Definitions** вибираємо пункт **Parameters 1**.
2. У вікні «**Параметри**» знаходимо розділ «**Параметри**».
3. Натискаємо кнопку  **Завантажити з файлу**.
4. Переходимо до папки Бібліотек додатків моделі та двічі клацаємо файл `laminar_static_mixer_parameters.txt` у якому знаходиться інформація:

```
Ra 3[mm] Tube radius  
u_av 10[mm/s] Mean inlet velocity  
c0 5[mol/m^3] Inlet concentration  
D 5e-8[m^2/s] Diffusion coefficient
```

Функція **Step** потрібна для створення ступінчастої зміни концентрації на вході змішувача.

Крок 1 (крок1)

1. На панелі інструментів клацаємо  **Functions** та вибираємо **Global > Step**.
2. У вікні **Settings** для **Step** знайдіть розділ **Parameters**.
3. У текстовому полі **To** вводимо 5.
4. Клацаємо, щоб розгорнути розділ **Smoothing** (згладжування). У текстовому полі **Size of transition zone** вводимо число $3e-4$ (3×10^{-4}).

Експортування геометрії

Щоб спростити цей крок, завантажуюємо підготовлену геометрію. На панелі інструментів **Geometry** натискаємо кнопку **Insert Sequence**. Переходимо до папки бібліотек програм моделі та двічі клацаємо файл `laminar_static_mixer.mph`. Потім натискаємо кнопку **Build All** на панелі інструментів **Geometry**.

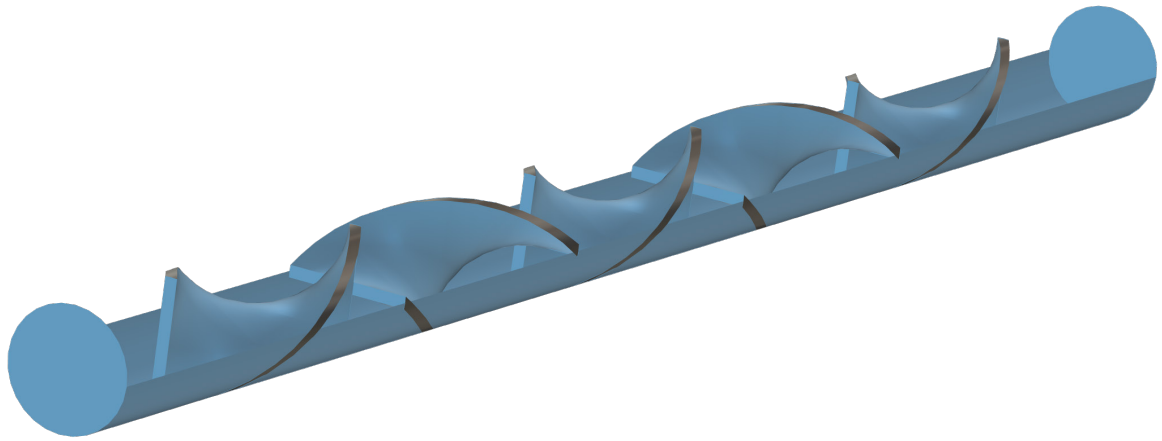


Рис. 2 Геометрія

Геометрична статистика

Параметр	Значення
Просторова розмірність	3
Кількість доменів	2
Кількість меж	145
Кількість ребер	375
Кількість вершин	224

ГЕОМЕТРІЯ ОКРЕМИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Елемент гвинтової вставки

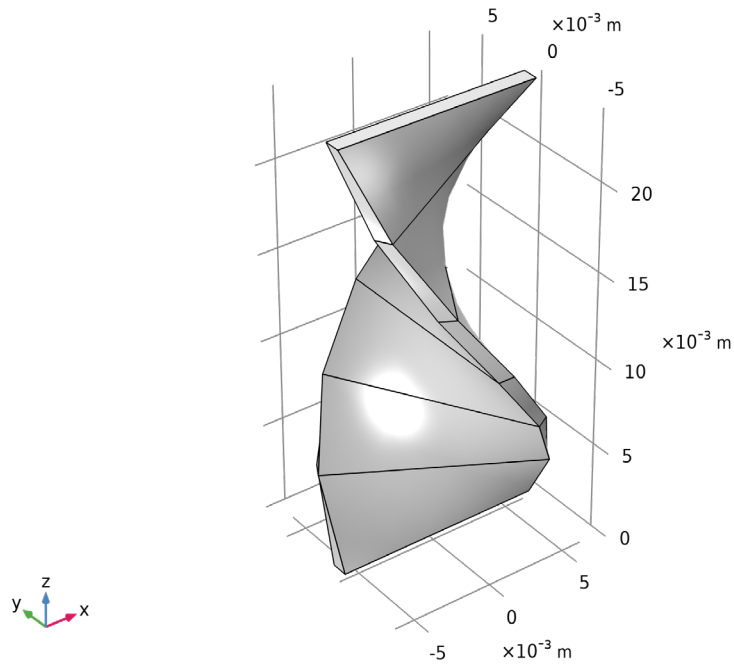


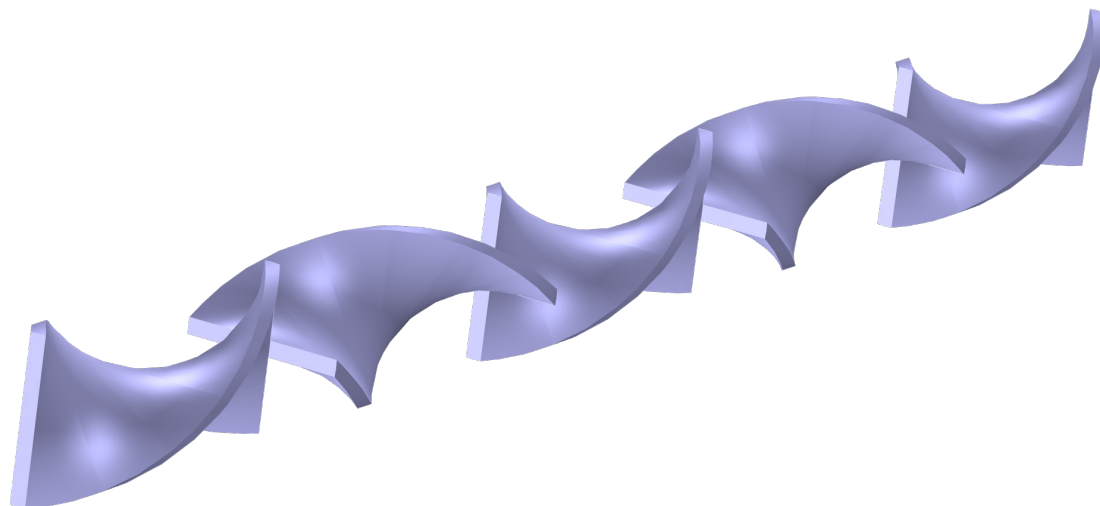
Рис. 3 Леза

Геометрична статистика



Ім'я	Вираз	Значення	Опис
th_bl	1[мм]	0,001 м	Товщина леза
l_bl	24[мм]	0,024 м	Довжина леза
r_mx	5[мм]	0,005 м	Радіус змішувача

Розміри леза

Ім'я	Вираз	Значення
w_bl	2,5*r_mx	0,0125 м
sl_bl	l_bl/6	0,004 м
an_bl	30[deg]	30°



Додавання матеріалу

1. На панелі інструментів **Home** натискаємо кнопку  **Додати матеріал**, щоб відкрити вікно **Додавання матеріалу**.
2. Переходимо у вікно **Додавання матеріалу**.
3. У дереві обираємо **Built-in > Water, liquid**.
4. Натискаємо кнопку **Add to Component** на панелі інструментів.
5. На панелі інструментів **Home** натискаємо кнопку , щоб закрити вікно **Додавання матеріалу**.

Матеріали

Вода, рідина (mat1)

Перший доданий вами матеріал за замовчуванням відноситься до всіх доменів, тому ніяких налаштувань міняти не потрібно.

В інтерфейсі **Laminar Flow** встановіть граничні умови **Inlet**(входу) та **outlet**(виходу) разом з початковими значеннями.

Ламінарний потік (spf)

Вхідний отвір 1

1. У вікні **Model Builder** у розділі **Component 1 (comp1)** клацаємо правою кнопкою миші пункт **Laminar Flow (spf)** і виберіть пункт **Inlet**.
2. Обираємо лише межу 20.

3. У вікні **Settings** для **Inlet** знаходимо розділ **Boundary Condition**.

4. Зі списку вибираємо **Fully developed flow**.

5. Знаходимо секцію **Fully Developed Flow**. У текстовому полі U_{av} введіть u_{av} .

Це дає параболічний профіль швидкості входу, відповідний для повністю розвиненого ламінарного потоку, із середньою швидкістю u_{av} .

Розетка 1

1. На панелі інструментів **Physics** натискаємо  **Boundaries** та вибираємо **Outlet**.

2. Вибераємо лише межу 23.

Застосовують квадратичні базисні функції для концентрації для подальшого збільшення роздільної здатності.

Transport of diluted species Транспортування розбавлених речовин (tds)

1. У вікні **Model Builder** у розділі **Component 1 (comp1)** виберіть пункт **Transport of Diluted Species (tds)**.

2. У вікні **Settings** для **Transport of Diluted Species** клацаємо, щоб розгорнути розділ **Discretization**.

3. У списку **Concentration** вибираємо **Quadratic**.

В інтерфейсі **Transport of Diluted Species** застосовуйте граничні умови входу і виходу разом з початковими значеннями. Швидкість від інтерфейсу **Laminar Flow** автоматично застосовується для конвективного транспорту за допомогою функції мультифізики **Reacting Flow, Diluted Species** мультифізика».


Транспортні параметри 1

1. У вікні конструктор моделей у розділі **Component 1 (comp1) > Transport of Diluted Species (tds)** виберіть пункт **Transport Properties 1**.

2. У вікні **Settings** для **Transport Properties** знаходимо розділ **Diffusion**.

3. У текстовому полі D_c вводимо D .

Приток 1

1. На панелі інструментів **Physics** натискаємо кнопку  **Boundaries** та вибираємо **Inflow**.

На вході використовуєте функцію **Step**, щоб ввести різкий, але безперервний крок концентрації.

2. У вікні **Settings** для **Inflow** знаходимо розділ **Concentration**.

3. У текстовому полі $c_{0,c}$ вводимо $\text{step1}(x[1/\text{mm}])$.

4. Виберіть "Лише межа 20".

Відмік 1


1. На панелі інструментів **Physics** натискаємо  **Boundaries** та вибираємо **Outflow**.

2. Виберіть "Лише межа 23".

Функція **Outflow** передбачає, що потік через вихід регулюється конвекцією.

Мультифізика

Реагуючий потік, розбавлений вид 1 (rfd1)

На панелі інструментів **Physics** клацніть  **Багатофізичні зв'язки** та виберіть **Domain>Reacting Flow, Diluted Species**.

Створення сітки

Потрібні дві сітки: груба для інтерфейсу **Laminar Flow** та дрібніша для інтерфейсу **Transport of Diluted Species**.

Сітка 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Компонент 1 (comp1)** клацаємо елемент **Сітка 1**.

2. У вікні "**Параметри сітки**" знайдіть розділ "**Сітка з фізичним керуванням**".

3. У списку **Розмір елемента** вибираємо елемент **Надгрубий**.

4. Натискаємо кнопку  **Build All** Побудувати все.


Сітка 2

На панелі інструментів **Mesh** натискаємо кнопку "Додати сітку" та вибираємо "Додати сітку".

Вільний чотиригранний 1

На панелі інструментів Сітка вибираємо пункт **Вільний чотиригранний** .

Розмір

1. У вікні "**Параметри розміру**" знайдіть розділ "**Розмір елемента**".
2. Натискаємо кнопку **Настроюваний**.
3. Знайдіть розділ **Параметри розміру елемента**. У текстовому полі **Максимальний розмір елемента** введіть 0,65.
4. У текстовому полі **Мінімальний розмір елемента** вводимо 0,35.
5. Натисніть кнопку  **Побудувати все**.

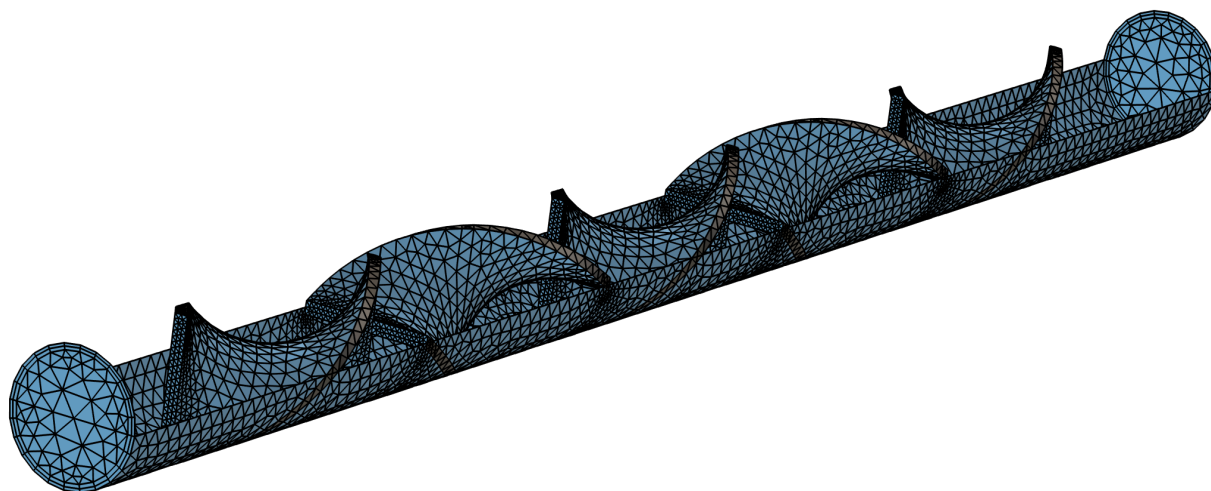


Рис. 4 Згенерована сітка

Опис	Величина
Сітчасті вершини	38777
Тетраедри	103035
Піраміди	2152
Призми	32236
Кількість елементів	137423
Мінімальна якість елемента	0.06082


Опис	Величина
Середня якість елемента	0.6439
Співвідношення обсягу елемента	4.2983×10^{-4}
обсяг сітки	$1,053 \times 10^{-5} \text{ м}^3$

Обчислювання

Розв'язок задачі виконується у два стаціонарних кроки. Спочатку обчислюється ламінарна течія за допомогою сітки 1. По-друге, за допомогою **Mesh 2**(сітки 2) розраховується перенесення розчинених речовин.

Навчання 1


Стаціонарний 2

На панелі інструментів **Study** натисніть кнопку  **Етапи дослідження** та виберіть пункт **Стаціонарний>Стаціонарний**.

Крок 1: Стаціонарний

1. У вікні **Конструктор моделей** виберіть пункт **Крок 1: Стаціонарний**.
2. У вікні "**Налаштування стаціонарних**" знайдіть розділ "**Фізика та змінні**".
3. У таблиці знімаємо прапорець **Вирішити для пункту Транспорт розведених видів (tds)**.

Крок 2: Стаціонарний 2

1. У вікні **Конструктор моделей** виберіть пункт **Крок 2: Стаціонарний 2**.
2. У вікні "**Налаштування стаціонарних**" знаходимо розділ "**Фізика та змінні**".
3. У таблиці знімаємо прапорець **Вирішувати для ламінарного потоку (spf)**.
4. На панелі інструментів Дослідження натискаємо кнопку 

Обчислити.

Результати

Щоб відтворити рис. 5, який використовує графік зрізу для візуалізації концентрації в змішувачі, виконаємо наступні дії.

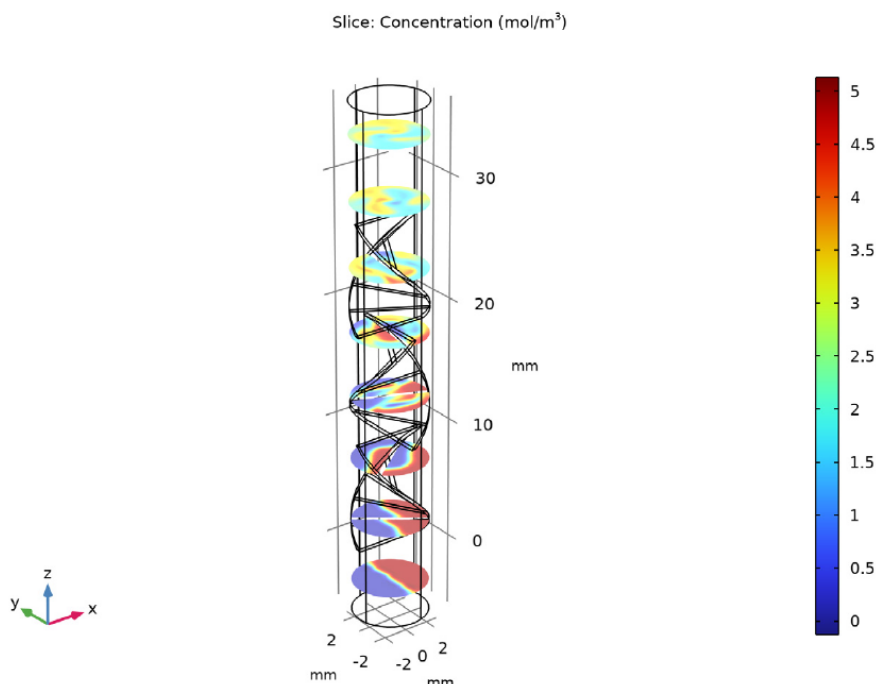




Рис. 5 Концентрація, мол/м³


1. На панелі інструментів «**Основне**» натисніть кнопку  «**Додати групу графіки**» та виберіть «**Група 3D-графіків**».
2. У вікні "**Параметри**" для групи **3D-графіків** введіть "**Концентрація**", "**Фрагмент**" у текстовому полі "**Мітка**".

Фрагмент 1

1. Клацніть правою кнопкою миші «**Концентрація**», «**Фрагмент**» і виберіть «**Фрагмент**».
2. У вікні **Налаштування** фрагмента натискаємо кнопку **Замінити вираз** у верхньому правому куті розділу **Вираз**. У меню вибираємо **компонент 1 (comp1)>Транспорт розведених видів>Види c>c - Концентрація - моль/м³**.
3. Знаходимо розділ "**Дані площини**". У списку **Площина** вибираємо **ху-площину**.
4. У текстовому полі "**Площини**" введіть **8**.
5. Натискаємо піктограму  "**Масштаб масштабування**" на панелі інструментів "**Графіка**".

Так як для концентрації застосовували квадратичні елементи, то дозвіл ділянки можна збільшити.

6. Клацаємо, щоб розгорнути розділ **Якість**. У списку **Роздільна здатність** вибираємо пункт **Finer "Виправлення"**.

7. На панелі інструментів **"Концентрація"**, **"Фрагмент"** натискаємо кнопку  **Побудова**.

Швидкість (spf)

Щоб створити рис. 6, на якому відображається поле швидкості, виконаємо наступні дії.

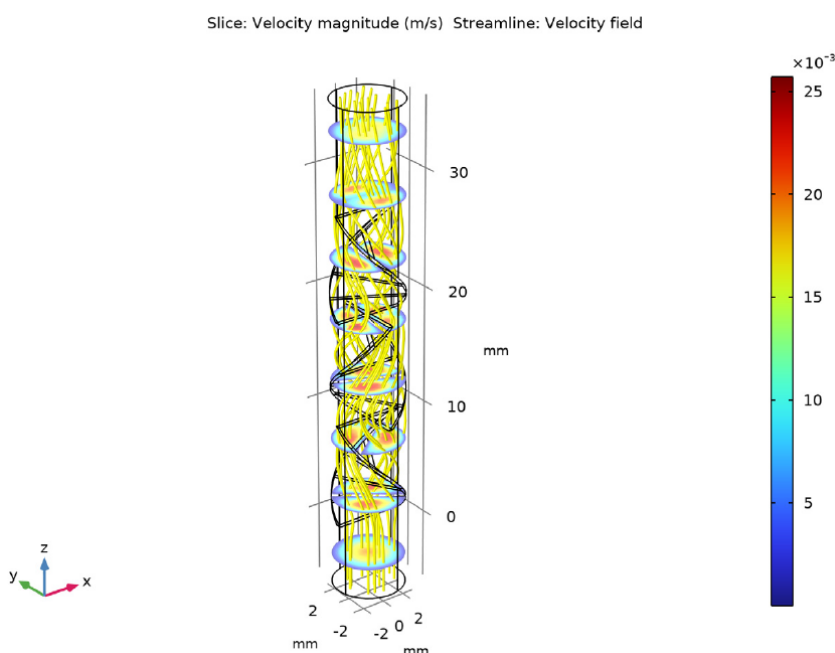


Рис. 6 Вектори швидкості, м/с

1. У вікні **Конструктор моделей** розгорніть вузол **Результати>Швидкість (SPF)**.

2. Клацаємо правою кнопкою миші **Velocity (spf)** і обираємо «**Streamline**».

Фрагмент

1. У вікні **"Параметри фрагмента"** знаходимо розділ **"Дані площини"**.

2. У списку **Площина** вибираємо **xy-площину**.

3. У текстовому полі **"Площини"** вводимо 8.

Streamline 1

1. У вікні **Конструктор моделей** натисніть кнопку **Streamline 1**.
2. У вікні **Настройки** для параметра **Streamline** знайдіть розділ **Розташування оптимізації**.
3. У списку **Розташування** обираємо елемент **Магнітуда керована**.
4. У текстовому полі «**Мінімальна відстань**» вводимо 0,025.
5. У текстовому полі **Максимальна відстань** вводимо 0,1.
6. Знаходимо розділ "**Розмальовки та стилі**". Знаходимо підрозділ "**Стиль лінії**". У списку **Тип** обираємо пункт **Tube**.
7. У текстовому полі виразу **Tube radius** вводимо 0,05.
8. Знайдіть підрозділ "**Стиль точки**". У списку **Колір** виберіть елемент **Жовтий**.

Нарешті, відтворити ряд графіків поперечної концентрації для різних z-координат, показаних на рис. 7, з наступними кроками.

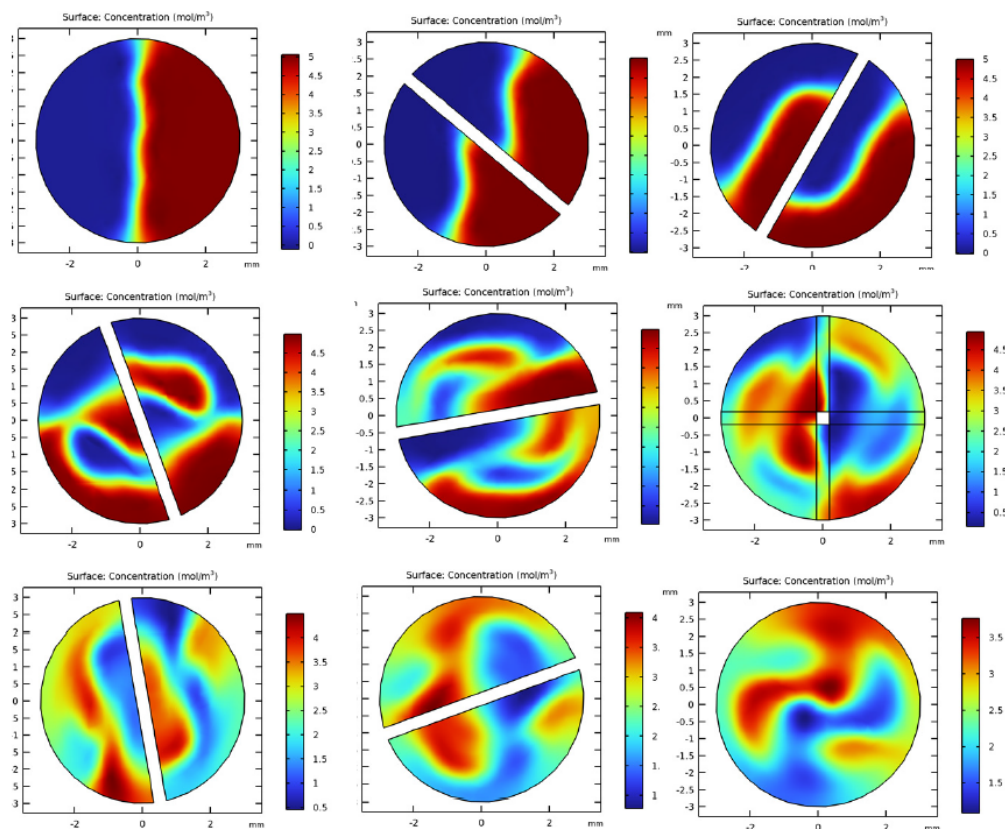


Рис. 7 Поперечні графіки концентрації на різних відстанях від вхідного отвору. Дев'ять графіків показують концентрацію при $z = -2$ мм до $z = 30$ мм з кроком 4 мм

Площина розрізу 1


1. На панелі інструментів **Результати** натискаємо кнопку  **Вирізати площину**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знаходимо розділ "**Дані площини**".

3. У списку **Площина** вибираємо **ху-площину**.

4. У текстовому полі **z-координат** вводимо **-2**.

Ділянка концентрації поперечного перерізу

1 На панелі інструментів «**Результати**» виберіть пункт  **Група 2D-графіків**.

2. У вікні "**Параметри групи 2D-діаграми**" введіть "**Діаграма концентрації поперечного перерізу**" в текстовому полі "**Мітка**".

3. Знаходимо розділ **Дані**. У списку **Набору даних** вибираємо "**Вирізати площину 1**".

Поверхня 1


1. Клацаємо правою кнопкою миші **діаграму концентрації поперечного перерізу** та вибираємо команду **Surface**.

2. У вікні **Настройки** для **Surface** натисніть кнопку **Замінити вираз** у верхньому правому куті розділу **Вираз**. У меню виберіть **компонент 1 (comp1)>Транспорт розведених видів>Види c>c - Концентрація - моль/м³**.

3. Знаходимо розділ "**Розмальовки та стилі**". Знімаємо прапорець **Легенда кольору**.

Збільшуємо роздільну здатність також для цієї ділянки.

4. Клацаємо, щоб розгорнути розділ **Якість**. У списку **Роздільна здатність** обираємо пункт **Finer "Виправлення"**.

5. На панелі інструментів **діаграми концентрації поперечного перерізу** натискаємо кнопку  **Побудова**.

Площина розрізу 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Результати>Набору даних** обираємо пункт **Вирізати площину 1**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знайдіть розділ "**Дані площини**".

3. У текстовому полі **z-координат** введіть 2.

Ділянка концентрації поперечного перерізу

Повторюємо ці кроки для z-координати 6, 10, 14, 18, 22, 26 і 30 для відтворення решти перерізів на рис. 7.

Площина розрізу 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Результати>Набору даних** виберіть пункт **Вирізати площину 1**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знайдіть розділ "**Дані площини**".

3. У текстовому полі **z-координат** вводимо 6.

Площина розрізу 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Результати>Набору даних** вибираємо пункт **Вирізати площину 1**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знаходимо розділ "**Дані площини**".

3. У текстовому полі **z-координат** вводимо 10.

Площина розрізу 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Результати>Набору даних** вибираємо пункт **Вирізати площину 1**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знаходимо розділ "**Дані площини**".

3. У текстовому полі **z-координат** введіть 14.

Площина розрізу 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Результати>Набору даних** виберіть пункт **Вирізати площину 1**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знайдіть розділ "**Дані площини**".

3. У текстовому полі **z-координат** введіть 18.

Площина розрізу 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Результати>Набору даних** виберіть пункт **Вирізати площину 1**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знайдіть розділ "**Дані площини**".

3. У текстовому полі **z-координат** введіть 22.

Площина розрізу 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Результати>Набору даних** виберіть пункт **Вирізати площину 1**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знайдіть розділ "**Дані площини**".

3. У текстовому полі **z-координат** вводимо 26.

Площина розрізу 1

1. У вікні **Конструктор моделей** у розділі **Результати>Набору даних** обираємо пункт **Вирізати площину 1**.

2. У вікні "**Параметри**" для параметра "**Вирізати площину**" знаходимо розділ "**Дані площини**".

3. У текстовому полі **z-координат** вводимо 30.

4. Результати моделювання

Модель розв'язується у два етапи. Спочатку розраховуються швидкість і тиск рідини за допомогою стаціонарного кроку дослідження. Потім обчислюються траєкторії частинок за допомогою кроку дослідження в залежності від часу. Розв'язок стаціонарного дослідження використовується для визначення швидкості рідини з метою застосування сили опору до частинок, але присутність частинок не враховується при моделюванні рідини. Це є односпрямованим зв'язком, який діє для розріджених потоків, де об'ємна частка частинок у рідині дуже мала, а імпульсом, що передається рідині частинками, можна знехтувати.

4.1 Швидкість потоку рідини

Поле та вектори швидкостей по довжині змішувача

На рис. 4.1 наведено поле зміни швидкості двофазної суміші у середині змішувача.

Як видно з рисунка 4.1, умова ковзання призводить до того, що тангенціальна швидкість біля стінок відмінна від нуля, при цьому максимальна швидкість в перерізі змішувача на ділянках ковзання менше, ніж на ділянках з умовою прилипання. В результаті в областях, суміжних з ділянками границі, на яких змінюються граничні умови, спостерігається викривлення ліній течії, вихори не утворюються.

Шкала на рис. 4.1 показує розподіл швидкості продукту у змішувачі.

Проаналізуємо отримані результати. Максимальне значення швидкість потоку набуває у середині струмів що розділяються гвинтовими вставками де досягає значення 0,125 м/с. Цей рівень досягається у зоні розташування першої з п'яти гвинтових вставок, що пояснюється меншим гідравлічним опором у цій зоні перемішуємого потоку.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Доломакін Ю.Ю.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>		
<i>Власник документа</i> НУХТ, 0Ф-2-6м	<i>Розробник документа</i> Ніколаєнко Є.М.	<i>Назва, додаткова назва</i> Результати моделювання	210760.KP.01.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 60

Slice: Velocity magnitude (m/s)

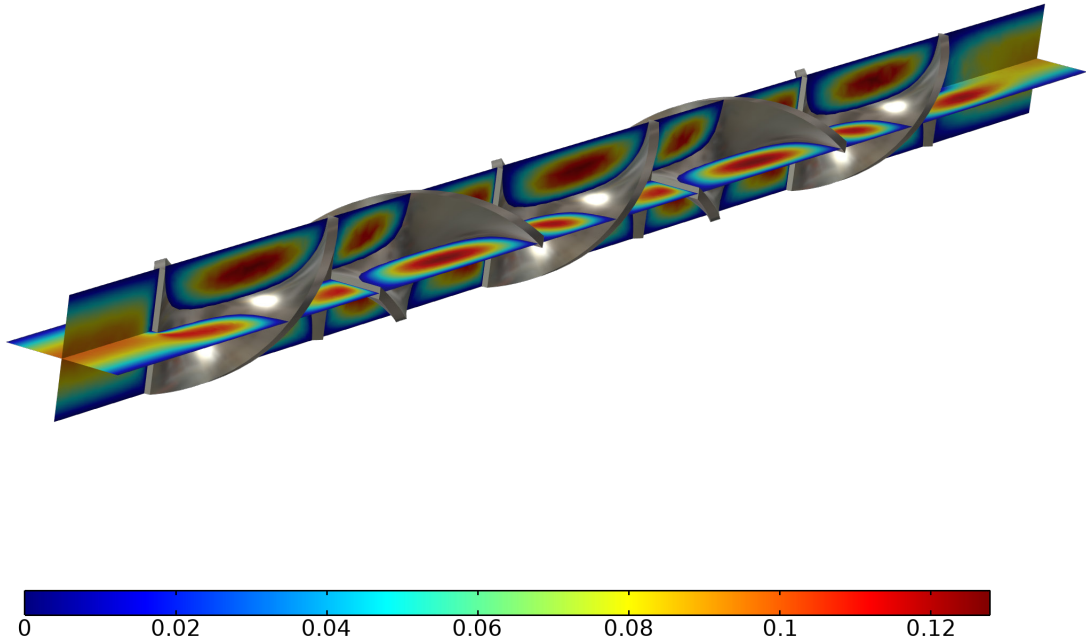


Рис. 4.1 Поле швидкості у вертикальній та горизонтальній площині (м/с)

Відповідно мінімальних значень швидкість набуває біля стінок елементів конструкції змішувача і прямує до значень близьких 0,02 м/с.

Візуально поле швидкості потоку можна представити у вигляді траєкторій ліній швидкості, що представлено на рис. 4.2

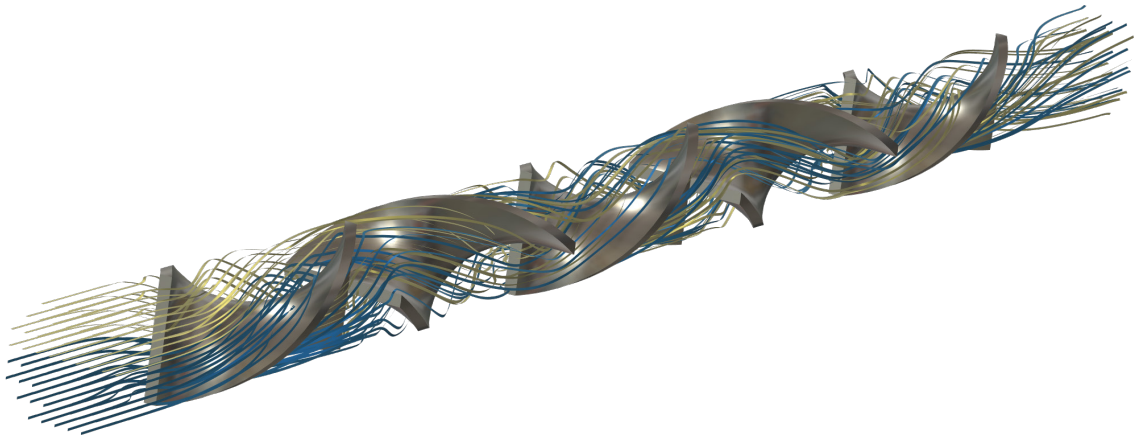


Рис. 4.2 Траєкторії ліній поля швидкості

4.2 Поле зміни тиску потоку у середині змішувача

Подальшим етапом розрахунків є визначення розподілу тиску на поверхні елементів змішувача, та тиску у середині потоку що проходить скрізь його конструкцію.

Результатом є отримане поле тисків зображене на рисунку 4.3.

Contour: Pressure (Pa)

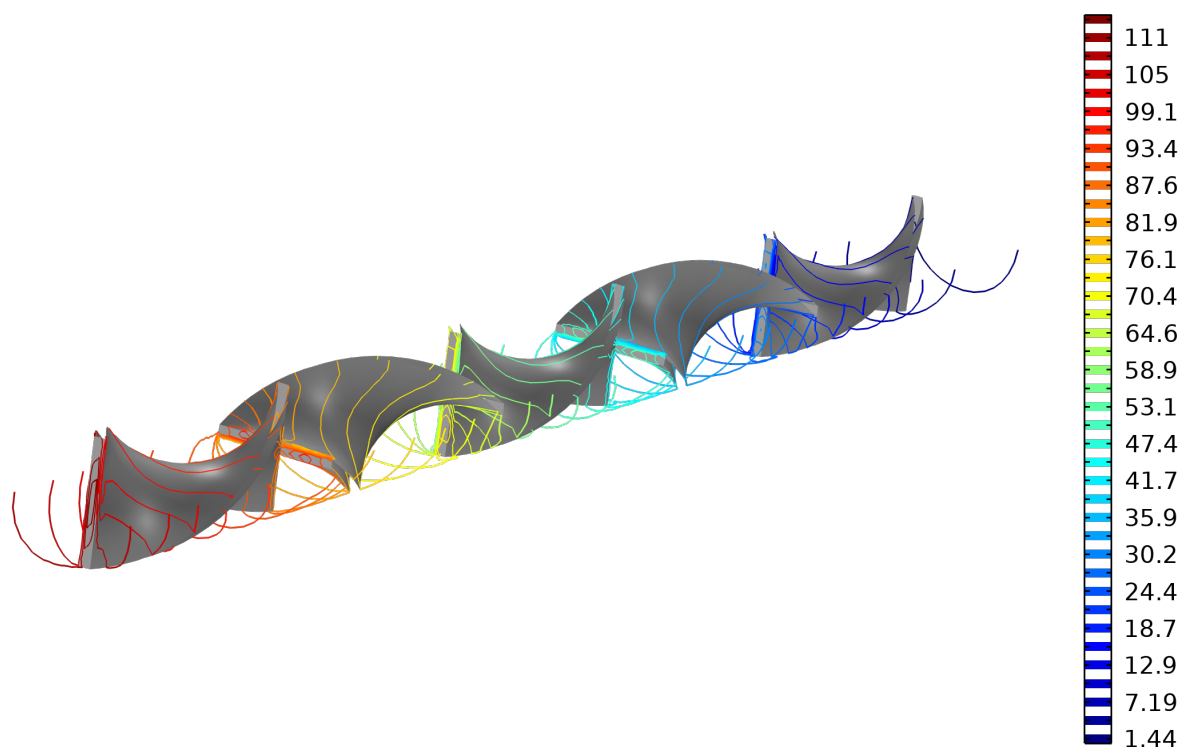


Рис. 4.3. Тиск (напряг руху потоку зліва на право)

Аналіз картини дає зрозуміти нам що найменший тиск буде знаходитись на виході зі змішувача у місці розташування п'ятого гвинтового елемента і знаходиться на рівні біля 20 Па, а так як програмний продукт показує абсолютні значення тиску, маємо зробити висновок що у цій частині змішувача діє тільки значення атмосферного тиску яке як відомо складає 101 кПа.

Тоді як на початку змішувача а саме місці розташування першого гвинтового елемента величина тиску буде знаходитись на найбільшому рівні. У чисельному значенні ця величина досягає 110 Па і зона її дії знаходиться у зоні розташування першого гвинтового елемента (рис. 4.3).

Для більшого розуміння картини розподілу тиску у змішувачі побудовано графік його зміни за допомогою програми *COMSOL* у вигляді напірної лінії що описує цей тиск по його довжині (рис. 4.4).

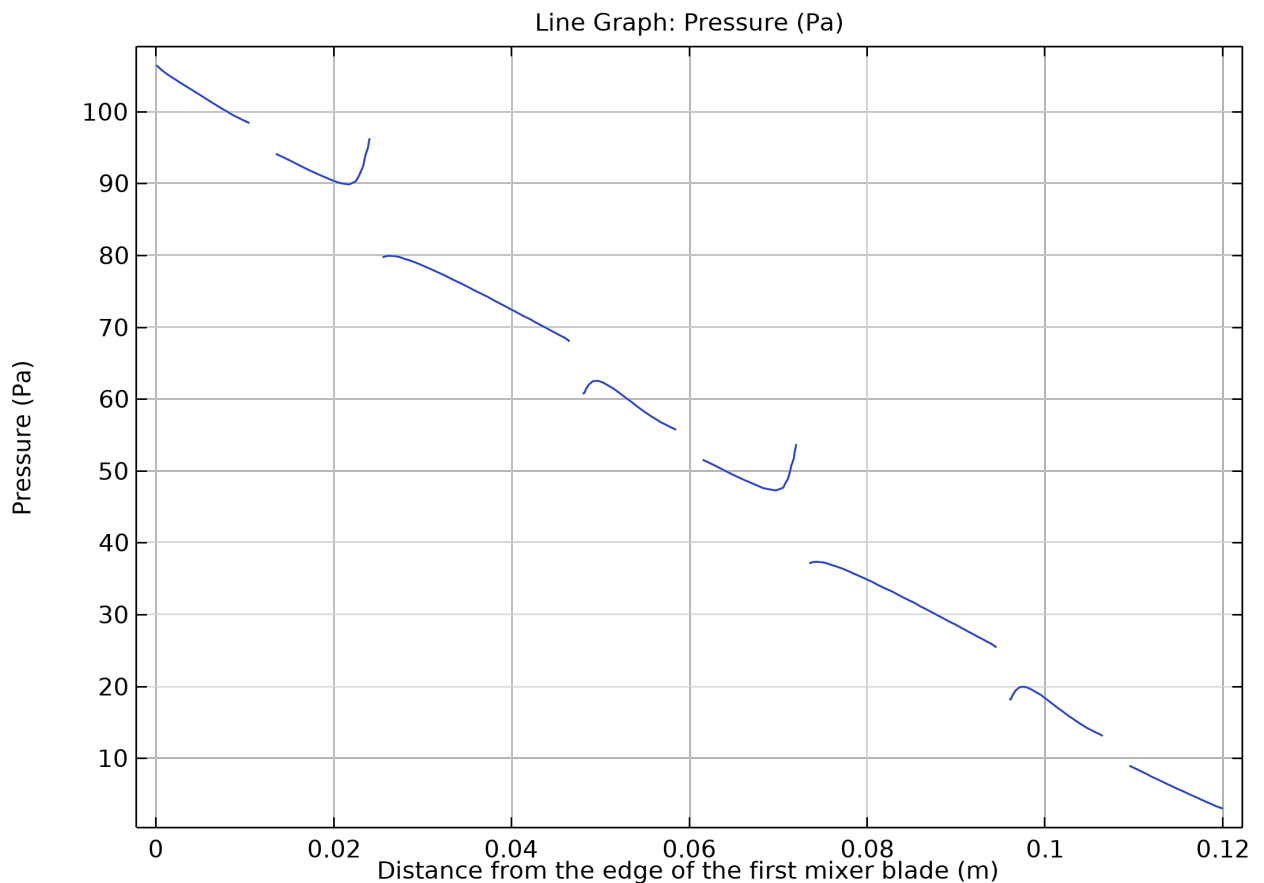


Рис. 4.4 Зміна тиску по довжині змішувача (напірна лінія) (Па)

4.3 Трасування частинок

Певною мірою ми можемо судити про однорідність суміші лише за допомогою спостереження. У імітаційному моделюванні ефективність змішування можна візуалізувати, створивши фазовий портрет положення частинок. На фазовому портреті частинки можуть бути розташовані в довільному 2D фазовому просторі - тобто, вони можуть бути розташовані на 2D графіку, в якому осями можуть бути вирази, визначені користувачем. Фазові портрети, наприклад, часто використовують для побудови графіків залежності положення частинки від імпульсу в певному напрямку, тобто розподілу у фазовому просторі.

Маємо наступні припущення щодо реалізації моделювання трасування частинок:

- частинки не витісняють рідину в об'ємі, який вони займають;

- взаємодією між частинками моделі нехтуємо, тому відстань між частинками може бути меншою за діаметр частинки;

- при розв'язанні рівнянь руху кожної частинки використовуються координати центру частинки. Вважається, що частинка вдаряється об поверхню (наприклад, об гвинтовий елемент змішувача, зовнішню стінку змішувача або вихідний отвір), коли траєкторія її центру перетинає цю поверхню.

Випускається 3000 частинок. Густина частинок, що викидаються на вхідній границі, пропорційна швидкості рідини на вході. Це означає, що більше частинок викидається в центрі границі, де величина швидкості на вході є найвищою, і менше частинок викидається біля країв, де величина швидкості є низькою.

Траєкторії руху частинок зображено на рисунку 4.5. Колір вздовж траєкторій вказує на загальну швидкість зсуву в даному положенні частинки. Через похибку дискретизації поля швидкості рідини, а також через те, що залежний від часу розв'язувач для обчислення положення частинок використовує дискретні кроки в часі, частинки можуть час від часу потрапляти на одну з лопатей змішувача або на зовнішню межу потоку. Крім того, деякі частинки проходять досить близько до лопатей змішувача, що швидкість рідини стає надзвичайно повільною, тому частинки не досягають виходу навіть до кінцевого часу дослідження.

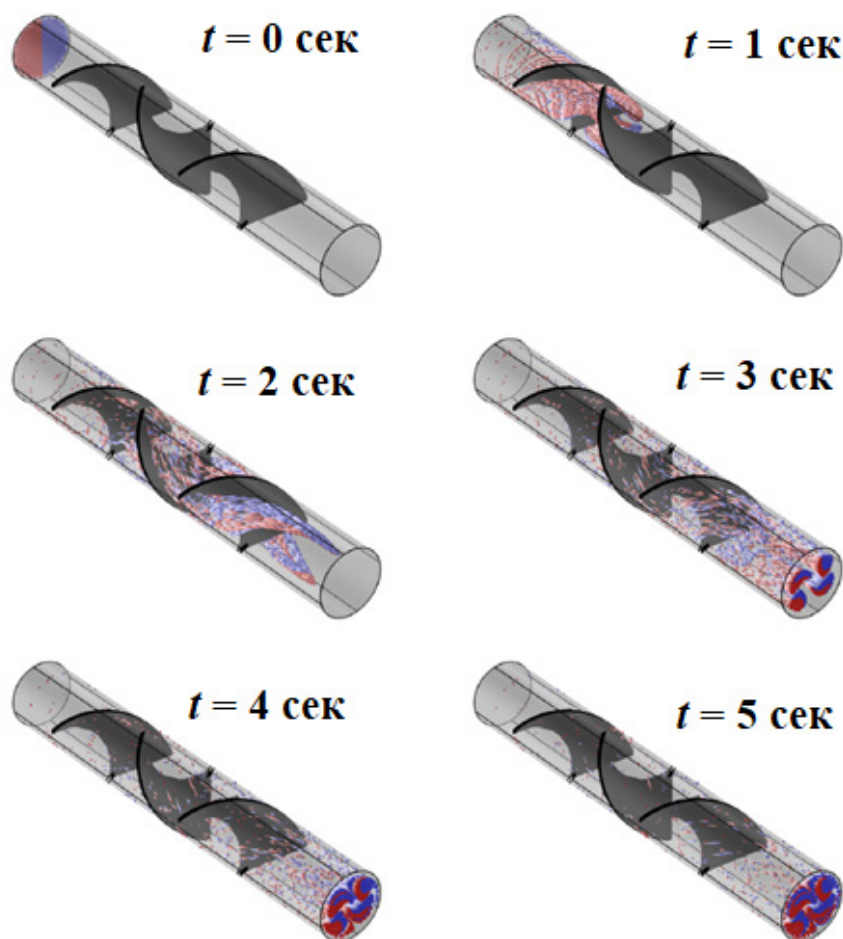


Рис. 4.5 Положення частинок у змішувачі в різні моменти часу розчинення. Хвости комет вказують на швидкість частинок. Частинки забарвлені в червоний колір, якщо вони були випущені з початковим положенням $x < 0$; в іншому випадку вони забарвлені в синій колір

Ймовірність перенесення – це відношення кількості частинок, які досягають вихідного отвору, до загальної кількості випущених частинок. У цьому прикладі ймовірність передачі розраховується за допомогою функції лічильника частинок, яка реєструє кількість частинок, що досягають вихідного отвору, і виражає її як частку від загальної кількості випущених частинок.

Для цієї конкретної конфігурації ймовірність передачі становить близько 0,80. Це означає, що близько 20% частинок залишаються у змішувачі. Якби

дослідження тривало більше 5 секунд, ця ймовірність передачі поступово зростала б.

Досить багато інформації про роботу змішувача можна отримати з фазових портретів і карт Пуанкаре, але більшість з них занадто суб'єктивні для промислового застосування. Людина-спостерігач може приблизно визначити, чи є системи повністю незмішаними, частково змішаними або добре змішаними, але межі між цими визначеннями розмиті і важко піддаються кількісній оцінці. Наприклад, будь-який спостерігач може побачити, що на попередніх зображеннях є ділянки частинок одного кольору, але набагато складніше визначити числове значення для опису того, наскільки добре вони змішані.

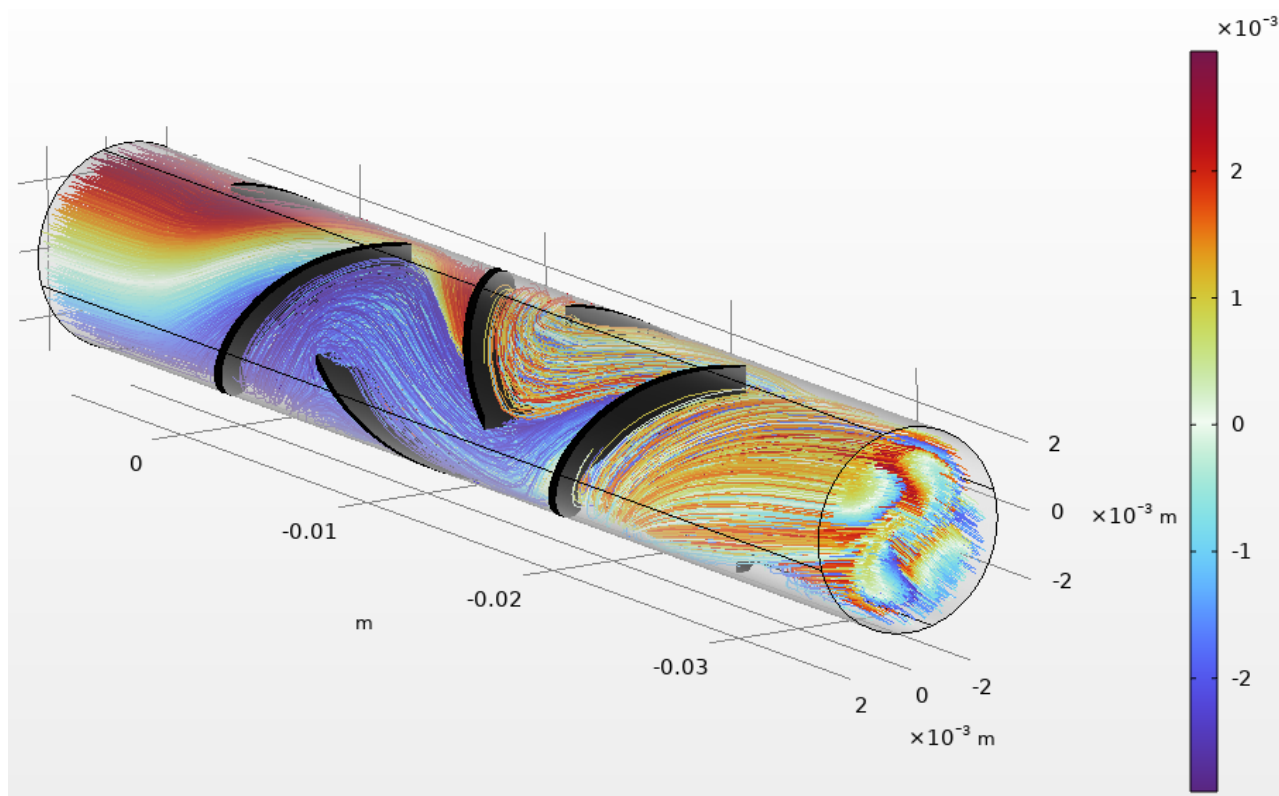


Рис. 4.6 Траєкторій частинок всередині змішувача. Колір - швидкість зсуву

Одним з корисних способів візуалізації того, як змішуються частинки, є використання карти Пуанкаре. Карта Пуанкаре ставить кольорову крапку там, де кожна частинка проходить через січну площину (також відому як

переріз Пуанкаре). Набір даних можна легко використовувати для визначення одного перерізу Пуанкаре або декількох паралельних площин.

На рис. 4.7 показано розташування частинок у 6 перерізах Пуанкаре. Колір відповідає початковому положенню частинки. Частинки червоного кольору мали початкове положення $x < 0$, а частинки синього кольору мали початкове положення $x > 0$. Оператор ат використовується для позначення частинок кольором їх початкового положення. Коли частинки рухаються вниз за течією (у від'ємному напрямку y), вони починають змішуватися.

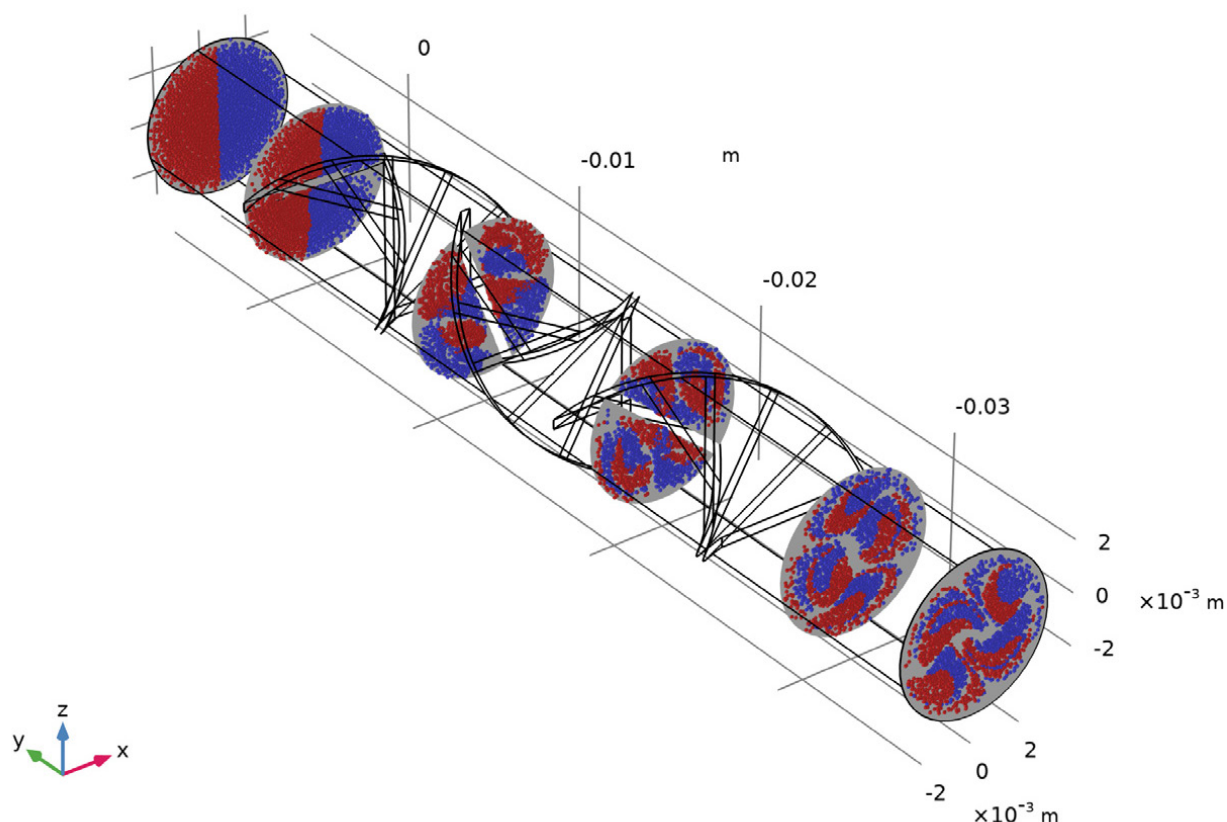


Рис. 4.7 Карти Пуанкаре траєкторій частинок у різних перерізах Пуанкаре.

Колір - це логічний вираз, який вказує, які частинки мали початкове положення при $x < 0$

До кінця роботи змішувача частинки ще не змішалися повністю; все ще залишаються залишаються значні скупчення лише червоних і лише синіх частинок.

Фазовий портрет використовується для спостереження за зміною поперечного положення кожної частинки під час її руху через змішувач. Оскільки труба орієнтована в напрямку вісі y , поперечними напрямками є вісі x і z . Колірний вираз позначає квадрант, який кожна частинка займала в початковий момент часу; тобто, темно-сині частинки виходили з позитивними x - і z -координатами, і так далі.

Фазовий портрет також можна використовувати для візуалізації процесу змішування. Один фазовий портрет дає знімок всіх частинок одночасно, тоді як карта Пуанкаре показує точки перетину частинок з поверхнею, навіть якщо ці перетини відбуваються в різний час. Двом осям на фазовому портреті можна присвоїти будь-які змінні частинки, і їх часто використовують для побудови графіків залежності швидкості або імпульсу від положення. На рис. 4.8 горизонтальна вісь представляє x -координати частинок, а вертикальна вісь – z -координати частинок. Фазові портрети наведено для 6 різних моментів часу розв'язання. У кінцевий момент часу ($t = 5$ с) все ще існують кишені виключно синіх або червоних частинок, що вказує на те, що частинки ще не повністю змішалися.

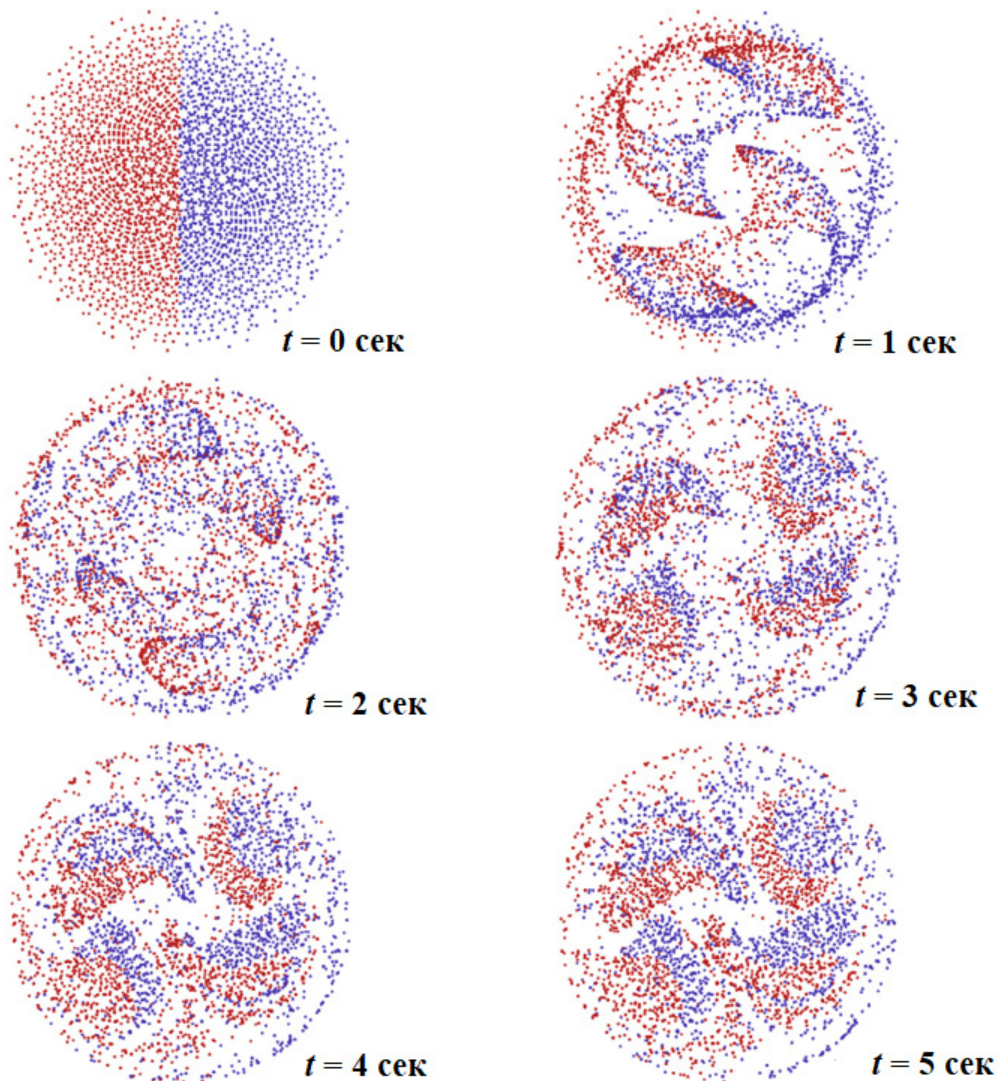


Рис. 4.8: Графік положення частинок у площині xz у різні моменти часу. Червоні частинки мали початкове положення $x < 0$, а сині частинки мали початкове положення $x > 0$

Фазовий портрет якісно показує, що на виході частинки змішуються недосконало. Все ще можна побачити ділянки з більшою або меншою щільністю частинок, а також скупчення частинок одного кольору - частинок, що походять з одного квадранта - які все ще можна побачити.

Одним з потенційних недоліків фазового портрета є те, що він відображає частинки у фазовому просторі в однакові моменти часу, а не з однаковими координатами y . Це може створити дещо оманливе уявлення про роботу змішувача, оскільки деякі частинки можуть рухатися ближче до

гвинтових вставок і, отже, потенційно досягати виходу набагато пізніше, ніж інші частинки.

4.4 Концентрація

На рис. 4.9 представлений зріз ділянки концентрації в змішувачі.

Поле концентрації включається в аналіз для того, щоб компенсувати ступінь змішування між двома потоками, введеними в статичний змішувач через півколоподібні входи.

Зріз внизу показує синю і червону половини рідини з розчиненими речовинами і без них, відповідно. Коли рідина протікає через систему вгору, обидва розчини змішуються, створюючи більш однорідний профіль концентрації на виході.

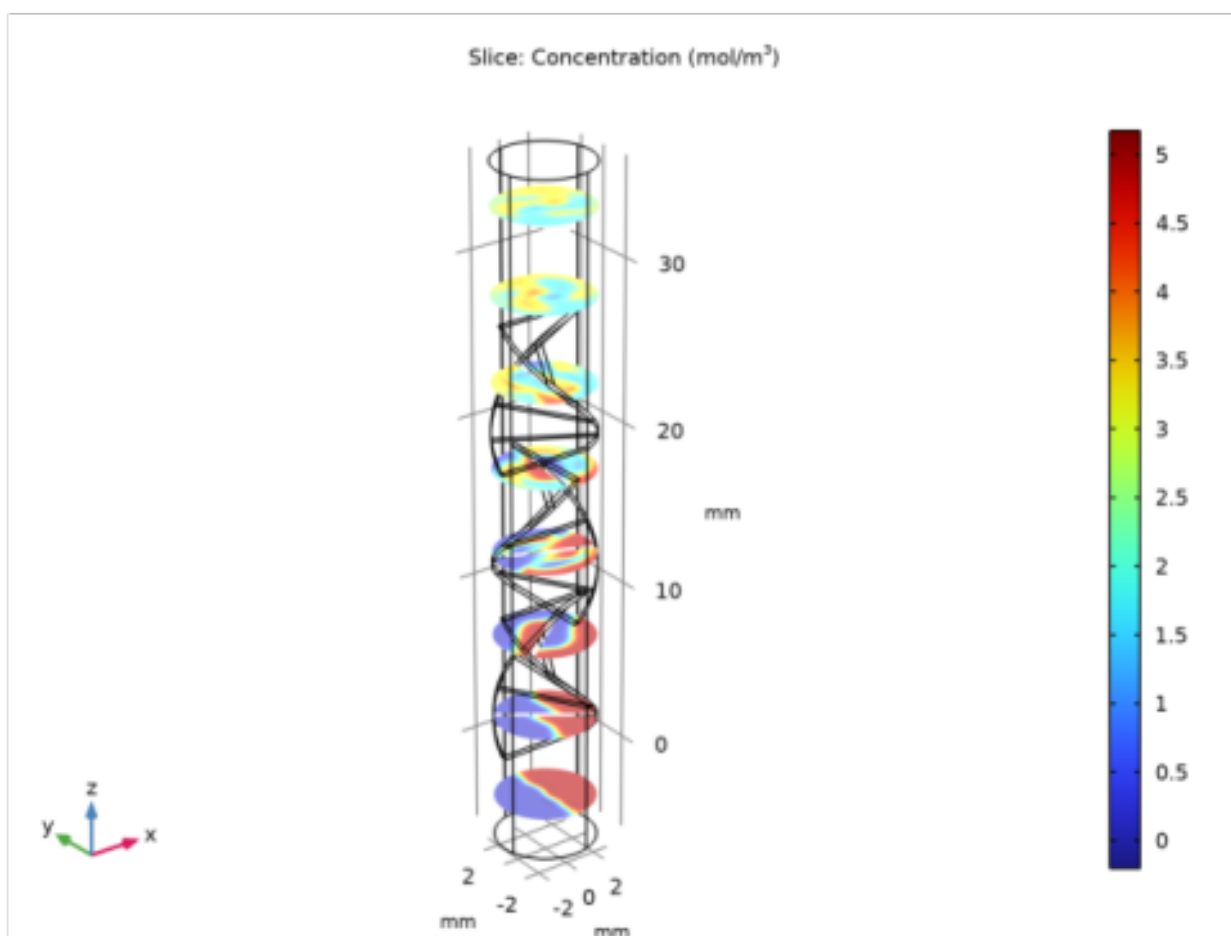


Рис. 4.9 Зрізи поля концентрації на різній відстані від вхідного отвору

На рис. 4.10 показано поле потоку, що відповідає за перемішування. Лінії течії чітко показують закручений рух рідини, яке індукується гвинтовими вставками змішувача.

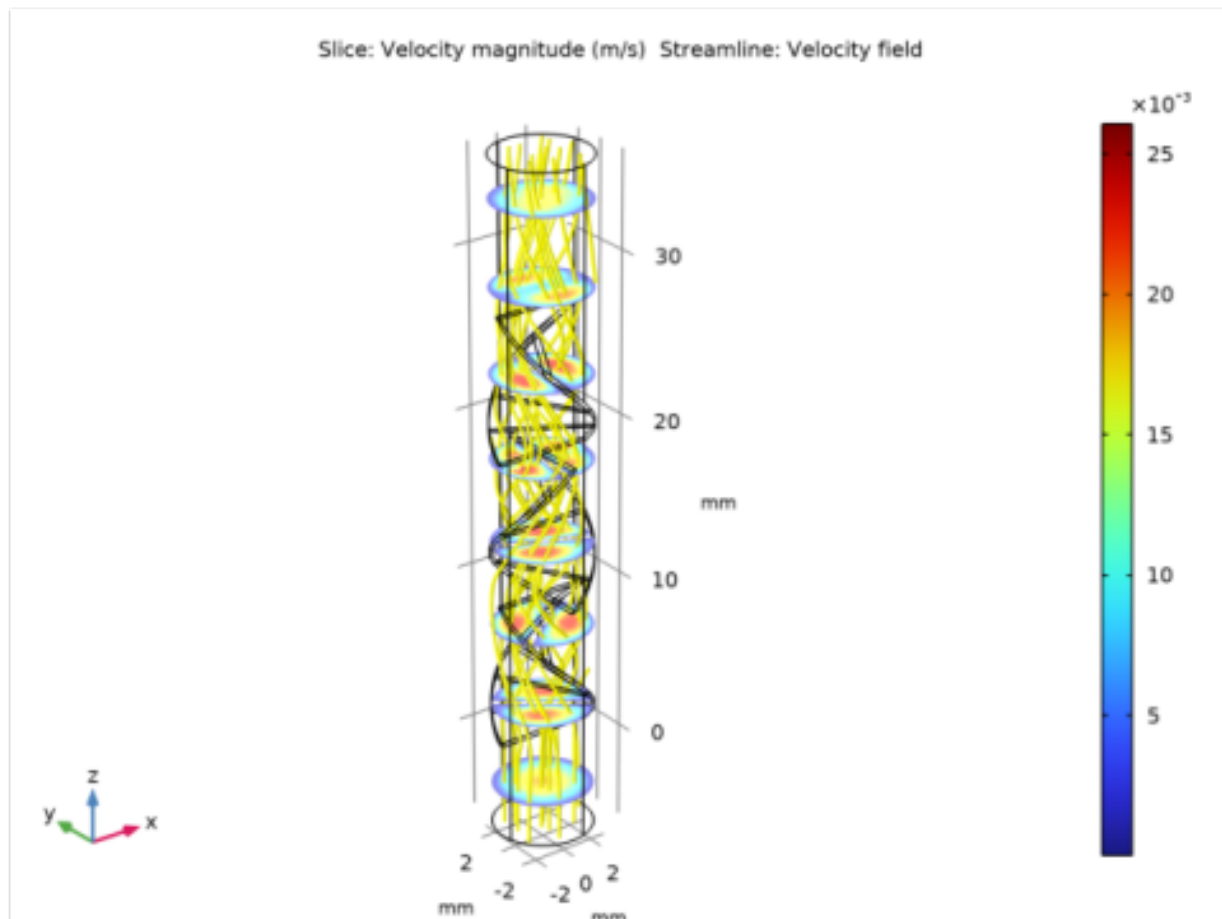


Рис. 4.10 Зріз поля амплітуд швидкості всередині змішувача. Лінії течії показують напрямок потоку

Ми також можемо візуалізувати змішування за допомогою серії графіків поперечного перерізу. Рисунок 4.11 містить таку серію графіків, що показують концентрацію в поперечному перерізі змішувача вздовж напрямку потоку. Графік показує, як концентрація змінюється від ідеально незмішаного стану до змішаного. Результати свідчать, що більша частина перемішування відбувається там, де гвинтові вставки змінюють напрямок закручування (три середні фігури).

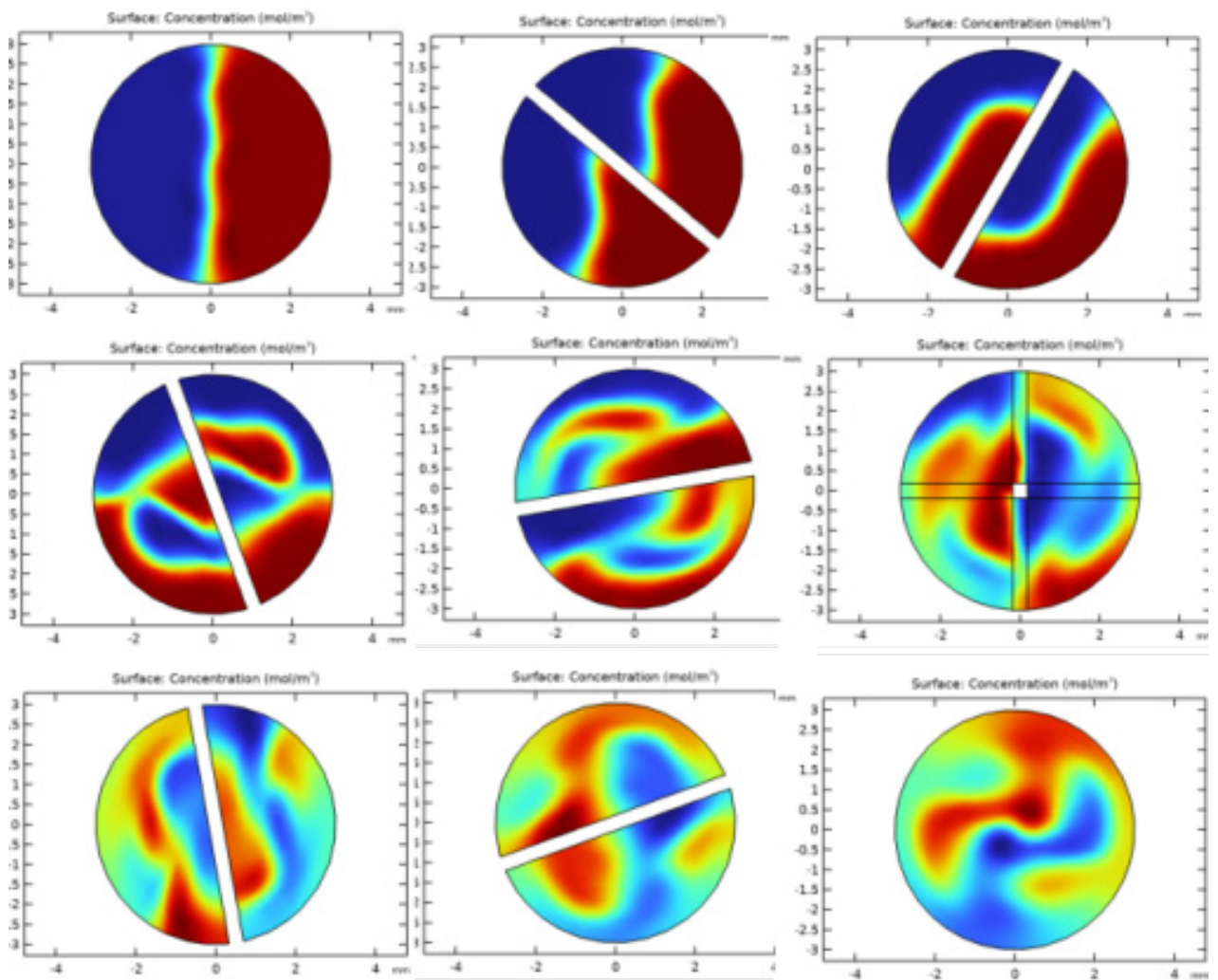


Рис. 4.11 Графіки поперечного перерізу концентрації на різних відстанях від вхідного отвору, мол/м³

Дев'ять ділянок показують концентрацію при $z = -2$ мм до $z = 30$ мм з кроком 4 мм

Безрозмірна концентрація

Slices: Dimensionless Concentration

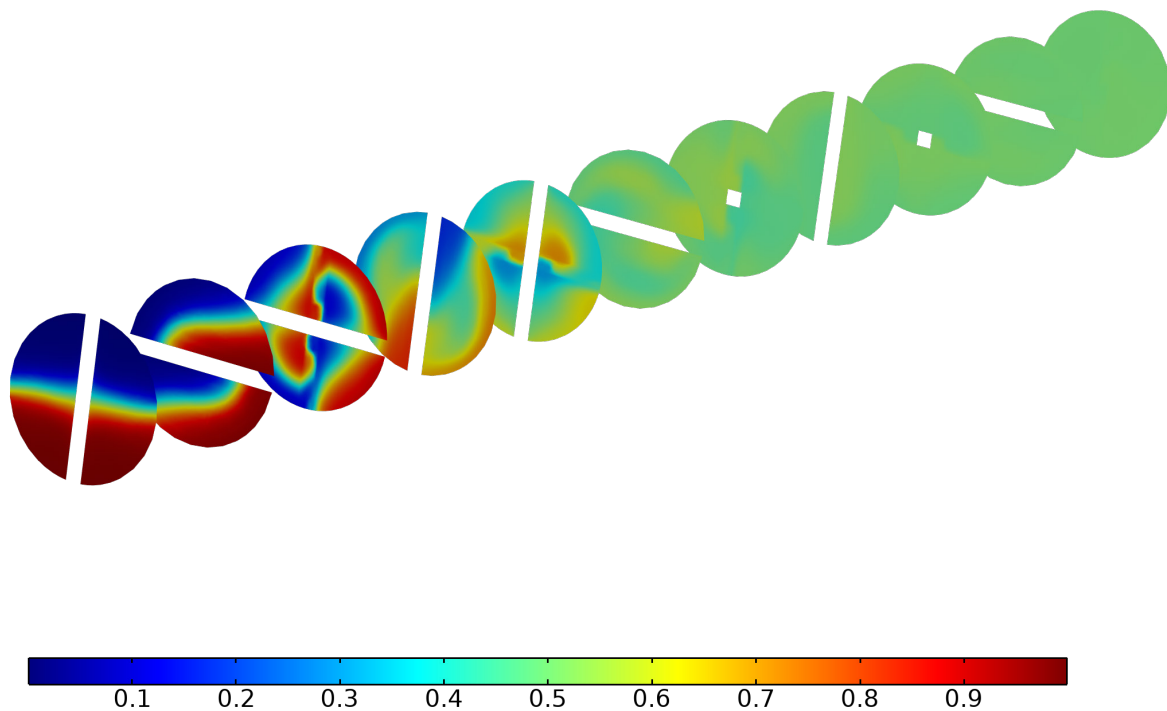


Рис. 4.12 Безрозмірна концентрація

Масштабована безрозмірна концентрація (tds)

Slices: Locally Scaled Dimensionless Concentration

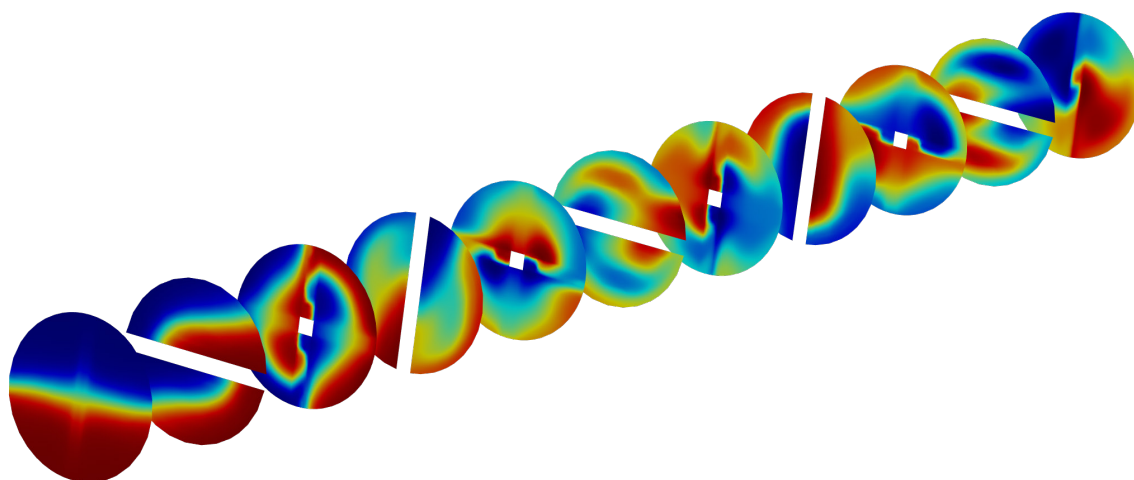


Рис.4.13 Локально масштабована безрозмірна концентрація

Лінії зрізу концентрації

e Graphs Along Radial Cut Lines ($x = 0$; $-R < y < R$) Positioned Evenly Spaced From First to Last Blade

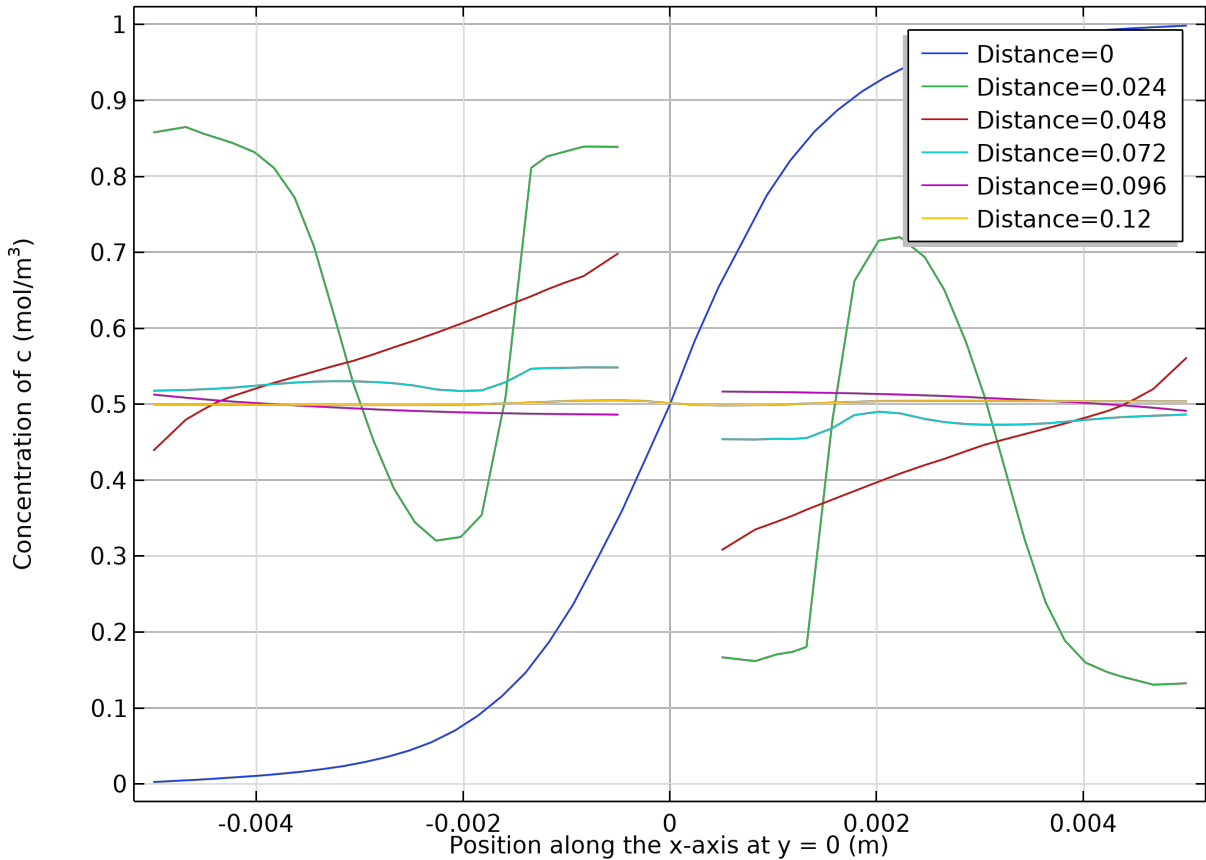


Рис. 4.14 Лінійні графіки вздовж радіальних ліній зрізу ($x = 0$; $-R < y < R$) Розташування рівномірно рознесене від першої до останньої гвинтової вставки

4.5 Ймовірність контакту

Геометрія моделі показана на рисунку 4.15 нижче. Профіль швидкості на вході описується повністю розробленими виразами ламінарної течії для труб (рівняння Пуазейля).

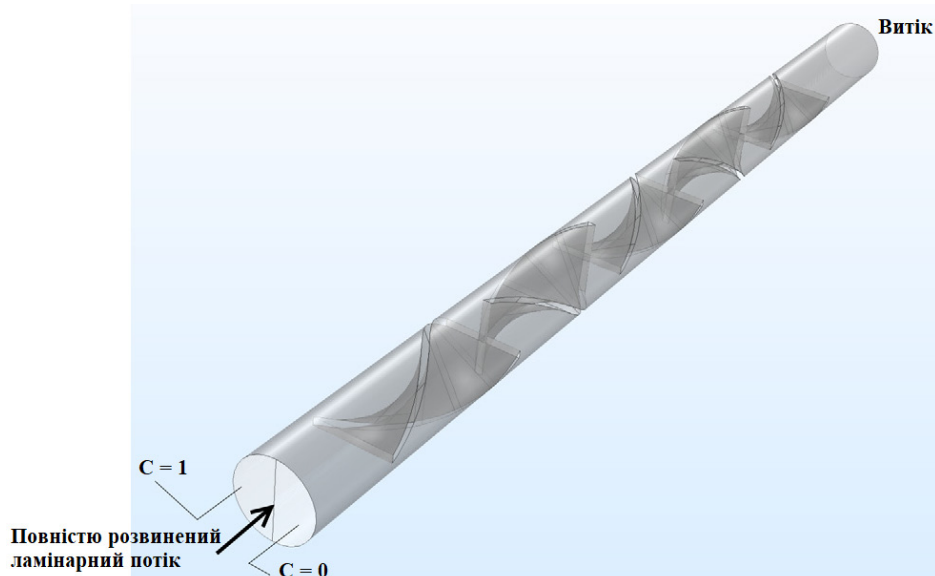


Рис. 4.15

Ймовірність контакту розраховується за допомогою наступного виразу:

$$\text{Contact Probability} = \frac{c}{c_A} \frac{(c_{max} - c)}{c_A}$$

де c позначає поле концентрації, c_A - середню концентрацію на вході, а c_{max} - максимальну концентрацію на вході. Ідеально перемішаний розчин дає концентрацію 0,5 від концентрації на вході; див. рисунок вище. Також середня концентрація в кожному поперечному перерізі по довжині змішувача повинна дорівнювати 0,5 в стаціонарному стані. Таким чином, ідеальна ймовірність контакту для ідеально перемішаного розчину повинна дорівнювати 1 після останньої гвинтової вставки.

Профілі концентрації та ймовірності контакту в поперечному перерізі, показані в площинах, перпендикулярних до основного напрямку потоку, масштабуються двома різними способами (рис. 4.16).

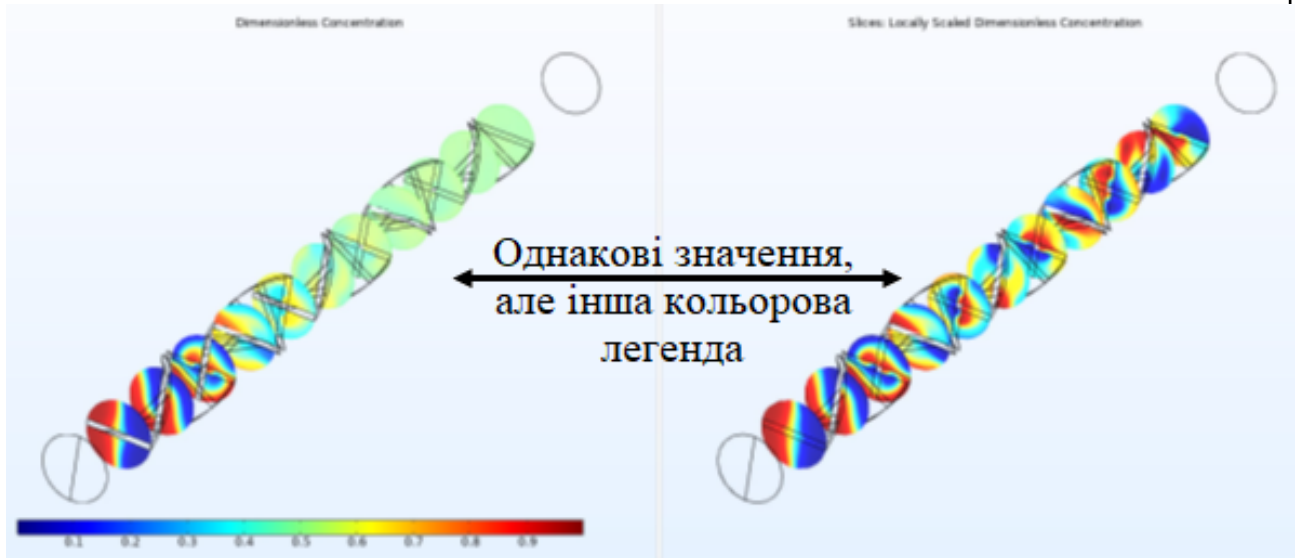


Рис. 4.16 Глобальні та локальні графіки поперечного перерізу в глобальному та локальному масштабі

На графіках, які містять кольорову легенду, використовуються однакові мінімальні та максимальні значення для всіх графіків поперечного перерізу (рис. 4.17).

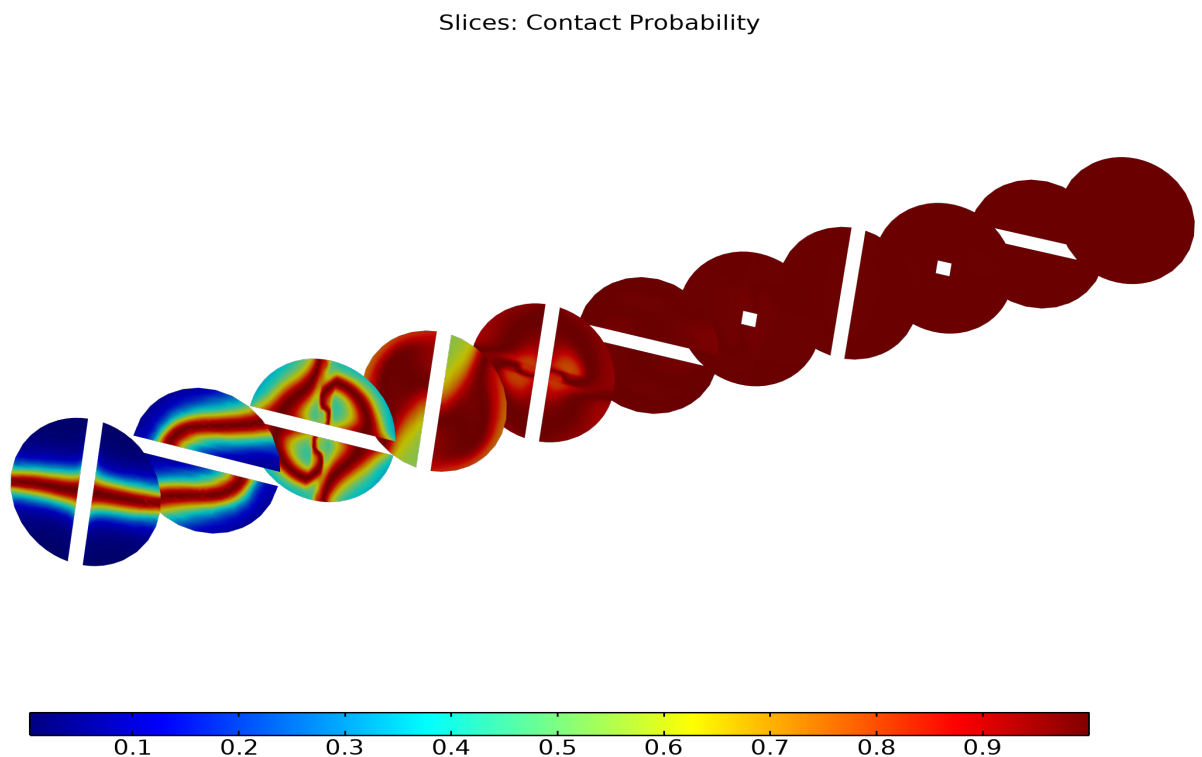


Рис. 4.17 Ймовірність контакту

Масштабована ймовірність контакту

На графіках з локальним масштабуванням використовуються індивідуальні максимальні і мінімальні значення для обраної кольорової позначки в кожному поперечному перерізі, що дозволяє більш детально відобразити розподіл концентрації і ймовірності контакту (рис. 4.18).

Slices: Locally Scaled Contact Probability

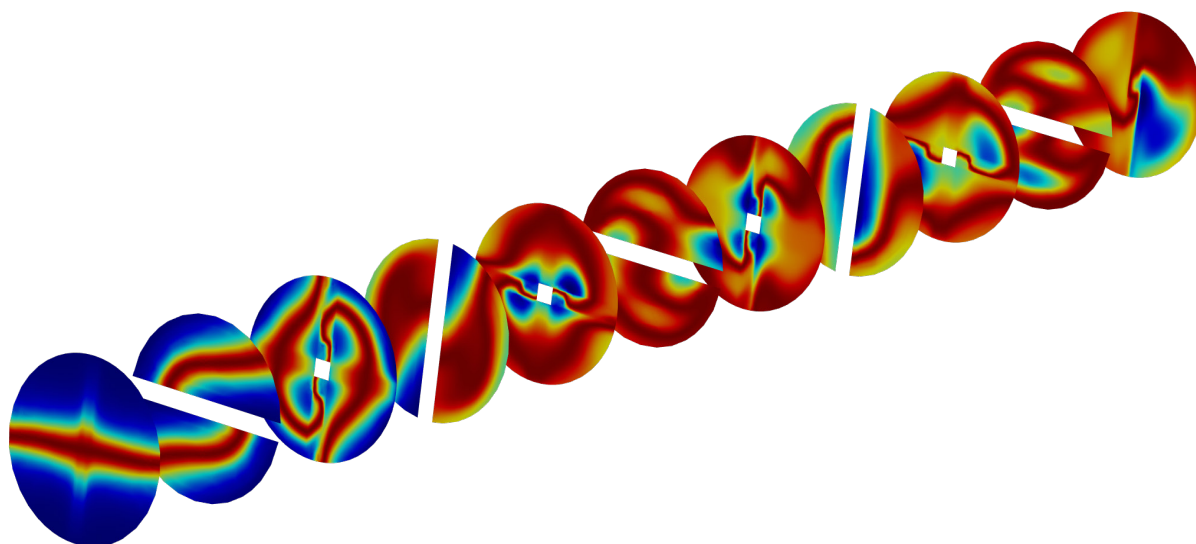


Рис. 4.18 Ймовірність локального масштабування контакту

4.6 Методика розрахунку змішувача

Мета розрахунку – визначити параметри і встановити режими змішування, які забезпечать виробництво якісних сумішей.

До конструктивних параметрів, які впливають на продуктивність і якість одержуваних складів, відносяться: діаметр робочої зони (каналу, де знаходяться змішувальні елементи), кількість перемішуючих елементів, кут скручування шнекового каналу, співвідношення довжини і діаметра

гвинтового елемента, кут контакту торцевих кромek елементів. Однак ступінь впливу кожного з цих параметрів неоднакова.

Основним параметром статичних змішувачів, що підлягають визначенню, є кількість шнекових перемішувачих елементів. Для проведення інженерного розрахунку статичних змішувачів необхідно вказати: 1) рецептурний склад матеріалу, що готується; 2) співвідношення в'язкості компонентів в умовах переробки; 3) необхідне виконання; 4) необхідна кількість ступеня перемішування.

Кількість гвинтових перемішувачих елементів можна розрахувати з рівняння:

$$m = \frac{r_0}{r_m} \frac{\mu_2}{\mu_1 \Theta} \left[\sqrt{\left(\frac{l}{R}\right)^2 + \alpha^2 J(k)} \right]^{-1}$$

де r_0, r_m – початкова і кінцева ширина смуги змішуємих компонентів; μ_1, μ_2 – в'язкості змішуємих компонентів; R – радіус каналу змішувача; l – довжина перемішувачого елемента; α – кут закручування гвинтового елемента; $J(k)$ – параметр, що залежить від співвідношення напівосей еліпсу гвинтового елемента.

Величина початкової ширини полоси r_0 що входить у рівняння визначається конструкцією завантажувальної насадки і залежить від величини початкової міжфазної поверхні f_0 , яка у загальному вигляді буде дорівнювати:

$$f_0 = l_{\pi} / (F_1 + F_2),$$

де l_{π} – периметр завантажувального сопла; F_1 и F_2 – площі поперечного перетину потоків компонентів.

Для насадки з щілиноподібним отвором, конструкція якої часто використовується в статичних змішувачах (рис. 4.19), отримуємо:

$$f_0 = 2(b_0 + l_0)\Theta / (b_0 l_0).$$

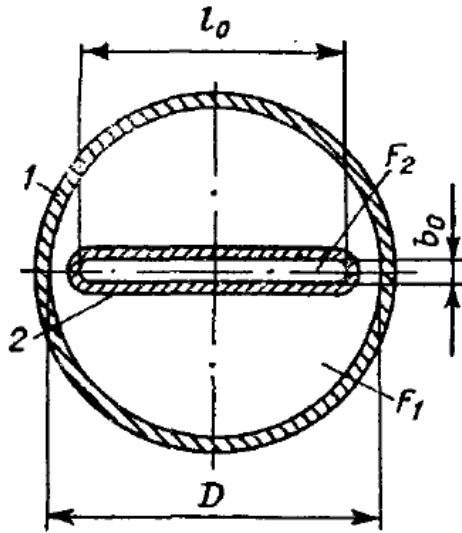


Рис. 4.19. Перетин зони навантаження статичного змішувача:
 1 – корпус; 2 – насадка для введення диспергуємого компоненту

З урахуванням співвідношення між шириною смуги і діаметром одержуваних крапель ($d_k = 1,9 d_{ц}$), початкова ширина смуги буде:

$$r_0 = 3\Theta / f_0.$$

Кінцеву ширину смуги r_m задають, виходячи з необхідного ступеня змішування. У деяких випадках зручно встановлювати значення співвідношення r_0/r_m ; наприклад, $r_0/r_m = 10$ означає, що ширина полос змішаних компонентів зменшиться у 10 раз.

Вибір габаритів змішувача обмежений величиною задаваної об'ємної продуктивності та пов'язаними з нею втратами тиску, що визначають вибір дозуючого пристрою. Розрахунок втрат тиску вимагає знання в'язких властивостей компонентів, форми каналів, по яких протікає суміш, їх довжини.

Зв'язок між продуктивністю і втратою тиску визначається відомою залежністю

$$Q = k_{\phi} \Delta p / \mu$$

Для каналу з конфігурацією, близькою до еліптичної

$$k_{\phi} \approx D^4 / (16l_k),$$

де D , l_k – діаметр змішувача та довжина каналу.

Отримавши дані про втрати тиску за обраними параметрами змішувача, потужність насоса системи дозування розраховується за відомими формулами методики розрахунку насосного обладнання.

Наявність інформації про необхідну ширину полос, знаходять відповідну їй питому міжфазну поверхню і, користуючись кореляційним графіком, визначають значення приросту діелектричної проникності, що є вхідним параметром контролю за якістю змішування.

4.6.1 Розрахунок

Задані параметри: 1) склад композиції що готується (у масових част.): компонент 1 – 100; компонент 2 – 38; рідка фаза – 190; 2) співвідношення в'язкостей дисперсних і дисперсійних фаз $\mu_2/\mu_1 = 0,5$; 3) в'язкість компоненту у технологічній фазі $\mu = 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 4) геометричні розміри змішувача та завантажувальної насадки: діаметр змішувача $D = 8 \text{ мм}$; довжина насадки $l_k = 7 \text{ мм}$; ширина насадки $b = 1 \text{ мм}$; 5) необхідна ширина полос $r_m = 0,25 \text{ мм}$; 6) продуктивність змішувача $Q = 0,36 \text{ м}^3/\text{год}$ ($10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$).

Розрахунок проводимо у наведеній вище послідовності.

1. Визначаємо вміст диспергуємої фази:

$$\Theta = 38/(100+37+190) = 0,11.$$

2. Розраховуємо початкову ширину полос:

$$r_0 = 3 \times 1 \times 7 / [2(7 + 1)] = 1,3 \text{ мм}.$$

3. Задаємося конструктивними розмірами змішувача: співвідношення довжини змішуючого елемента та діаметра змішувача $l/D = 1,5$; співвідношення напіввісей еліпсу $a/b = 1,3$; кут закручування гвинтового елемента $\alpha = 90^\circ$ (1,57 рад).

4. З приведених у літературі даних визначається величина параметру $J(k) = 1,8$.

5. Розраховуємо кількість змішувальних елементів:

$$m = \frac{1,3}{0,25} \frac{0,5}{0,11} \left[0,34 \frac{4}{4} \sqrt{3^2 + 1,57^2} \cdot 1,8 \right]^{-1} = 12.$$

6. Визначаємо величину втрат тиску з врахуванням кількості змішувальних елементів:

$$\Delta p = \frac{16 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3 \cdot 1,5 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} \cdot 2 \cdot 12 = 3\,375 \text{ Па}$$

(у зв'язку з тим, що елементи мають протилежну закрутку, доцільно враховувати подвійну кількість елементів).

Якщо втрати тиску перевищують задане значення, то, змінюючи геометричні характеристики змішувача, його можна зменшити. Так, наприклад, кут скручування гвинтового елемента $\alpha = 180^\circ$ (3,14 рад) та співвідношення напівосей еліпсу $k = a/b = 1,5$ та $J(k) = 2$ призводять до зменшення кількості необхідних елементів:

$$m = \frac{1,3}{0,25} \frac{0,5}{0,11} \left[0,34 \frac{4}{4} \sqrt{3^2 + 3,14^2} \cdot 2,0 \right]^{-1} = 9.$$

У цьому випадку втрати тиску складають 2530 Па.

Значення питомої міжфазної поверхні для даного випадку складе:

$$f = 3 \times 0,11 / (0,25 \times 10^{-3}) = 1,32 \times 10^3 \text{ м}^{-1},$$

що відповідає приросту діелектричної проникності, рівному 2,5 %.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

Сучасний розвиток науки і техніки приносить принципові нововведення у всі сфери матеріального виробництва, суттєво змінюючи технологічні процеси та матеріали що використовуються, предмети та знаряддя праці [18]. Введені в експлуатацію апарати має бути відповідним усім вимогам, що сформульовані в галузевих стандартах, а також в затверджених інстанціями інструкціях, правилах і нормах.

Підвищення технічної оснащеності сучасних підприємств, застосування нових матеріалів, конструкцій і процесів, підвищення швидкостей і потужностей машин впливають на характер і частоту нещасних випадків і захворювань на виробництві. Закон «Про охорону праці» зобов'язує роботодавця створити задовільні умови на кожному робочому місці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці [17].

Охорона праці й поліпшення умов праці є одним з найважливіших завдань. Безпечне ведення технологічного процесу знижує можливість травматизму, підвищує працездатність обслуговуючого персоналу. Установки повинні мати конструкцію, компоновку устаткування і трубопроводів, які забезпечують умови роботи обслуговуючого персоналу відповідно до діючих норм техніки безпеки і ергономіки.

На персонал впливають такі фактори як: можливість ураження електричним струмом, шум, вміст газових домішок у повітрі, які можуть привести до вибуху та отруєння, біологічне ураження продуцентом.

Найбільш часті причини аварій устаткування, що працює під тиском, це невідповідність конструкції максимально допустимому тиску і температурі;

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Діломакін Ю.Ю.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> НУХТ, ОФ-2-6м	<i>Розробник документа</i> Ніколаєнко Е.М.	<i>Назва, додаткова назва</i> Охорона праці	210760.KP.01.000.ПЗ				
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркулш</i> 83	

втрата механічної міцності апарата (корозія, внутрішні дефекти металу, місцеві перегріву);

невиконання встановленого режиму роботи;

недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу;

відсутність належного технічного нагляду.

Вимоги безпеки, що пред'являються до конструкції, виготовлення, та експлуатації апаратів, що працюють під тиском, визначені «Правилами будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском».

Рівень шуму та вібрацій

Приміщення, в яких розміщена виробнича лінія. Основними джерелами шуму при роботі вважаються електродвигуни, компресори та інше устаткування в яких шум може досягнути значення 90 дБА. Згідно норм ДСН 3.3.6.037-99 шум, при роботі, не повинен перевищувати значення в 80 дБА [53]. Заходи і матеріали, які застосовуються для пониження рівня шуму механічного походження включають:

- використання облицювального шумоізоляційного матеріалу з перфоруванням;
- звукоізоляція устаткування за допомогою глушників, резонаторів, кожухів, захисних конструкцій, тощо;
- застосування раціональних конструкцій, нових матеріалів і технологічних процесів.

Повітря робочої зони

Пульт управління знаходиться в приміщенні, площею 30 м² і об'ємом 81 м³ та висотою 2,7 м.

Відповідно до параметрів роботи змішувача маємо приміщення без надлишкового виділення тепла.

В процесі регенерації тепла повітря видаляються двоокис і окис вуглецю. Гранично допустима концентрація цієї речовини 20 мг/м³.

Такий параметр повітря робочої зони задовільняють ДСН2.3.7.051-99. Регулювання цього параметру відбувається у холодну пору року за рахунок опалення з температурою теплоносія 70...90 °С, а в теплий час року вентиляцією та кондиціонуванням.

Вентиляційна система має забезпечити виведення пилу (до 18 мкм) з приміщення і доведення якості повітря до встановлених норм. Для індивідуального захисту працівників від летких подразників застосовують респіратори, протигази, захисні костюми. Аеродинамічні випробування вентиляційних систем проводять не рідше одного разу на рік, а також після кожного капітального ремонту або реконструкції.

Якщо вентиляційна система не забезпечує належних умов і чистоти повітря у приміщеннях, то застосовують систему кондиціонування повітря.

Необхідно забезпечити захист працівників від елементів устаткування, нагрітих до високих температур. Апарати повинні мати теплоізоляцію з мінеральної вати товщиною від 10 см, що забезпечить прийнятну температуру на поверхні барабана і теплове випромінювання відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [14]. Перед запуском технологічних апаратів необхідно провести промивку і продувку всіх комунікацій і устаткування, перевірити їх герметичність. Всі насоси, завантажувальні пристрої та інші механізми і машини перевіряють без навантаження і під навантаженням на інертних середовищах. Приміщення обладнанні стендами з зазначеними правилами техніки безпеки, правилами з експлуатації установки, стендами з планом евакоходів. Перед початком робіт працівники повинні проходити інструктаж з техніки безпеки.

Електробезпека

Устаткування, що розробляється в роботі, буде міститись у приміщенні за нормальної температури та вологості повітря. Підлога приміщення залізобетонна. За ПУЕ таке місце належить до приміщень з підвищеною небезпекою. За пультом керування напруга $U = 230$ В. Тип електромережей - змінний із глухо заземленою нейтраллю.

Приміщення операторної згідно ПУЕ-2017 відноситься до приміщень із підвищеною небезпекою, тому що можливий одночасний дотик людини до з'єднаних під землею технологічних апаратів і металевих корпусів електроустаткування [5].

Основними заходами від ураження електричним струмом є:

- 1) Недоступність елементів установки, що знаходяться під напругою.
- 2) Застосування ізоляції струмопровідних частин пульта керування ($R \geq 0,5 \text{ МОм}$). Ізоляція створює умови безпечності за рахунок великих опорів, які перешкоджають проникненню великих струмів через ізоляцію.
- 3) При роботі з електроінструментами застосовування індивідуальних захисних засобів, таких як діелектричні рукавички і калоші, гумові килимки, ізольовані підставки.

Забороняється:

- проводити роботи на незанулених вузлах лінії;
- проводити ремонт лінії без вимкнення електричної мережі;
- залишати лінію, що працює без нагляду;
- допускати до роботи людей, які не пройшли навчання і не були ознайомлені з правилами техніки безпеки.

Так як маємо установку з глухо заземленою нейтраллю, то використовуємо захисне занулення (рис. 5.1).

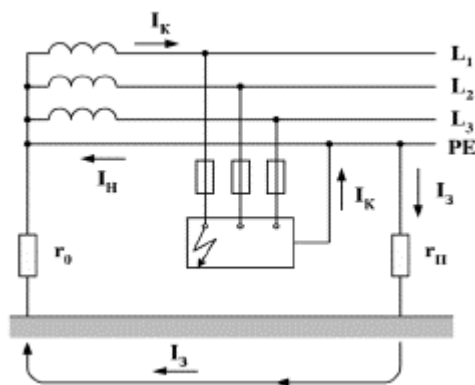


Рис. 5.1 Захисне занулення

Вимоги до занулення полягають в наступному: провідники занулення повинні вибиратись так, щоб при замиканні на корпус чи на нульовий захисний провід виникав струм короткого замикання, який перевищує номінальний струм плавкого елемента найближчого запобіжника не менше чим в три рази.

Щоб уникнути ураження від статичної електрики робиться сітка з металевих пластин перетином 25×4 мм, що розташовується по периметру приміщення, і до якої приєднують мідним дротом $S = 10 \text{ мм}^2$ металеві частини апаратів й устаткування, які перебувають у цьому приміщенні. Для забезпечення безпечної роботи з електроустаткуванням кабелі та дроти вкладаються в труби й ховаються під підлогою, рубильники закриті в спеціальних шафах, при роботі з електроінструментами застосовуються індивідуальні засоби захисту.

При експлуатації електроустаткування необхідно дотримуватися наступних правил безпечної роботи:

- забороняється торкатися до електропроводів, робити ремонт електроустаткування, знімати й установлювати електролампи, запобіжники й інші деталі електроустаткування особам, які не мають права допуску;
- входити в розподільну щитову, відкривати електрозбірки, входити в місця, де висять таблички «Вхід заборонений», «Небезпечно для життя» й інші попереджувальні написи;
- перед проведенням ремонтних робіт на устаткуванні лінії електродвигуни повинні бути зупинені, знеструмлені й від'єднані від приводів, на пускових кнопках повинні бути вивішені плакати «Не вмикати, працюють люди». Відключення електроенергії проводиться електриком;
- відповідальний електрик за електрогосподарство лінії систематично перевіряє відповідність заземлення устаткування правилам технічної експлуатації, особливо після його ремонту;
- установлення плакатів і знаків безпеки.

Пожежна безпека

На лінії виробництва горючими речовинами є: біодизель, метиловий спирт та мастило, яким змазуються частини конструкції.

Біодизель є вибухонебезпечним матеріалом, відноситься до горючих матеріалів, тому технологічний процес утилізації біодизеля відноситься до категорії В (ДСТУ Б В.1.1-36:2016) [56]. Згідно ПУЕ клас зони установки П-Па (зони, розташовані в приміщеннях, в яких зберігаються горючі речовини).

Цех в якому знаходиться установка змішування будується з використанням негорючих матеріалів (бетону, залізобетону), тому стійкість споруди за ДБН В.1.1-7-2002 відповідає ступеню вогнестійкості II [57].

В разі виникнення пожежі встановлені датчики-сповіщувачі, які спрацьовують при підвищенні температури до 89 °С. Для гасіння невеликих ділянок загорання при вимкненому та ввімкнутому електроустаткуванні застосовують вуглекислотні та порошкові вогнегасники.

Як стаціонарні засоби пожежогасіння встановлені самоспрацьовуючі вогнегасники. У приміщенні, де розташовується установка, на відстані 30 метрів один від одного встановлені пожежні гідранти з рукавами довжиною до 10 метрів. Відстань до пожежного виходу не більше 40 метрів.

Пожежна характеристика матеріалів: під час роботи установки використовуються тверді матеріали (пластмаси, гофра).

Випробування та експлуатація лінії виконується при дотриманні правил пожежної безпеки. Температура самозаймання пінопласту складає 491 °С, тобто самозаймання неможливе, оскільки температурний режим роботи регенератора від -20 °С до +40 °С.

Причинами, що можуть призвести до займання, маємо найімовірніші:

- несправне живлення електроенергією;
- коротке замикання струму;
- відкритий вогонь;
- застосування легкозаймистих речовин, їхнє зберігання поблизу
- установки.

Запобігання заpalенням забезпечується такими заходами:

- дотримання технологічних норм і правил експлуатації;
- догляд за територією відповідно до вимог пожежної безпеки;
- обмежити застосування вогню на відкритому місці;
- створення місць для паління;
- інструктаж для робітників;
- слідування за справністю устаткування;
- наявність засобів протипожежної сигналізації.

Для погашення вогнища при вимкненому електроустаткуванні застосовують вуглекислотні вогнегасники ОП-10.

Для гасіння ввімкнених електромереж застосовують порошкові вогнегасники з речовинами ОПС-10 і ОППС-100.

Для персонального захисту персоналу в приміщенні знаходяться універсальний ізолювальний протигаз УПП-1.

Пожежна небезпека зберігання горючих газів в балонах

Аміак у скрапленому стані зберігається під тиском насиченої пари, якій відповідає температурі зовнішнього середовища, у середньолітражному балоні. Для збереження аміаку - товстостінні транспортні балони на 40 л, під внутрішнім тиском $P=2,0$ МПа.

ГОСТ 949-73.

Склад газу у балонах категорії "А", наявні горючі гази.

Можливість виникнення ВНС:

Всередині балонів:

- при зарядці балонів з-під ГГ киснем або стисненим повітрям і навпаки, при неповному вивільненні газу з балона;
- в приміщеннях, під навісами, на відкритих площадках - несправність вентиляції, вентилі залишили відкритими, порушення цілості балона

(непровар швів при виготовленні, порушення зварного шва при високих тисках, дефект металу, корозія металу, механічне руйнування балонів, підвищення тиску при нагріванні балонів).

Можливість вибуху та розривів балонів. Причиною вибухів та розривів може бути - перегрів балонів.

Перегриви можуть виникати від сонячного випромінювання, розташування балонів біля приладів опалення або ж при пожежах. Балони із скрапленими газами як правило вибухають при температурах 200-300 °С:

- втома металу від високого тиску;
- зменшення міцності від корозії;
- переповнення балонів.

Переповнення виникає при перебільшенні коефіцієнта заповнення скрапленим газом.

Утворення ВНС на складах балонів з горючими газами можливе через нещільності вентилів балонів та при їх розривах.

Таким чином, середовище біля місць балонного збереження горючих газів буде характеризуватися такою зоною класу: в приміщеннях – 2 (В-Ia).

Наявність джерел запалювання.

Найбільш характерними джерелами запалювання є іскри від співударів металу, розряди статичної та атмосферної електрики.

Наявність різноманітних шляхів розповсюдження пожеж газоповітряними хмарами, розливом скрапленого газу, звичайним вибухом або детонацією, а також розлітанням балонів або їх уламків при вибухах.

Умовами, що ускладнюють гасіння пожежі- небезпека отруєння, обвал конструкцій.

Таким чином, місця балонного збереження газів як горючих так і негорючих мають достатньо високу пожежну небезпеку і вимагають

відповідного протипожежного захисту.

В приміщенні, де розташовується установка, на відстані 30 метрів одне від одного повинні бути встановлені пожежні гідранти з рукавами довжиною до 15 м. Довжина прольоту до пожежного виходу немає перевищувати 30 метрів.

Кількість евакуаційних виходів не має бути менша двох. Шириною двері евакуаційного виходу мають бути два метри. Двері евакуаційного виходу повинні відкриватись на зовні (рис. 5.2).

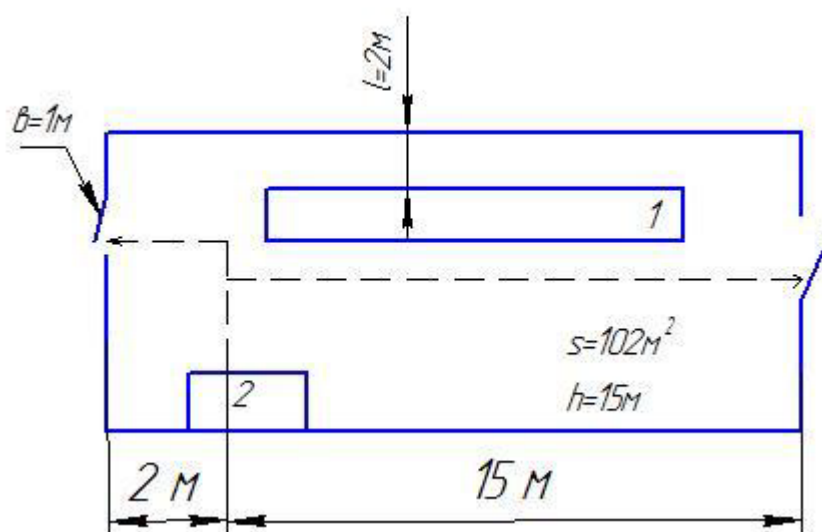


Рис. 5.2 План евакуації

Відповідно до закону про охорону праці і національної програми по охороні праці, виробничі будівлі, споруди, устаткування, технологічні процеси повинні відповідати вимогам, що забезпечують безпечні умови праці.

Висновки

У кваліфікаційній роботі проведено імітаційне моделювання, засобами програми *COMSOL*, статичного перемішуючого пристрою з плоскими елементами зігнуті по гвинтовій лінії у ліво- та правосторонньому напрямках.

Дана конструкція перемішувача є найбільш доцільною для застосування у переробці як рідких так і в'язких форм виробництва лікарських засобів. Іноді їх використовують для попереднього перемішування субстанцій перед вводом їх у реактори.

Було встановлено, гідродинаміку потоку суміші у середині змішувача. Отримана візуалізація траєкторій ліній поля швидкості, а також у вигляді кольорових полів швидкості, тиску та концентрації.

Розрахунки були виконані з урахуванням вимог техніки безпеки. За допомогою проведених розрахунків на виробництві доцільно встановлювати подібні конструкції, які максимально задовольняють заданим умовам.

Результати імітаційного моделювання було порівняно з теоретичними розрахунками, різниця між ними склала не більше 9 %. Результати показують, що більша частина перемішування відбувається там, де внутрішні вставки змінюють напрямок закручування.

З цього можна зробити висновок, що статичні змішувачі вигідно відрізняються від змішувачів динамічного типу того ж функціонального призначення відсутністю рухомих частин, поєднують в собі високу продуктивність, низьку енергоємність, надійність в експлуатації, простоту виготовлення і обслуговування. Додатковий процес перемішування можливий за рахунок статичного змішувача, при цьому не збільшуються необхідна на перемішування витрати енергії, що з економічної точки зору для підприємства є привабливим.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Доломакін Ю.Ю.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> НУХТ, 0Ф-2-6м	<i>Розробник документа</i> Ніколаєнко Е.М.	<i>Назва, додаткова назва</i> Висновки	210760.KP.01.000.ПЗ				
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 92	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Процеси і апарати. Гідромеханічні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, Н.П. Загорко, В.Г. Циб. – Мелітополь, 2019. – 212 с.
2. Дмитрієвський Д.І., Богуславська Л.І., Хохлова Л.М. та ін. Технологія лікарських препаратів промисловою виробництва. Навчальний посібник. Видання друге / За ред. Д.І. Дмитрієвського. Вінниця: НОВА КНИГА, 2008. – 280 с.
3. Kresta S.M., Etchells A.W. Advances in industrial mixing / John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016. – 967 p.
4. Paul E.L., Atiemo-Obeng V.A. Handbook of industrial mixing / John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. – 1432 p.
5. Furling, O., P.A. Tanguy, L. Choplin, and H.Z. Li (2000). Solid liquid mixing at high concentrations with SMX static mixers, Proc. 10th European Conference on Mixing, Delft, The Netherlands, July.
6. LaRoche, R.D. (2000). CFD in the process industries, Chemical Reaction Engineering VIII, Computational Fluid Dynamics, Quebec City, Quebec, Canada, Aug.
7. Chaurasia A.S. Computational Fluid Dynamics and COSMOL Multiphysics. A Step-by-Step Approach for Chemical Engineers / Apple Academic Press Inc., Palm Bay, FL. USA, 2021. – 386 p.
8. Иозеп А.А., Пассет Б.В., Самаренко В. Я., Щенникова О.Б. Химическая технология фармацевтических субстанций: Учебное пособие: Лань, 2016. – 384 с.
9. Процеси та апарати хімічних виробництв / укладачі: Я. Е. Михайловський, М. П. Юхименко. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 89 с.

<i>Відповідальна організація</i> НУХТ	<i>Технічне узгодження</i> Доломакін Ю.Ю.	<i>Вид документа</i> Пояснювальна записка		<i>Статус документа</i>		
<i>Власник документа</i> НУХТ, 0Ф-2-6м	<i>Розробник документа</i> Ніколаєнко Е.М.	<i>Назва, додаткова назва</i> Література	210760.KP.01.000.ПЗ			
	<i>Документ затверджено</i> Гавва О.М.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> UA	<i>Аркуш</i> 93

10. Врагов А.П. Гідромеханічні процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв: Навчальний посібник. – Суми: Алан-Екс, 2003. – 232 с.
11. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв: Підручник / І.В. Коваленко, В.В. Малиновський. – К.: Інрес: Воля, 2006. – 264 с.
12. Луняка К.В. Процеси і апарати хімічних виробництв. Навчальний посібник. – Херсон: ХНТУ, 2006. – 152 с.
13. Шалугін В.С., Шмандій В.М. Процеси та апарати промислових технологій. Навчальний посібник. – К.: Центр учбової літератури, 2008. – 392 с.
14. Зеркалов Д.В. Охорона праці в галузі: Загальні вимоги. Навчальний посібник. – К.: «Основа». 2011. – 551 с.
15. Плахтій Н.Д., Мендерецький В.В., Болібрех Б.В. та ін. Безпека життєдіяльності. – Кам'янець-Подільський. 2003.
16. Сторожук В.М. Виробничі шуми: природа і шляхи зниження – К., 2003.
17. Штабський Б.М., Гжегоцький М.Р. Ксенобіотики, гомеостаз і хімічна безпека. – Львів, 1999.
18. Технологія машинобудування. Дипломне проектування: Навч. посіб. / А.М. Зинченко [та ін.]. – Алчевськ: ДонДТУ, 2013. – 311 с.
19. Когут М.С. Механоскладальні цехи та дільниці у машинобудуванні: Підручник. – Львів: Видавництво державного університету «Львівська політехніка». 2000. – 352 с.