

Міністерство освіти і науки України

ЗАПОРІЗЬКІЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування закладу вищої освіти)

ФАКУЛЬТЕТ ЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

(назва факультету)

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

рівень вищої освіти

другий магістерський рівень

(другий (магістерський) рівень)

на тему: Аналіз різних режимів руху теплоносія в трубах і каналах

Виконав: студент 2 курсу,

групи ТЕ-18-2мз

Черних Микола Анатолійович

(ПІБ)

(підпис)

спеціальності 144 теплоенергетика

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

теплоенергетика

(шифр і назва)

Керівник Назаренко О.М.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКІЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій

Кафедра кафедра теплоенергетики та теплоенергетики

Рівень вищої освіти другий магістерський рівень

Спеціальність 144 теплоенергетика
(код і назва)

Освітня програма теплоенергетика
(код і назва)

Спеціалізація _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

“ _____ ” _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА СТУДЕНТА**

Черних Миколі Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз різних режимів руху теплоносія в трубах і каналах

Керівник роботи Назаренко О.М., доцент КТГЕ, кандидат технічних наук
(прізвище та ініціали, посада, вчене звання, науковий ступінь)

Затверджені наказом ЗНУ від « 10 » вересня 2019 року №1537-с

2 Строк подання студентом роботи 26 грудня 2019 року

3 Вихідні дані до роботи лабораторний стенд, теплоносій, ламінарний та турбулентний потік, гідродинаміка, теплообмін, енергоспоживання.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки(перелік питань, які потрібно розробити) 1.1 Аналіз гідравлічного розподілу теплоносія. Літературний огляд проблеми. 2.1 Розробка та монтаж лабораторного стенду 2.2 Дослідження руху теплоносія. 3.1 Стабілізація та прискорення алгоритму обчислювальної динаміки рідини. 4.1 Дистанційне вихрове моделювання турбулентного потоку та теплообмін в ребристих каналах.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 1. Лабораторний стенд. 2. Робочі органи установки 3. Органи реєстрації
 даних. 4. Порівняння між прогнозом та вимірами потоку через засувку.
 5. Дослідження ламінарних та турбулентних потоків теплоносія. 6. Доціль-
 ність застосування прикладних досліджень.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Назаренко О.М., доцент ТГЕ		
2	Назаренко О.М., доцент ТГЕ		
3	Назаренко О.М., доцент ТГЕ		
4	Назаренко О.М., доцент ТГЕ		
5	Назаренко О.М., доцент ТГЕ		
Нормо контроль	Каюков Ю.М., доцент ТГЕ		

7. Дата видачі завдання 10 вересня 2019 року №1537-с

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз гідравлічного розподілу теплоносія. літературний огляд проблеми	10.10.2019	

2	Розробка, монтаж та налаштування лабораторного стенду	20.10.2019	
3	Дослідження руху теплоносія	02.11.2019	
4	Стабілізація та прискорення алгоритму обчислювальної динаміки рідини	15.11.2019	
5	Дистанційне вихрове моделювання турбулентного потоку та теплообмін в ребристих каналах	30.11.2019	
6	Охорона праці	10.12.2019	
7	Оформлення графічного матеріалу	20.12.2019	
8	Оформлення магістерської роботи	26.12.2019	

Студент

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

**Керівник роботи
(проекту)**

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

_____ (підпис)

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Черних М.А. Аналіз різних режимів руху теплоносія в трубах і каналах.

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник О. М. Назаренко. Запорізький національний університет. Інженерний інститут. Факультет енергетики, електроніки та інформаційних технологій, кафедра теплоенергетики та теплоенергетики, 2020.

Проведено патентний пошук, аналіз та літературний огляд світових лабораторних стендів для моделювання гідродинамічних явищ та процесів тепломасопереносу в різних сферах народного господарства. Спроектовано та змонтовано установку для дослідження ламінарних та турбулентних режимів руху теплоносія. Складено енергетичний баланс потоку для різних видів руху теплоносія. Досліджені характерні зони втрат тиску при руху енергоносія. Визначено оптимальні режими руху теплоносія. Моделювання явищ в будівельній, геологічній, гідрологічній галузях, дозволило дослідження енергетичних потоків при різних значеннях чисел Фрутта та Нерста.

Використання різних типів місцевих опорів надає можливість дослідження надкритичних параметрів роботи теплових мереж. Виконано дослідження дистанційного керування стендом по різним сезонам року. Проаналізовано продуктивність підключення комп'ютерної оболонки SolidWork для проведення прискорених дослідів в машинобудівній, енергетичній, аграрній сфері для роботи з великими масивами даних.

Визначено межі застосування насосних апаратів для використання ефекту кавітації для відновлення прісних водних ресурсів. Виведено числа кавітації при формуванні сумішей повторних вод для використання в рекреаційному господарстві. Виконано економічну оцінку доцільності впровадження гідравлічного моделювання, розраховано питомі накладні витрати при відсутності наукових досліджень різних напрямків народного господарства.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: СТЕНД, МОДЕЛЮВАННЯ, ТУРБУЛЕНТНИЙ РЕЖИМ, ВТРАТИ НАПОРУ, МІСЦЕВІ ОПОРИ, ЧИСЛО РЕЙНОЛЬДСА, ТЕПЛОВТРАТИ, ТЕПЛООБМІН, ТЕМПЕРАТУРА, ЕНЕРГООЩАДНІСТЬ.

ABSTRACT

Chernykh MA Analysis of different modes of motion of the coolant in pipes and channels.

Qualifying work for obtaining a master`s degree in in higher education by specialty 144 - Heat and Power Engineering, supervisor OM Nazarenko. Zaporizhzhya National University. Engineering Institute. Faculty of Energy, Electronics and Information Technology, 2020.

A patent search and literary review of world laboratory stands for modeling of hydrodynamic phenomena and processes of heat and mass transfer in different spheres of the national economy were conducted. A facility for the study of laminar and turbulent modes of fluid motion is designed and installed. The energy balance of the flows for different types of coolant motion is compiled. Characteristic zones of pressure loss during energy carrier movement are investigated. The optimal modes of fluid movements are determined. Modeling of phenomena in the construction, geological, hydrological fields, allowed the study of energy flows at different values of Frutt and Nerst numbers.

The use of different types of local resistances make possible to study the supercritical parameters of the operation of thermal networks. The study of remote control of the stand for different seasons of the year has been done. The performance of SolidWork computer shell connectivity for accelerated experiments in the engineering, energy, and agricultural fields for large data sets is analyzed.

The limits of the use of pumping machines for the use of the cavitation effect for the restoration of fresh water resources have been determined. The numbers of cavitation during the formation of re-water mixtures for use in the recreational economy are deduced. The economic estimation of expediency of introduction of

hydraulic modeling is made, specific overheads are calculated in the absence of scientific researches of different directions of national economy.

KEYWORDS: STAND, MODELING, TURBULENT MODE, LOSS OF VOLTAGE, LOCAL SUPPORT, NUMBER OF REINOLDS, HEAT LOSS, HEAT EXCHANGE, TEMPERATURE, ENERGY SAVING.

АННОТАЦИЯ

Черных Н.А. Анализ различных режимов движения теплоносителя в трубах и каналах.

Квалификационная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 144 - Теплоэнергетика, научный руководитель А.Н. Назаренко. Запорожский государственный университет. Инженерный институт. Факультет энергетики, электроники и информационных технологий, 2020.

Проведен патентный поиск и литературный обзор мировых лабораторных стендов для моделирования гидродинамических явлений и процессов теплопереноса в различных сферах народного хозяйства. Спроектирована и смонтирована установка для исследования ламинарных и турбулентных режимов движения теплоносителя. Составлен энергетический баланс потока для различных видов движения теплоносителя. Исследованы характерные зоны потерь давления при движении энергоносителя. Определены оптимальные режимы движения теплоносителя, моделирование явлений в строительной, геологической, гидрологической отраслях, позволило исследовать энергетические потоки при различных значениях чисел Фрухта и Нерста.

Использование различных типов местных сопротивлений позволяет исследовать сверхкритические параметры работы тепловых сетей. Выполнены исследования дистанционного управления стендом по различным сезонам года. Проанализирована компьютерная оболочка SolidWork для проведения

опытов в машиностроении, энергетике, работы с большими массивами данных.

Определены границы применения насосных аппаратов для эффекта кавитации для восстановления пресных водных ресурсов. Выведены числа кавитации при формировании смесей повторных вод. Выполнена экономическая оценка целесообразности внедрения гидравлического моделирования, рассчитаны удельные накладные расходы при отсутствии научных исследований различных сфер народного хозяйства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СТЕНД, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ТУРБУЛЕНТНЫЙ РЕЖИМ, ПОТЕРИ НАПОРА, МЕСТНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ТЕПЛОПТЕРИ, ТЕПЛООБМЕН, ТЕМПЕРАТУРА, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОНОСІЯ.	
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ	10
1.1 Постулати гідродинаміки	10
1.2 Класифікація колекторних систем	18
1.3 Шляхи вирішення проблем гідравлічної системи	20
1.4 Проведення пасивного експерименту	21
1.5 Визначення основних числових характеристик сукупності випадкових величин	28
1.6 Розрахунок оцінок математичного очікування, дисперсії і середнього квадратичного відхилення	28
1.7 Виключення експериментальних даних	29
1.8 Довірчий обсяг випробувань	31
1.9 Розробка регресійної багатофакторної моделі за даними активного експерименту	31
2 ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ТЕПЛОНОСІЯ	37
2.1 Дискретизація вищого порядку обмеженого руху теплоносія	37
2.2 Числовий формат	40
2.3 Чиста конвекція потоку теплоносія в коробчатому ступінчатому профілі	48
2.4 Числові схеми вищого порядку тепло, масо та передача імпульсу потоку рідини	54
2.5 Перше обмеження тесту	63
2.6 Числові результати першої задачі дослідження	66
2.7 Дослідження радіального обертання потоку	76
2.8 Числові результати другої задачі тесту	78
2.9 Застосування схеми NIMO до вивчення ламінарного потоку	82

2.10	Застосування схем вищих порядків точності NİMO до турбулентних течій	91
3	СТАБІЛІЗАЦІЯ ТА ПРИСКОРЕННЯ АЛГОРИТМУ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ РІДИНИ	99
4	ДИСТАНЦІЙНЕ ВИХРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКУ ТА ТЕПЛООБМІН В РЕБРИСТИХ КАНАЛАХ	107
4.1	Умови проектування обмежень	107
4.2	Числовий метод	109
4.3	Результати та обговорення	110
4.4	Реєстрація параметрів енергоспоживання і зниження витрат	112
4.5	Дослідження V-подібного ребристого каналу	119
5	ОХОРОНА ПРАЦІ	121
5.1	Загальні положення	121
5.2	Стан і аналіз охорони праці на підприємстві	125
5.3	Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів	126
5.4	Виробнича санітарія	130
5.5	Заходи з поліпшення умов праці	132
5.6	Пожежна безпека	133
5.7	Захист навколишнього середовища	133
	ВИСНОВКИ	134
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	136

ВСТУП

Вивчення наукових, технічних і методичних основ планування експерименту і статистичної обробки результатів вимірювань як активних методів досліджень в теплоенергетиці та гідродинаміці неможливо без активного та пасивного експериментів, що дозволяє скоротити терміни проведення і підвищити надійність одержуваної інформації.

Проектування та монтаж лабораторної техніки дозволяє наділити студентів навичками організації робіт, виконання монтажних робіт, проведення експерименту, дослідження та аналізу експериментальних даних.

Впроваджені обчислювальні методи для формування потоку рідини і передачі тепла для розробки або використання типових комп'ютерних кодів. Напрямки досліджень варіюються від основних методів, як кінцева різниця, кінцевий об'єм, кінцевий елемент, великолегке моделювання (LES) та пряме числове моделювання (DNS) до розширені та згладжені гідродинаміка частинок (SPH).

Проведені дослідження включають схеми UPWIND, QUICK, середньозважений коефіцієнт другого порядку забезпечення обмеженості (WACEB) і багатосхемове перекриття, що не пов'язане між собою (NIMO) кінцево-диференціальні та кінцево-об'ємні методи. Третій розділ надає огляд методів кінцевих різниць та кінцевих обсягів, що охоплюють дозвуківі дослідження до обчислення надзвукових потоків, чисельний аналіз стійкості, власне значення жорсткості проблеми, особливості дво- та тривимірної обчислювальної схеми та флюкс-вектори техніки розщеплення.

У четвертому розділі наведено огляд методу кінцевих елементів та його застосування для проблем з теплом та потоком рідини.

Чисельні стратегії для рішення великих систем рівнянь, що виникають внаслідок дискретизації кінцевих елементів вищезазначених сумішей. Для вирішення проблеми нелінійного потоку рідини / передачі тепла, дослідний

акцент робиться на відокремленій схемі на нелінійному рівні та ітераційних методах на лінійному рівні.

Для прикладу макро- та нанорозмірних застосувань використовуються тематичні дослідження. Досліджено безперервний та дискретний характер фазових моделей для імітації аерозольного транспорту та осадження субмікрометричних часток. Нарешті розглядається прискорення конвергенції нелінійних рішень потоку наскрізь використання методів, що використовують рекурсивні властивості методів фіксованої точки CFD.

1 АНАЛІЗ ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОНОСІЯ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ

1.1 Постулати гідродинаміки

Так як теорія рідин складається з двох частин, з яких одна, гідростатика, розглядає тиск й різні випадки рівноваги рідини у спокої, а інша, гідравліка, розглядає рух рідин. Знайдено, що вони пов'язані між собою настільки тісним зв'язком, що кожна з них дуже потребує допомоги з боку іншої [3].

Постулат 1. Хоча теорія рідин безперервно розроблялася з найдавніших часів, проте вона не отримала значного розвитку. Дійсно, пізнання древніх математиків обмежувалися тим, що вони розуміли загальну рівновагу рідин у спокої або твердих тіл і рідин, в яких тіла перебувають, про що писав Архімед. І так як, де немає рівноваги, виникає рух в напрямку меншого тиску, то, виходячи з цього, древні математики зуміли придумати гідравлічні машини, відмінно служать частиною для розваги, частиною для громадських потреб, і в цій справі вони дійсно виявилися вельми винахідливими.

Постулат 2. Для визначення руху рідин служило головним чином витікання води з посудини через дуже малий отвір. Хоча від уваги Фронтіна[4] та інших повністю не вислизнуло, як деякі вважають, що швидкість вод, що випливають із судини або з водойми, зростає при збільшенні висоти води над місцем витоку, проте не можна заперечувати того, що той же Фронтін при обчисленні коефіцієнтів витрати вод допустив грубі помилки. Бенедикт Кастеллі [5] перший розмірковував про зв'язок між швидкостями і висотами, але він припустив неправильний закон, вважаючи, що обидві вони слідуєть одному і тому ж відношенню. Нарешті, Торічеллі [6] зауважив, що швидкості зростають щодо квадратних коренів з висот, за ним пішли всі. Правда, до угоди про повну міру швидкості ще не прийшли, але поставили досліди, які, як вважали, визначають зазначену міру; з них зазвичай найбільше посилаються на досвід, який був проведений Гульєльміном [7] і потім вісім разів був повторений, хоча він сильно розходився з іншими дослідами виконаними у

цей час, але всі досліди проведені при неоднакових обставинах, зазвичай розходяться між собою, і не завжди виявляються надійними (швидкість води за кількістю її, що випливає за певний час через певний отвір). Якщо ми зробимо розрахунок Гульєльмінова досвіду, про який ми щойно згадали, то на підставі кількості води, що витекла через даний отвір протягом заданого часу, довелося б зробити висновок, що швидкість її була не вище тієї, яка відповідає четвертій частині висоти поверхні води над отвором.

Згідно з цими дослідями, вода що випливає могла б зі своєю швидкістю піднятися на дві третини висоти рівня води над отвором. У Маріотта [8] і у інших є досліди, які говорять на користь половини висоти. Незважаючи на відмінність оцінених таким чином швидкостей, справжні швидкості чи відрізняються один від одного, якщо їх віднести до відповідних висот води, і що всюди вони були приблизно такими, які відповідають всій висоті. Але ті численні досліди, які були згадані останніми і які на перший погляд говорять як ніби на користь половини висоти, без сумніву спонукали Ньютона, чоловіка безсмертного за своїми заслугами, створити теорію, по якій вода, що піднімається вертикально вгору з посудини через дуже малий отвір, може піднятися на половину висоти води, яка покоїться в посудині, хоча це твердження і суперечить всім дослідям, проведеним безпосередньо для визначення цих висот, ДТУ теорію він виклав у першому виданні «Математичні постанови природної філософії»[9], вивівши її з тиску, що приводить в рух воду, яка знаходиться перед самим отвором і якраз повинна вийти назовні. Але так як суть справи не завжди дозволяє, аргіогі визначити силу, що спонукує воду до витікання, а скоріше про неї можна скласти, собі уявлення іншим шляхом, а саме на підставі явищ руху, тобто *posteriori*, в переконанні, то міркування, засноване на зазначеному положенні, вселяє підозру.

Але хоча не можна заперечувати того, що згадане вище стиснення водяного струменя є справжньою причиною, внаслідок якої не можна про швидкість витікання води судити на підставі її кількості, проте я вважаю, що

не можна будувати теорії, ґрунтуючись на явищі стиснення, так як воно є випадковим, не скрізь постійним, між тим як швидкість змінюється. Так, якщо вода впливає не через просте отвір, а через циліндричну трубку, то струмінь помітно не стискується і швидкість зберігається, за винятком того, що у неї віднімається внаслідок тертя. Якщо ж хто-небудь, не дивлячись на це, вважає, що протягом води можна правильно і надійно вивести з тиску, то треба звернути увагу на більш складні випадки, наприклад на закінчення вод з посудини, розділеного за допомогою деякої перегородки з просвердленим в ній отвором на дві порожнини, які заповнюються водою, так що воду змушують протікати через два отвори.

Постулат 3. При зазначених вище обставинах всякий легко сам розсудить, наскільки мало залишається надії на те, щоб коли-небудь закони руху рідин були зведені до законів чистої геометрії без будь-якої фізичної гіпотези, якщо на самому порозі їх вивчення вони випали з поля прозорливості людини всесильної і незрівнянної за своїми здібностями.

Початок справжньої теорії є фізичним, і не без деякого перебільшення його слід вважати приблизно вірним, але якщо взяти ці початки, то все стане геометричним, що не потребує будь-яких обмежень і пов'язане між собою зв'язком.

Постулат 4. Відмінність швидкостей при зміні висот, розглядається складніші судини, а саме складені з різнонахилених і неоднакової ширини труб. Властивості ж останніх свого часу до деякої міри встановив Фронтін. Фронтін добре знав, що коефіцієнт витрати труб збільшується з похилим або низьким положенням труби, яка вставлялася в джерело, а іноді і в річку, в силу цього він також вказував, що ці склянки слід встановлювати, по лінії і розташовувати на рівній висоті. Виходячи саме з цього, деякі неправильно звинувачували Фронтіна в тому, що він абсолютно не взяв до уваги швидкості. Шляхом досвіду він також встановив, і це заслуговує бути відзначеним, що через стакан встановленого розміру, та положення, витрачається води більше

належного, якщо до нього приєднуються патрубки більшого коефіцієнта витрати.

Постулат 5. Швидкість води, що тече по похилій трубці, тотожна з тією, яку вона мала б, якби витікала з посудини через подібне і рівне по перетину отвору, віддаленому від поверхні на стільки ж, на скільки перетин в похилій трубці відстоїть від горизонталі.

Сила тиску рідини, що обрушується із заданою швидкістю під прямим кутом на поверхню, дорівнює вазі побудованого на цій поверхні циліндра рідини, висота якого, падаючи з неї вільно зі стану спокою, рухоме тіло набуває швидкість рідини.

Постулат 6. Крім вищезазначених, більш знаменитими авторами робіт з питань рідин, з часів Галілея є Торічеллі, Бореллі, Вівіані, Паскаль, Бойль, а в пізніший період Варіньон, Ньютон, Полени, Германн, Яків і Йоганн Бернуллі [14], відкриття яких поміщені в «Коментарях королівської Академії наук в Парижі», «Математичних засадах натуральної філософії», в трактаті «Про джерела» і в примітках до Фронтін, в «Форономії» та в працях вчених, що видаються в Європі. Що ж стосується викривлень, які утворюються в результаті тиску рідини, і інших подібного роду відкриттів, зроблених математиками, то їх так само, зводять до чистої геометрії.

Постулат 7. Викладаються найважливіші теореми, що стосуються рівноваги рідини, що покоїться. Понад те, попутно розглядаються деякі явища в капілярних трубках і, нарешті, в зв'язку з тиском, що стосуються форми бульбашок [15], наповнених рідиною, їх здатності піднімати тяжкості, пристрої та місцеві опори водопроводів та інших суміжних питань.

Постулат 8. Мова йде про рух рідин, що впливає із резервуару. Коли отвір судини можна розглядати як нескінченно мале, внутрішня форма резервуару грає малу роль. Однак без знання форми посудини не можна визначити рух води в тому випадку, коли отвір має значний розмір. Коли внутрішні перетини навіть помітно перевершують перетин отвору, помилка невідчутна.

Звертаємо увагу на неможливість визначення тиску води, що протікає в потоці із заданою швидкістю, на її стінки, якщо тільки не будуть збагнені розумом миттєві зміни, які недоступні чуттєвому сприйняттю.

Постулат 9. Теорія поширюється на дослідження рухів з постійно наповнених судин, з постійною витратою води. Їх особливість полягає головним чином в тому, що впливають рідини все більше і більше наближаються до того рівня швидкості, яка відповідає повній висоті поверхні рідини над отвором, проте ніколи повністю її не досягає, хіба тільки через нескінченний час.

Але при цьому доводиться, що води прагнуть до зазначеної вище швидкості настільки швидко, що вже через невідчутно короткий час вони отримують майже всю швидкість, якщо тільки вони не проносяться по дуже довгих каналах та водопроводам і викидаються отвором широкого розтину. Саме в цьому останньому випадку прискорення не є настільки швидкими, щоб їх не можна було помітити, що підтверджується особливим прикладом [11].

Постулат 10. Надалі розглядаються рідини, що рухаються усередині судин, причому переважно піддаються вимірюванню їх зворотні або коливальні рухи і розраховують їх властивості. Ньютон дав подібну теорему про коливання рідини в трубі рівномірної ширини (два крайні коліна у неї вертикальні, а середнє горизонтально).

Теорія охоплює питання без будь-якого обмеження, розглядаючи труби, які змінюються в окремих місцях довільно або у напрямку, або по положенню, а також по перетину. Випадки коливання з різними амплітудами будуть ізохронними, звідки дуже загально визначається довжина простого ізохронного маятника. Але, крім цього роду коливань, досліджуються і деякі інші, наприклад коливання, які утворюються в трубах, занурених в воду, не обмежену посудиною, або навіть в обмежену кількість води.

Постулат 11. Загальноприйнятий закон про стрибок води до вищого рівня води абсолютно не виправдовується, так як в даному випадку перестають діяти звичайні закони тиску. Таким чином, не існує нічого, що в

більшій мірі підтверджувало б перевагу положень; дійсно, вироблені досліди не дозволяють більше в цьому сумніватися. Ці дослідження є до того ж дуже корисними, так як вони можуть мати велике значення при влаштуванні гідравлічних машин.

Постулат 12. Для багатьох вельми поширених гідравлічних машин чисельно розраховується наближення до межі. До цього додаються правила або настанови, які слід брати до уваги при влаштуванні нових машин. Як приклад, машина Марлі, про яку доводиться, що вона дає не більше приблизно однієї п'ятдесят шостої частини тієї кількості води, яке за інших рівних умов теоретично могла б дати найбільш досконала машина.

Постулат 13. Пропозиції та завдання цієї частини є новими, і вони обрані з таким розрахунком, щоб могли дати можливість пояснити багато фізичних питань або навіть їх дозволити [17]. До цього додається дещо про оцінку живих сил пружних рідин, що, можливо, коли-небудь виявиться недаремним в механічній практиці

Постулат 14. Далі мова йде про круговий рух рідин і про рідини, що покояться в рухомих посудинах; до цього додається і багато іншого. Те, що тут викладається про круговому русі, може деяким чином послужити для пояснення явищ тяжкості за допомогою вихорів.

Постулат 15. Після викладу теорії руху ми знову повертаємося до рівноваги рідин, але рідин рухомих, закони яких до сих пір не розглядалися. Вражаюче, що в той час, як в інших випадках рух визначається на підставі тиску, тут навпаки тиск виходить з руху.

На основі поданих правил з'ясувалось прискорення прилеглої частки води, дуже близькою до витікання. На підставі цього прискорення можна було скласти уявлення про тиск на зазначену частку води, яке, відповідно до природи рідких тіл, дорівнює тиску на стінки труби. Після того як цей тиск визначено, стає ясно, що повинно було б статися, якби труба була в тому ж самому місці просвердлені і якби отвору відповідала приставні трубочка [18].

Постулат 16. Так, витікаючи через отвір, вода абсолютно тисне в протилежну сторону на посудину.

Постулат 17. В дослідах допускається геометрична дедукція з прийнятих початків. Але так як в теорії не існує нічого настільки строго доведеного, що вже не вимагало б деякого обмеження в застосуванні до тіл природи, то звідси легко випливає, що не слід очікувати такої теорії рідин, яка цілковитим чином задовольняла усім вимірам.

Постулат 18. Найважливішим початком є зберігання живих сил, або рівність між дійсним опусканням і потенційним підйомом.

Постулат 19. Після того як Галілей показав, що тіло, падаючи вертикально або ж по будь-яким чином вигнутій поверхні, набуває одну і ту ж швидкість, якщо тільки висота падіння однакова, що може бути доведено на підставі природи тиску, Гюйгенс щасливо використовував цю пропозицію, але для більш загального допущення, при виведенні законів руху пружних тіл внаслідок удару, а також при встановленні центру гойдання складного маятника.

Постулат 20. Щось подібне вдається при розрахунку руху вод, де іноді очевидно, що частина потенційного підйому безперервно втрачається.

Постулат 21. Дійсно, коли виходить, що потенційний підйом не може повністю зберегтися по самій природі речей і що не можна передбачити, яка частина його поглинається, то це означає, що рух рідин не може бути визначено досить точно, і я не думаю, щоб це могло бути зроблено за допомогою будь-якого іншого методу.

Постулат 22. Виявилось необхідним ввести ще одне припущення, а саме наступне: після того як, звичайно подумки, ми уявили собі рідину розбитою на шари, перпендикулярні до напрямку руху, ми допускаємо, що частинки рідини одного і того ж шару рухаються з однаковою швидкістю, так що швидкість рідини виявляється всюди обернено пропорційній відповідного перетину судини.

Це припущення і було використано, хоча, втім, відомо, що внаслідок тертя рідина у стінок посудини тече трохи повільніше, а по середині швидше і що поряд з цим слід допустити і ще деякі інші відступу.

Постулат 23. Правда, дуже багато зауважень зустрічається і в самій роботі, але в силу того, що вони вимагають обчислень я на них тепер не стану посилатися. Дуже просто і ясно те, що відбувається з краплею, яка впала на воду, що покоїться; саме вона збуджує на поверхні води кола, причому їх буває тим більше, чим більше була крапля або чим з більшої висоти вона впала, і немає сумніву, що ці кола поширювалися б без кінця, якби цьому не перешкоджали в'язкість води і інші подібні обставини.

Часом можна спостерігати і інший ефект від подібного роду крапель, коли кілька менших крапельок відкидається вгору поверхнею нижче розташованої води; в цьому випадку завжди виявляється, а це особливо має сюди відношення, що крапельки піднімаються тим вище, чим менше їх було числом і чим вони були дрібніше за обсягом. Коли висота падіння становила два метри, то менші крапельки часто піднімалися вище висоти падіння, особливо, коли вода капала з великого отвору.

Постулат 24. Звичайно, перш за все всі сходяться зазвичай на тому, що будь-яким рідким тіл притаманне внутрішній рух, без якого справді ніхто не може правильно зрозуміти настільки велика їх плинність, закипання різних рідин, розчинення твердих тіл, занурених у рідину, випаровування та інших незліченних явищ.

Цим пояснюється, що дуже багато вельми тверді предмети плавляться від достатньої спеки. Це внутрішній рух призводить до того, що частинки перестають стикатися один з одним, але як би вільно літають туди і сюди, в результаті чого вони, не відчуваючи тертя, від найменшого імпульсу зсуваються з місця.

1.2 Класифікація колекторних систем

Колекторна система взагалі складається з розподільчого та збирального колекторів та з'єднувальних елементів між ними, однак може й не містити одного чи двох з цих трьох складових системи.

По схемі підключення колекторні системи підрозділяються на «П» схеми, «Z» схеми та «комбіновані», по конструкції колектори можуть бути розділені по різним ознакам:

- по геометрії – умовно довгі та короткі, в залежності наприклад від відношення довжини до діаметра;
- по конфігурації – прямі та непрямі (вигнуті, замкнені, розвітвлені);
- по виду перетину – круглі, прямокутні, складної форми, з постійним перетином, змінним перетином, при змінному перетині можливо безперервна зміна перетину та ступінчасті в цьому випадку колектори називають телескопічними;
- по виконанню відбору – у вигляді отворів, циліндрична насадка з різним відношенням довжини насадки та діаметра, насадків складної конструкції для одинарних колекторів, у вигляді патрубків, під'єднаних гідравлічних елементів до колекторів, труб пористої плівки, яка розділяє розподільчі та збиральні колектори:
 - по шагу відборів – постійний та змінний, великий та малий шаг відборів (залежно від відношення шагу до діаметру колектору);
 - по перетину відборів – постійний та змінний по довжині колектору;
 - по куту приєднання відборів – під прямим та непрямым кутом до колектору;
 - по розташуванню відборів на утворюючому колекторі – симетрично чи несиметрично.

По режиму течії рідини в колекторній системі можливі варіанти:

- турбулентна та ламінарна течія як в колекторних так в з'єднаних каналах;

- турбулентна течія в колекторах та ламінарна в з'єднуючих каналах.

Крім того на характеристики колекторної системи впливають відношення опору, з'єднувальних елементів та загального опору колекторної системи, характер гідравлічних опорів.

Використаємо феноменологічний метод опису явищ, оснований на встановленні деяких загальних відношень між параметрами, визначаючими явища в цілому. Це визначає сутність та універсалізм опису середовища, яке представляється наділеними властивостями, не залежно від безкінечно малих обсягів до розглянутого середовища.

Загальні рівняння фізики сполушних середовищ – рівняння збереження речовини, енергії та кількості руху.

Рівняння збереження речовини – для гомогенного середовища - рівняння нерозривності. Для загального випадку трьох мірної течії воно має вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) = 0, \quad (1.1)$$

де ρ – щільність, кг/м³;

u, v, w – проекції вектору швидкості відповідно на осі, м/с;

t – час, сек.

При встановленому потоці

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (1.2)$$

Нарешті для встановленого потоку нестискаємої рідини ($\rho = \text{const}$)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (1.3)$$

Рівняння збереження енергії для руху рідкого середовища об'єднає принципи збереження механічної енергії з першим законом термодинаміки

$$\frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta A_{\text{к}}}{dt} - \frac{\delta A_{\text{тр}}}{dt} = \frac{dE}{dt}, \quad (1.4)$$

де $\frac{\delta Q}{dt}$ - підведене тепло від зовнішньої середовища до системи;

$\frac{\delta A_{\text{к}}}{dt}$ - робота сил тиску, діючої на межі системи (нормальні напруження);

$\frac{\delta A_{\text{тр}}}{dt}$ - робота сил опору діючих на межі системи (дотичні напруження);

Збільшення енергії системи, включаючи внутрішню, потенціальну та кінетичну енергії.

1.3 Шляхи вирішення проблем гідравлічної системи

Визначимо три загальних групи таких рішень. В першій з них використовується складний математичний апарат теоретичної гідродинаміки доданої до достатньо простих схем руху рідини, при допущеннях та пропозиціях складної картини руху рідини. До речі, при переході не вводяться осереднені характеристики потоку. К ним відносяться задачі ламінарного течії в каналах з пористими стінками при умові рівномірного відбору рідини через пористу стінку, які вирішуються інтегруванням рівняння Нав'є – Стокса аналітично та числовими методами. При цьому отримуємо детальну картину течії в каналі – профілі швидкості, як паралельних осі каналу, так і

перпендикулярних до неї, а також залежно для коефіцієнтів тертя и перепаду тиску. Число вирішених для практичного використання задач не багато.

В двох інших групах рішень використовуються методи технічної гідромеханіки (гідравліки), що базується на результатах експериментальних досліджень, суттєво спрощених картинах течії визначаються та оцінках тільки головних характеристик вивчає мого явища, які визначені осередненими характеристиками.

В колекторах з дискретним відбором розрахунок здійснюється послідовно від одного вузла до іншого. Цей підхід поширюється на колектори з близько розташованими відборами, коли вони можуть бути замінені теоретичною щілиною, забезпечуючи безперервний відвід рідини з колектору, але при умові, що всі закономірності зміни тиску та витрати зберігаються такими ж як в реальному випадку дискретного відбору.

Для безперервного відбору рідини з колекторів використовуються інші систем рівняння. Обидва ці випадки містять багато припущень та потребують перевірки експериментальних даних. Ці обставини, органічно витікаючи з методів технічної механіки, наряду з багатоваріантними конструктивними та режимними факторами, характеризують роботу колекторних систем напівемпіричними та емпіричними співвідношеннями. При розгляданні складних систем користуються загальними принципами добре організованих систем, дифузних систем. В добре організованих системах можна виділити явища та процеси фізичної хімії, залежних від кількості змінних.

1.4 Проведення пасивного експерименту

Отримання наукових фактів здійснюється, головним чином двома шляхами:

- проведенням активних експериментів, чому присвячений перший розділ;
- виконанням польових досліджень.

Структурну схему пасивного експерименту легко можна отримати, перетворюючи схему активного експерименту (рисунок 1.1), для чого потрібно зі схеми прибрати X - регульовані (керовані) фактори. Однак частково деякими чинниками можна управляти і в пасивному експерименті. Наприклад, можна задавати глибину розміщення піддослідних гідробіонтів, глибину і орієнтацію експериментальних субстратів, щільність розміщення мікробів в експериментальному коші, а також їх вік, індивідуальну вагу і т.д. Але, в основному, спостерігач має справу з некерованими факторами - він тільки вимірює їх значення і записує в журнал. У той же масив даних заносяться і вихідні дані об'єкта дослідження (залежна змінна). Такими характеристиками можуть бути: первинна продукція, біомаса, чисельність, споживання кисню, кількість осіб, які потрапили в мережу в якості приливу і т.д.

Як приклади з інших галузей можна привести: попит на певний товар, обсяг реалізованої продукції, відсоток безробітних в районі, відсоток вуглецю в чавуну, що виплавляється в доменній печі і т.д.

Незважаючи на те, що в польових дослідженнях управляти факторами важко, а частіше - неможливо, збір матеріалу повинен виконуватися за певним планом. Наприклад, при вивченні добової динаміки первинної продукції в бухтах на різних горизонтах (глибинах). У такому експерименті можна задавати глибину розміщення експериментальних судин і тривалість експозиції цих судин в воді.

Для планування даного пасивного експерименту доцільно використовувати латинський квадрат. У такому плані латинські букви будуть позначати різні групи (елімінує угруповання), по горизонталі задаються різні рівні фактори «глибина», а по вертикалі - тривалість експозиції експериментальної рідини. В результаті експерименту будуть отримані:

а) добова динаміка первинної продукції на різних горизонтах незалежно від місця проведення експерименту;

б) залежність первинної продукції від глибини, незалежно від місця проведення експерименту.

Тобто, будуть отримані універсальні залежності, які можна використовувати для загальних підходів при вивченні первинної продукції в гідравлічній зоні комунікацій. Однак при більш детальному дослідженні первинної продукції в конкретному плані, доведеться використовувати інші плани.

В даний час дані практично завжди обробляються на комп'ютері. Однак, з причини широкого застосування регресійного аналізу в наукових дослідженнях, в проведенні активних і пасивних експериментів, в даному розділі розглянуто ручну обробку даних спостережень.

Далі викладено регресійний аналіз з використанням методу найменших квадратів (МНК) для одного фактору. Але на практиці доводиться працювати з багатофакторним об'єктами. У цьому випадку для розрахунку коефіцієнтів регресії потрібно скористатися апаратом матричної алгебри.

На рисунку 1.1 наведено дослідний стенд по гідродинаміці для дослідження різних видів руху теплоносія в робочих, надкритичних режимах роботи для виявлення можливості оптимізації теплових процесів.

На рисунку 1.2 показано витратомір КВ-1,5 для фіксування витрати рідини для об'єктивності експерименту та обробки даних.

На рисунках 1.3 - 1.6 показано основні елементи установки, які допомагають збирати реальні дані по зміні руху та стану теплоносія.

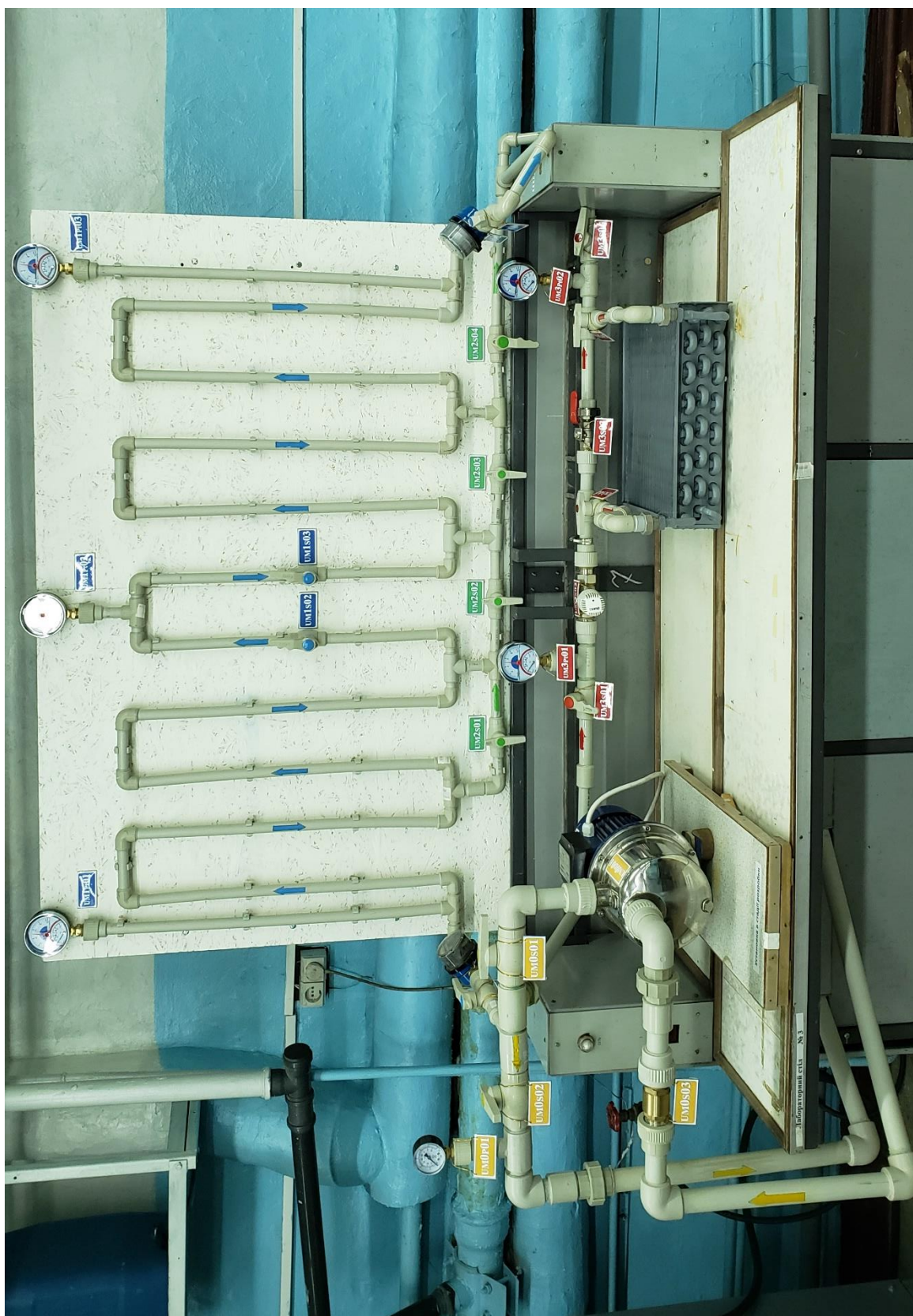


Рисунок 1.1 – Гідравлічний стенд для перевірки якості теплоносія

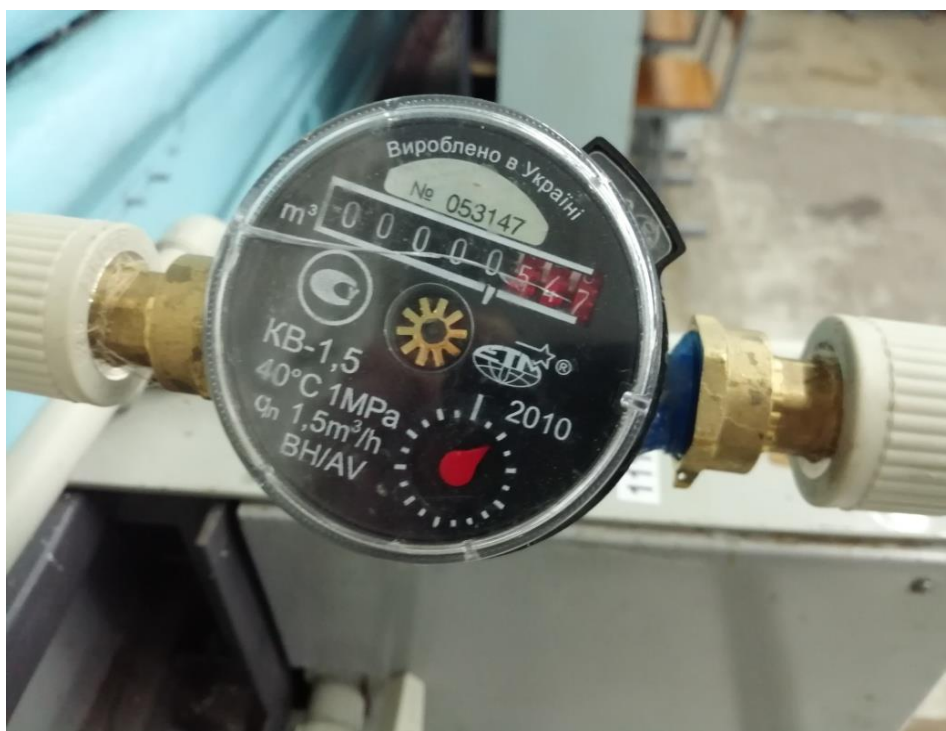


Рисунок 1.2 – Витратомір на лабораторному стенді

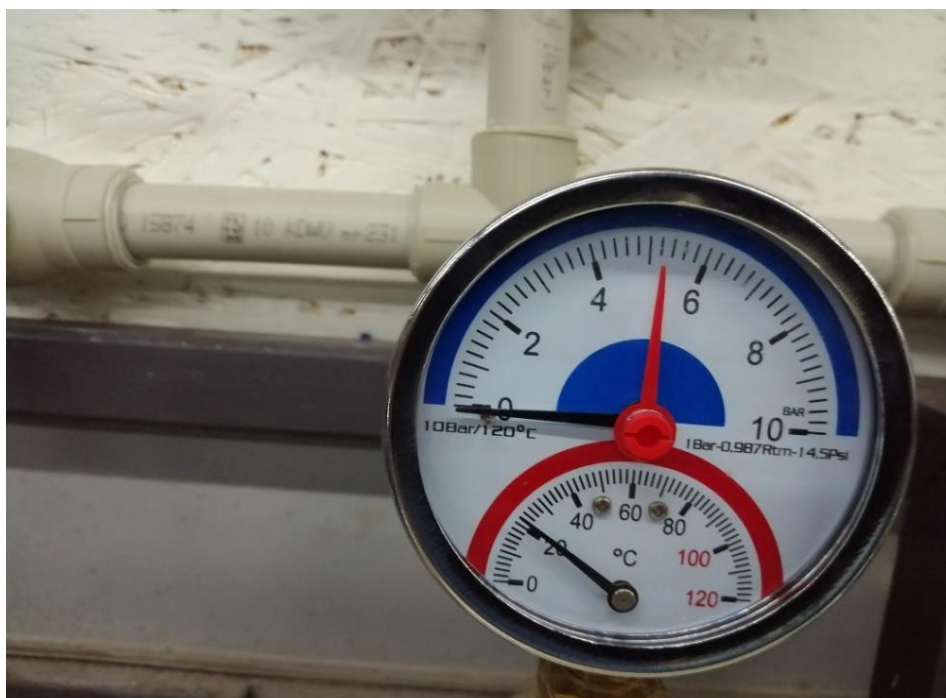


Рисунок 1.3 – Датчики тиску та температури на кожній ділянці установки



Рисунок 1.4 – Циркуляційний насос лабораторної установки



Рисунок 1.5 – Циркуляційний бак лабораторної установки



Рисунок 1.6 – Технологічна схема установки перевірки гідравлічних та місцевих опорів комунікацій

1.5 Визначення основних числових характеристик сукупності випадкових величин

При вимірюванні властивостей енергетичних рішень і розробці методів оцінки технологічних параметрів, як правило, вивчається сукупність випадкових величин, яка може бути визначена основними числовими характеристиками: середнім, дисперсією, коефіцієнтом варіації, квадратичною нерівномірністю і так далі. Відомо, що числові характеристики змінюються від вибірки до вибірки і є також випадковими величинами, які варіюють із заданою довірчою ймовірністю в певному інтервалі. Чим більше помилка числової характеристики, тим ширше інтервал. Точність кожної числової характеристики визначається її помилкою, а надійність - довірчою ймовірністю. Переймаючись точністю і надійністю при відомій дисперсії випадкової величини, можна визначити довірчий обсяг випробувань для оцінки числової характеристики.

Отримання сукупності випадкових величин. Для ознайомлення з методикою визначення основних числових характеристик сукупності випадкових величин необхідно отримати дану сукупність. Вона може бути отримана на дослідному стенді (міцність, подовження), вагах (маса теплоносія, довжина труби або тиск), манометр (падіння тиску) і інших приладах.

1.6 Розрахунок оцінок математичного очікування, дисперсії і середнього квадратичного відхилення

Математичне сподівання \bar{Y} (середнє значення) визначає центральний розподіл випадкових величин, біля якого групується велика їх частина. Абсолютними характеристиками розсіювання випадкової величини Y біля центру розподілу \bar{Y} є дисперсія $S_2 \{Y\}$ і середньоквадратичне відхилення $S \{Y\}$.

Розрахунок оцінок математичного очікування, дисперсії і середнього квадратичного відхилення для аналізованої вибірки здійснюється за такими формулами:

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i; \quad (1.5)$$

$$S^2\{Y\} = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (Y_i - \bar{Y})^2; \quad (1.6)$$

$$S\{Y\} = \sqrt{S^2\{Y\}}. \quad (1.7)$$

1.7 Виключення експериментальних даних

Сукупність отриманих експериментальних даних часто має значення, що різко виділяються щодо інших, що призводить до постановки питання про їх виключення з подальшої обробки. Причиною появи таких даних може бути зміна умов проведення досвіду в момент спостереження, помилкова реєстрація параметра (з вини оператора) і т.д. Незалежно від причин отримання даних що різко виділяються вони можуть істотно спотворити числові характеристики. З іншого боку, при необґрунтованому виключенні таких даних числові характеристики також будуть спотворені.

Найнадійніший метод визначення можливості виключення різко виділених даних - це аналіз умов, при яких вони були отримані. Якщо умови істотно відрізняються від стандартних (або встановлених за планом експерименту), то дані необхідно виключити з подальшої обробки незалежно від їх величини. Якщо визначення суттєвості зміни умов експерименту неможливо або представляє великі труднощі, то використовують статистичний метод виключення даних, сутність якого полягає в наступному:

- знаходять в сукупності максимальну і мінімальну величини і визначають розрахункові значення критерію Смирнова-Граббса:

$$V_{R \max} = \frac{Y_{i \max} - \bar{Y}}{S\{Y\}} \cdot \sqrt{\frac{m}{m-1}}; \quad (1.8)$$

$$V \frac{\bar{Y} - Y_{i \min}}{S\{Y\} \sqrt{\frac{m}{m-1}}} \leq V_{R \min}; \quad (1.9)$$

- порівнюють отримані значення з табличним VT, якщо VR max або VRmin більше VT, то відповідне значення Yi необхідно виключити з сукупності, а потім повторити розрахунок оцінок \bar{Y} , $S_2\{Y\}$ і $S\{Y\}$;
- процедуру повторюють до повного виключення різких значень з сукупності.

Визначення помилки середнього і кордонів довірчого інтервалу. В результаті вимірювань досліджуваного параметра виникають помилки (похибки вимірювання), для опису яких введені оцінки абсолютної ε_i і відносної δ_i похибки.

Абсолютна і відносна довірчі помилки, допущені при оцінці математичного очікування, визначаються за формулами:

$$\varepsilon\{\bar{Y}\} = \frac{2 \cdot S\{Y\}}{\sqrt{m}}; \quad (1.10)$$

$$\delta\{\bar{Y}\} = \frac{2 \cdot C\{Y\}}{\sqrt{m}}. \quad (1.11)$$

Двостороннім довірчим інтервалом називається інтервал, який покриває невідомий параметр розподілу із заданою довірчою ймовірністю PD

$$\bar{Y} - \varepsilon\{Y\} \leq \bar{Y} \leq \bar{Y} + \varepsilon\{Y\}. \quad (1.12)$$

В практиці теплотехнічних досліджень при статистичній обробці приймають $P_D = 0,95$. Величину, рівну $\alpha = 1 - P_D$, називають рівнем значущості, %.

1.8 Довірчий обсяг випробувань

Аналізуючи точність оцінки середнього значення, можна вирішити, чи є вона достатньою або потрібне збільшення обсягу вимірювань. Переймаючись необхідної величиною відносної помилки ($\delta = 3\%$) і прийнявши квадратичну нерівномірність за даними попередніх дослідів або інший апіорної інформації, можна розрахувати довірчий обсяг вибірки

$$m\{\bar{Y}\} \geq \left(\frac{u\{P_D\} \cdot C\{Y\}}{\delta\{\bar{Y}\}} \right)^2, \quad (1.13)$$

де $u\{PD\}$ - квантиль нормального розподілу випадкової величини (при $PD = 0,954$ и $u\{P_D\} = 2$).

1.9 Розробка регресійної багатофакторної моделі за даними активного експерименту

В даний час в наукових дослідженнях широке застосування отримали математико-статистичні методи планування експериментів, в яких математичний апарат відіграє активну роль, диктуючи досліднику певну схему постановки експерименту і послідовність аналізу результатів.

В задачу планування експерименту входить:

- вибір необхідних для експерименту дослідів, тобто побудова матриці планування;
- вибір методів математичної обробки результатів експериментальних.

Матриця планування експерименту є таблицею, в якій вказані значення рівнів чинників в різних серіях дослідів. Матриці планування повинні задовольняти ряду вимог:

- ортогональність - незалежність одержуваних коефіцієнтів регресії і можливість виключення членів моделі з незначними коефіцієнтами без подальшого перерахунку значущих коефіцієнтів;
- ротатабельність - сталість дисперсії вихідного параметра на рівних відстанях від центру експерименту;
- уніформно - сталість дисперсії вихідного параметра в деякій області навколо центру експерименту.

Експеримент, який реалізує всі можливі неповторювані комбінації рівнів досліджуваних факторів, називається повним факторним експериментом (ПФЕ). Він застосовується для отримання регресійної багатофакторної моделі (РБФМ) при дослідженні локальної ділянки факторного простору, який не відповідає його екстремальній частини РИМ, одержувана за результатами ПФЕ, має вигляд лінійного полінома

$$Y_R = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_M \cdot X_M, \quad (1.14)$$

або неповного полінома другого порядку

$$Y_R = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots + b_i \cdot X_i + \dots + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{ij} x_i x_j + \dots + b_{M-1} \cdot X_{M-1} X_M, \quad (1.15)$$

де Y_R - розрахункове значення вихідного параметра;

x_i - кодовані значення рівнів чинників;

b_i, b_{ij} - значення коефіцієнтів регресії;

$i = 1, \dots, M; j = 1, \dots, M$ - номер фактору.

При факторному плануванні, на відміну від традиційного (однофакторного), по величині коефіцієнтів регресії b_i, b_{ij} в РМФМ можна судити про вплив на вихідний параметр не тільки кожного фактору x_i , але і їх взаємодії $x_i x_j$, тобто зміни впливу одного фактору при переході другого фактору на інший рівень.

Розробка матриці планування. Для складання матриці планування необхідно визначити необхідну кількість дослідів

$$N = kN, \quad (1.16)$$

де k - число рівнів варіювання кожного фактору, змінюючи яке можливо зменшувати або збільшувати N .

Необхідно врахувати, що для обчислення коефіцієнтів регресії шуканого рівняння (1.14) має дотримуватися умова $N - N_k$ (N_k - число коефіцієнтів регресії в РМФМ), а для оцінки його отриманої моделі ця умова посилюється, тобто $N > N_k$.

У матриці планування використовуються кодовані значення рівнів фактору:

- а) (-) - нижній рівень фактору (дорівнює -1);
- б) (+) - верхній рівень фактору (дорівнює +1).

Для дворівневого трьохфакторного експерименту (23) матриця ПФЕ містить вісім дослідів (форма таблиці приведена нижче).

Знаходження статистичних характеристик. Знаходимо середні значення функції відгуку по рядках і порядковий дисперсії $S_{2u} \{Y_u\}$ за формулами

$$\bar{Y}_r = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_{ui}; \quad (1.17)$$

$$S_u^2 \{Y_u\} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Y_{ui} - \bar{Y}_u)^2, \quad (1.18)$$

де m - число повторень досвіду.

Якщо число повторних дослідів m однаково для всіх дослідів матриці, то для перевірки однорідності дисперсій застосовується критерій Кохрена, розрахункове значення якого визначається за формулою

$$G_R = \frac{S_u^2 \max\{Y\}}{\sum_{u=1}^N S_u^2\{Y\}}. \quad (1.19)$$

Розрахункове значення G_R порівнюють з табличним значенням G_T , яке визначають (додаток Ж) в залежності від числа дослідів в матриці N і числа ступенів свободи дисперсії $f\{\} = m - 1$ для заданої довірчої ймовірності. Якщо $G_R < G_T$, то гіпотеза про однорідність дисперсій приймається, якщо немає - слід застосувати методу виключення різко виділяються величин або знайти причину виникнення великої дисперсії в u -м досвіді, а потім повторити (повністю або частково) експериментальну частину роботи.

Якщо число дослідів m -різному для різних дослідів матриці, то для перевірки гіпотези про однорідність дисперсій в дослідях матриці застосовується критерій Бартлета.

Обчислення дисперсії відтворюваності вихідного параметра в дослідях матриці. Якщо в дослідях матриці дисперсії однорідні і число повторних дослідів однаково, то середня дисперсія визначається за формулою

$$S_{\text{восп}}^2\{Y\} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^m S_u^2\{Y\}. \quad (1.20)$$

Обрахування коефіцієнтів шуканого рівняння (моделі). Коефіцієнти регресії визначаються по таким формулам:

$$\begin{aligned} b_i &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} \bar{Y}_u \quad (i = 0, 1, \dots, M); \\ b_{ij} &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} \bar{Y}_u \quad (i \neq j); \\ b_{ijl} &= \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} x_{lu} \bar{Y}_u \quad (i \neq j \neq l). \end{aligned} \quad (1.21)$$

В результаті підстановки знайдених коефіцієнтів в рівняння (1.20) виходить регресійна багатофакторна модель, яка, однак, не є остаточною моделлю досліджуваного процесу.

Оцінка значущості отриманих коефіцієнтів регресії. Значимість отриманих коефіцієнтів оцінюється за допомогою критерію Ст'юдента, розрахункове значення якого (для кожного коефіцієнта) визначається за формулою

$$t_R\{b_i\} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S^2\{b_i\}}}, \quad (1.22)$$

де

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{N} S^2\{\bar{Y}\}, \quad (1.23)$$

в свою чергу

$$S^2\{\bar{Y}\} = \frac{1}{m} S_{\text{восп}}^2\{Y\}. \quad (1.24)$$

Отримане розрахункове значення t_R порівнюється з табличним t_T , яке визначають за таблицею за умови, що $PD = 0,95$ і число ступенів свободи $f\{S^2u\} = N(m - 1)$.

Якщо $t_R\{b_i\} > t_T$, то коефіцієнт b_i значущий. Якщо $t_R\{b_i\} < t_T$, то коефіцієнт b_i незначущий, і його необхідно прирівняти до нуля, тобто виключити член $b_i X_i$ з моделі.

Необхідно враховувати, що значимість коефіцієнтів залежить не тільки від питомої впливу даного чинника на вихідний параметр, але і від інтервалу варіювання рівнів фактору. Не значимість може бути обумовлена малим інтервалом варіювання фактору, великою дисперсією відтворюваності внаслідок наявності некерованих і неконтрольованих факторів, а також розташуванням основного рівня фактору близько до точки приватного

екстремуму вихідного параметра за цим фактором. Після виключення незначущих коефіцієнтів записується шукана модель.

Перевірка адекватності отриманої моделі. Перевірку адекватності моделі можна проводити тільки за умови, що число проведених дослідів більше числа коефіцієнтів моделі. Спочатку визначається дисперсія неадекватності

$$S_{\text{над}}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N (\bar{Y}_u - Y_{Ru})^2}{N - N_{\text{зн.коэф.}}}, \quad (1.25)$$

де - число значущих (залишку) коефіцієнтів в моделі;

Y_{Ru} - повертаються моделлю розрахункові значення вихідного параметра, які визначаються для кожного досвіду шляхом підстановки в отримане рівняння відповідних значень вхідних параметрів.

Визначають розрахункові значення критерію Фішера

$$F_R = \frac{S_{\text{над}}^2\{Y\}}{S_{\text{восп}}^2\{\bar{Y}\}}, \text{ если } S_{\text{над}}^2\{Y\} > S_{\text{восп}}^2\{\bar{Y}\}, \quad (1.26)$$

$$F_R = \frac{S_{\text{восп}}^2\{\bar{Y}\}}{S_{\text{над}}^2\{Y\}}, \text{ если } S_{\text{восп}}^2\{\bar{Y}\} > S_{\text{над}}^2\{Y\}.$$

Розрахункова F_R значення критерію порівнює з табличним F_T , яке визначають за таблицею (додаток 3) за умови, що $PD = 0,95$, $f_{S^2u} = N(m - 1)$, $f_{\{S^2_{\text{над}}\}} = N - N_{\text{зн.коэф.}}$. Якщо $F_R < F_T$, то з ймовірністю PD гіпотеза про адекватність отриманої моделі приймається.

Якщо гіпотеза про адекватність відкидається, необхідно переходити до опису процесу поліномом другого порядку на базі іншого виду експерименту або, якщо це можливо, проводити експеримент з меншим інтервалом варіювання рівнів факторів. Однак невиправдане зменшення інтервалу варіювання може зумовити статистичну незначимість коефіцієнтів регресії.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ ТЕПЛОНОСІЯ

2.1 Дискретизація вищого порядку обмеженого руху теплоносія

Наближення потоків конвекції в рівняннях транспорту має вирішальне значення на загальну точність будь-якого чисельного рішення для потоку рідини та тепло передачі. Хоча конвекція представлена простою похідною першого порядку, її числове представлення залишається одним із центральних питань моделювання. Класичний перший порядок схем, як вітровий, гібридний та енергетичний закон, безумовно обмежуються, але, як правило, неправильно представляють дифузійний транспортний процес шляхом додавання чисельної чи «помилкової» дифузії, що виникає внаслідок перетину потоку. Схеми вищого порядку, такі як фактор другого порядку [1] та третій порядок факторів [2] запропонували маршрут для підвищення точності обчислень. Однак вони всі страждають від проблеми обмеженості; тобто рішення можуть виявлятися не фізичними коливаннями в регіонах крутих градієнтів, які можуть бути досить серйозними для спричинення числової нестабільності.

Протягом останніх двох десятиліть були зроблені зусилля для досягнення більш високої роздільності і обмеження схем. У 1988 році Чжу та Лещінер запропонували місцевий алгоритм демпфування коливань [3]. З моменту запровадження схеми внесок вихідного фактору, вводиться дифузія другого порядку в ті регіони, де проявляється необмежена поведінка. У 1988 році Леонард [4] розробив нормовану форму змінної та представив високу роздільну здатність обмеженої схеми під назвою SHARP (проста програма з високою точністю роздільної здатності). Гаскелл і Лау [5] розробили схему під назвою SMART (гострий і монотонний алгоритм для реалістичного транспорту), де використовується конвектив, компенсований кривизною транспортного наближення та кусково-лінійна нормалізована змінна формулювання.

Однак чисельне тестування [6] показує, що і SMART, і SHARP потрібні недоліки вимірювання у кожній з керованих об'ємних лицьових клітин для зниження поведінки коливальної конвергенції. Цей недолік призводить до збільшення показника вимоги комп'ютера, особливо для обчислення тривимірного потоку.

У 1991 році Чжу [7] запропонував гібридну схему лінійного / параболічного наближення (HLPA). Однак цей метод має точність лише другого порядку.

У цьому дослідженні для інтерполяції застосовують середньозважений склад змінних на гранях комірок і середньозважений коефіцієнт визначається на основі нормованої формули змінної та обмежень зменшення загальної варіації (TVD).

Досліджуються три тестові справи: чиста конвекція крокової форми профілю в полі косої швидкості, раптове розширення поля косої швидкості в порожнину, і ламінарний потік через перешкоду. Обчислення проводяться на узагальненому вигляді криволінійної системи координат. Схеми реалізовані викладеними корекційними підходами.

Обчислені результати порівнюються з результатами, отриманими з використанням підходів та схеми повернення та доступні експериментальні дані.

У дослідженнях є три основні категорії, які слід враховувати для потоку:

1. Математичні моделі - фізичні форми поведінки, які слід прогнозувати повністю залежать від математичних моделей. Вибір математичних моделей ретельно робити, наприклад, невидимий або в'язкий аналіз, моделі турбулентності, включення плавучості, обертання, ефектів Коріоліса, коливання щільності, тощо.

2. Числові моделі - підбір числової техніки дуже важливий для судження незалежно від того, чи можна моделі ефективно та точно вирішити. Фактори, які необхідність перегляду для обчислень включає порядок точності, обробку штучної в'язкості, врахування обмеженості схеми, тощо.

3. Координатні системи - тип і структура сітки (структурована або неструктурована) безпосередньо впливають на надійність розчину та точність.

Числові дослідження вимагають, крім математичних уявлень руху потоку, загальний, гнучкий, ефективний, точний і стабільний та обмежений (без чисельної нестабільності) чисельний алгоритм розв'язування повного набору середніх рівнянь і рівнянь турбулентності.

Що стосується числового методу, то класичні схеми першого порядку, такі як вітер, гібридний, а закон [8] безумовно обмежений (рішення не страждають з над / під низу), але, як правило, неправильно представляють транспортний процес наскрізь додавання чисельної дифузії, що виникає внаслідок напрямку потоку до сітки. Це ті схеми, які використовують більшість кодів.

У деяких додатках невеликі оверсайз і нижня шпилька можуть бути допустимими. Однак за інших обставин нелінійні процеси дифузії турбулентності будуть сприяти їх посиленню перевищення / підкреслення та може призвести до розбіжності рішення.

Протягом останнього десятиліття докладено зусиль для створення схем високої роздільної здатності та обмеженості. ЛОДА, SHARP і SMART демонструють необмежену поведінку, що призводить до збільшення вимог комп'ютера, особливо для обчислень тривимірних потоків.

Тому традиційним методом моделювання турбулентних потоків є гібридна (вітряна/центральна диференціальна) схема, а вітер використовується для і рівняння турбулентност, такі як рівняння кінетичної енергії, рівняння швидкості дисипації та рівняння Рейнольдса. Оскільки воно має поганий досвід, слід бути підозрілим до схеми вітрів першого порядку.

2.2 Числовий формат

2.2.1 Керуючі рівняння

Рівняння збереження, що керують проблемами нестискаємого постійного потоку, виражається у загальній формі

$$\operatorname{div} [\rho V \Phi - \Gamma_{\Phi} \operatorname{grad} (\Phi)] = S_{(\Phi)}, \quad (2.1)$$

де Φ - рух теплоносія;

V - швидкість потоку, м³/с;

ρ - густина текучого середовища, кг/м³;

Γ_{Φ} - коефіцієнт дифузії;

S_{Φ} - вихідний член змінної.

З ξ , η і ζ представляють тривимірні загальні криволінійні координати, рамка транспортного рівняння (2.1) може бути виражена

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \left[\frac{\partial \rho U \Phi}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho V \Phi}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho W \Phi}{\partial \zeta} \right] = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{11} \Phi \xi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{22} \Phi \eta) \right] + \right. \\ \left. + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{33} \Phi \zeta) + S^{OD} + S_{\Phi}(\xi, \eta, \zeta) \right] \right], \quad (2.2) \end{aligned}$$

де U , V і W - протилежні швидкості, визначені таким чином:

$$U = j_{11}u + j_{21}v + j_{31}w; \quad (2.3a)$$

$$V = j_{12}u + j_{22}v + j_{32}w; \quad (2.3b)$$

$$W = j_{13}u + j_{23}v + j_{33}w; \quad (2.3c)$$

J - коефіцієнт Якобіана;

q_{ij} і j_{ij} ($i = 1-3$ і $j = 1-3$) - коефіцієнти перетворення;

S^{OD} - термін перехресної дифузії.

2.2.2 Дискретизація

Обчислювальна область рівномірно поділена на шестигранні контрольні об'єми, а дискретизація рівняння транспорту (2.2) виконується в обчислювальній формі, що відповідає методу кінцевих обсягів.

Інтегрування рівняння (2.2) над контрольним об'ємом, як показано на рисунку 2.1 і застосовуючи теорему Гауса про дивергенцію в поєднанні з центральною різницею для дифузії, ми маємо

$$F_e - F_w + F_n - F_s + F_t - F_b = S_\phi \Delta V + S_{CD} \Delta V, \quad (2.4)$$

де F_f - загальний потік поперек поверхні клітини f ($f = e, w, b, s, b, t$).

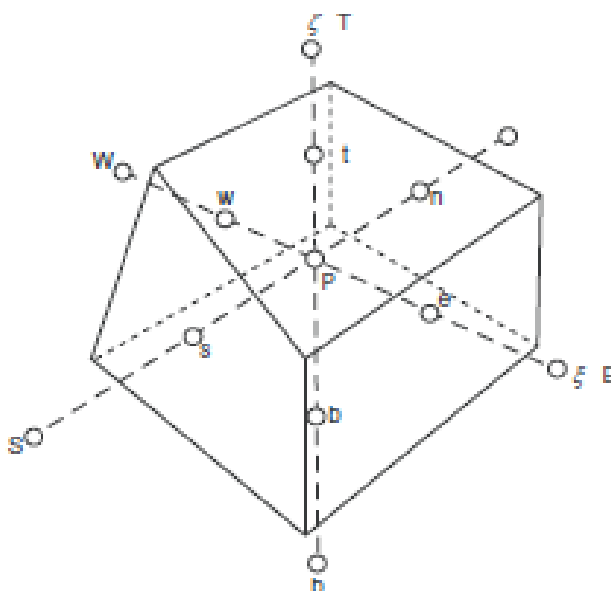


Рисунок 2.1 – Контрольований обсяг виміру

Взявши за приклад подібну маску, загальний потік через нього можна записати

$$Fe = (\rho U \Phi)_e - \left(\frac{\Gamma \Phi}{J} J_{11} \right)_e (\Phi_e - \Phi_p). \quad (2.5)$$

У вищеведеному рівнянні значення номінальних клітин комірок можна наблизити до різних схеми.

Для схеми попереднього вітру першого порядку номінал комірки виражається

$$\Phi_e = \Phi_p, \text{ якщо } U_e > 0, \quad (2.6)$$

$$\Phi_e = \Phi_E, \text{ якщо } U_e < 0. \quad (2.7)$$

Підставляючи рівняння (2.5) і (2.6) в рівняння (2.4), маємо

$$A_p \Phi_p = \sum A_i \Phi_i + S_c,$$

де підрозділ i позначає сусідні точки сітки, A_p та A_i коефіцієнти, що стосуються до конвекції та дифузії, а S_c - вихідний член.

2.2.3 Схеми вищого порядку

Наближення конвекції визначально впливає на загальну точність чисельного моделювання потоку рідини. Схеми першого порядку, такі як протиток, гібридний та енергетичний закон - все це вводить похідні другого порядку, які потім ведуть до хибно дифузних модельованих результатів. Тому схеми вищого порядку слід використовувати для підвищення точності концентрації розчину. Як правило, з рівномірною сіткою між інтервалом,

схеми інтерполяції вищого порядку можна записати наступним чином середньозважена форма

$$\Phi_e = \Phi_p + \frac{1}{4} [(1 - k)\Delta e^- + (1 + k)\Delta e], \text{ якщо } Ue < 0, \quad (2.8)$$

$$\Phi_e = \Phi_e - \frac{1}{4} [(1 - k)\Delta e^+ + (1 + k)\Delta e], \quad (2.9)$$

де $\Delta e^- = \Phi_p - \Phi_w$, $\Delta e = \Phi_e - \Phi_p$, $\Delta e^+ = \Phi_{ee} - \Phi_e$;

k - середньозважене середнє.

У рівнянні (2.8) підкреслені додатки представляють фрагменти схеми протитоку першого порядку. Тому схеми вищого порядку можуть бути реалізовані у підході до відкладеної корекції, запропонованої Хосла і Рубіном

$$\Phi_f^{n+1} = \Phi_f^{UP,n+1} + (\Phi_f^{HO,n} - \Phi_f^{UP,n}), \quad (2.10)$$

де n позначає рівень ітерації, а UP та HO посилаються на вихідні схеми вищого порядку відповідно.

Конвективні потоки обчислюються проти точною схемою поєднуються з терміном дифузії для формування основних коефіцієнтів різницеvim рівнянням, тоді як ті, що є результатами відкладених поправок, зібрані у вихідний термін, скажімо, SDC.

Таке дослідження призводить до діагоналі матриця домінуючого коефіцієнта і дозволяє досягти точності вищого порядку при завершенні серії дослідів.

За допомогою цього методу відкладений термін корекції джерела, приймаючи схід-захід напрямом, обчислюється

$$S^{DC} = \frac{1}{4} [U_e^+ U_e [(H_k) \Delta e + (1 - k) \Delta e^-] - U_e^- U_e (1 + k) \Delta e^+ + (1 - k) \Delta e^+] - U_w^+ U_w (1 + k) \Delta w + (1 - k) \Delta w^- + U_w^- U_w [(1 + k) \Delta w + (1 - k) \Delta w^+].$$

Якщо k закріплено у відповідній постійній величині скрізь, кілька відомих схем можуть утворюватися

$$U_f^\pm = \frac{1 \pm \text{sgn}(U_f)}{2}.$$

Однак схеми, страждають від проблеми обмеженості; тобто рішення можуть проявляти нефізичні коливання в областях крутих градієнтів, що може бути досить серйозним, призвести до чисельної нестабільності.

2.2.4 Середньозважений коефіцієнт, що забезпечує обмеженість

На основі нормалізації змінної, запропонованої Леонардом [4], з тривузлом вводимо нормовану змінну, визначену як

$$\bar{\Phi} = \frac{\Phi - \Phi_U}{\Phi_D - \Phi_n}. \quad (2.11)$$

Отримуємо типові інтерполяційні схеми зведені до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Типові інтерполяційні схеми

Вираз Φ_e , коли $u \geq$	Похибка операції
$\frac{1}{2} (3\Phi_p - \Phi_w)$	$\frac{3}{8} \Delta x^3 \Phi^{11}$
$\frac{1}{2} (\Phi_e + \Phi_p)$	$\frac{1}{8} \Delta x^2 \Phi^{11}$
$\frac{1}{8} (3\Phi_e + 6\Phi_p - \Phi_w)$	$\frac{1}{16} \Delta x^3 \Phi^{11}$
$\frac{1}{6} (2\Phi_e + 5\Phi_d - \Phi_w)$	$-\frac{1}{24} \Delta x^2 \Phi^{11}$

де фактори U і D представляють місця розташування вище та нижче потоку, відповідно. У нормалізованій формі схеми вищого порядку можуть бути переписано

$$\overline{\Phi}_r = \overline{\Phi}_c + \frac{1}{4} [(1+k)(1-\overline{\Phi}_c) + (1-k)\overline{\Phi}_c]. \quad (2.12)$$

Отримуємо моделі режимів витрат потоку від швидкості, зображених на рисунку 2.2.

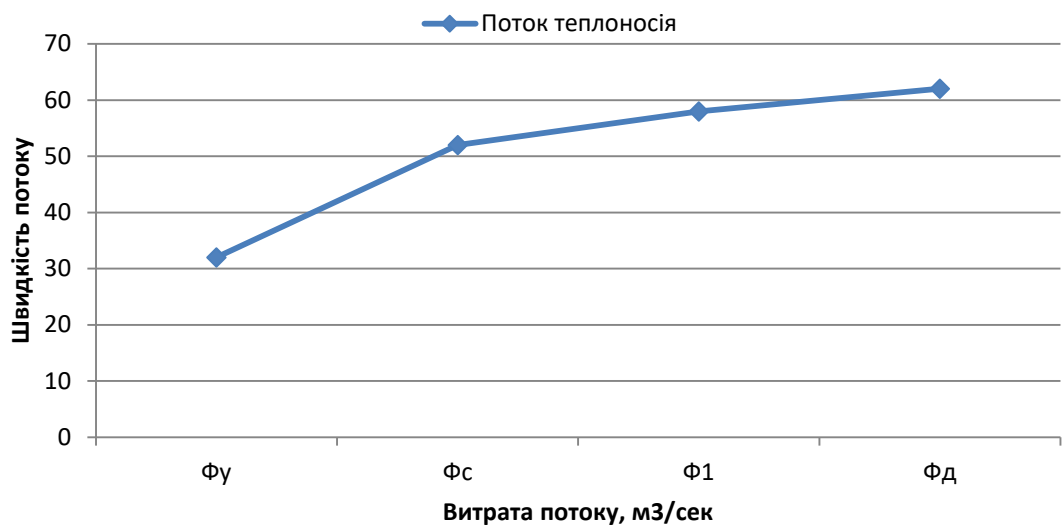


Рисунок 2.2 – Режими 3-х моделей

Розв'язуючи для k ,

$$k = \frac{4\overline{\Phi}_r - 4\overline{\Phi}_c - 1}{1 - 2\overline{\Phi}_c}. \quad (2.13)$$

Для забезпечення обмеженості можна використовувати обмеження TVD:

$$\Phi_r \ll 1, \Phi_r \ll 2\Phi_c, \Phi_r \gg \Phi_c, \quad (2.14)$$

які відповідають області трикутника, зображеній на рисунку 2.3.

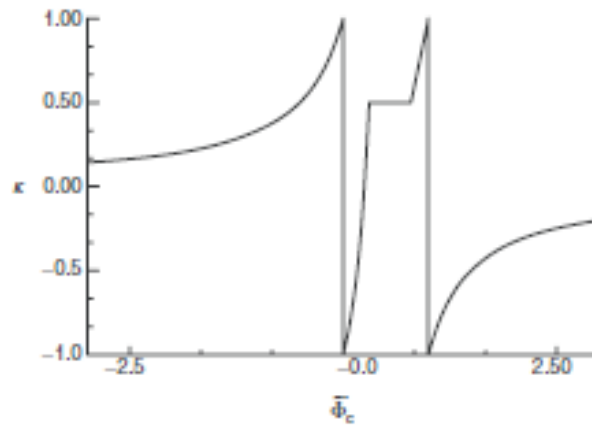


Рисунок 2.3 – Варіації між статистичними коефіцієнтами

Розширення серії Тейлора показує, що перші дві провідні умови схеми інтерполяції становлять $1/4 (\kappa - 1/2) \Delta x^2 \Phi^{11}$ і $1/8 (1 - \kappa) \Delta x^3 \Phi^{111}$. Тому схема має точність принаймні другого порядку.

Максимальної точності (третього порядку) можна досягти, якщо κ встановлено рівним $1/2$. Таким чином, схема може бути сформована так, що лежить якомога ближче до $1/2$, при цьому задовольняє обмеження TVD. Виходячи з цієї ідеї, нормоване номінальне значення комірки можна обчислити за таким виразом як показано на рисунку 2.3, обмеження TVD є занадто обмежувачими відповідно до критерій обмеженості конвекції (CBC).

Однак використання більшого множення постійно, не помітно підвищить точність. Причини в тому, що, по-перше, константа впливає на точність лише в діапазоні від A до B (див. рис. 2.3), та цей діапазон коливається не більше від 0 до 0,3 (якщо використовувати постійні 3, $A = 0,1666$ і $B = 0,3$).

По-друге, навіть при меншій постійній точності схеми є ще другий порядок розрахунку. Тому середньозважений коефіцієнт забезпечення обмеженості схеми використовує нормовану форму змінної до обчислення середньозваженого

Різниця κ на C показана на рисунку 2.4.

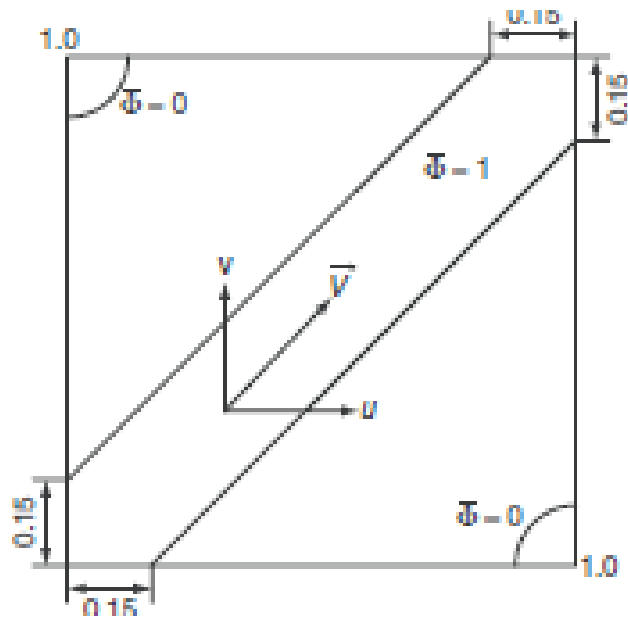


Рисунок 2.4 – Чиста конвекція коробчастого кроку рівномірним полем швидкості

Неважко помітити, що схема задовольняє умову конвективної стійкості [2]. Треба згадати що вищевказаний алгоритм формується на припущенні постійної сітки інтервалу потоку. Для нерівномірних сіток також буде середньозважений коефіцієнт функції співвідношення сторін між проміжками сітки.

Управляючі рівняння руху теплоносія вирішуються за допомогою методу нестабільного кінцевого об'єму. Спеціальна процедура інтерполяції, використовується для запобігання коливань тиску внаслідок нестандартного розташування сітки. Зв'язок тиску та швидкості досягається за допомогою алгоритму SIMPLE [8].

Необхідно зазначити, що в усіх схемах QUICK і WACEB потрібно використовувати два верхніх вузла для кожної сторони комірки, які зобов'язані включати значення за межами домену рішення для прикордонного керуючого обсягу. Тому схема протитоку теплоносія використовується для всіх контрольних об'ємів, що прилягають до меж.

2.3 Чиста конвекція потоку теплоносія в коробчатому ступінчатому профілі

Конфігурація потоку, яка показана на рисунках 2.5, 2.6, є дослідною проблемою для вивчення виконання числового наближення до конвекції через надзвичайно різкий градієнт у скалярі. Це лінійна задача, в якій знаходиться поле швидкості.

Розрахунки проводяться за допомогою двох різних рівномірних сіток, 29×29 і 59×59 . Порівняння чисельних розчинів, отриманих від протиточного руху теплоносія QUICK, схеми WACED представлені на рисунку 2.5 (a) та (b).

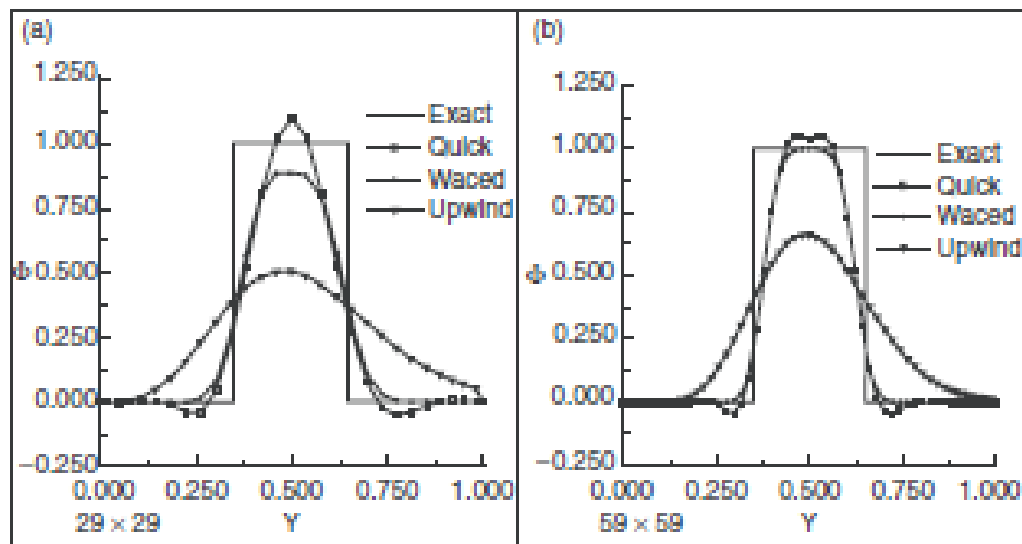


Рисунок 2.5 – Скалярні профілі вздовж центральної лінії

Видно, що схема проти точного руху теплоносія призводить до досить хибно дифузного профілю для скалярного рівного з тоншою сіткою. Хоча схема QUICK зменшує таку помилкову дифузію, це призводить до значних прострелів та підкреслень. Схема WACED вирішує проблему обмеженості зберігаючи точність вищого порядку.

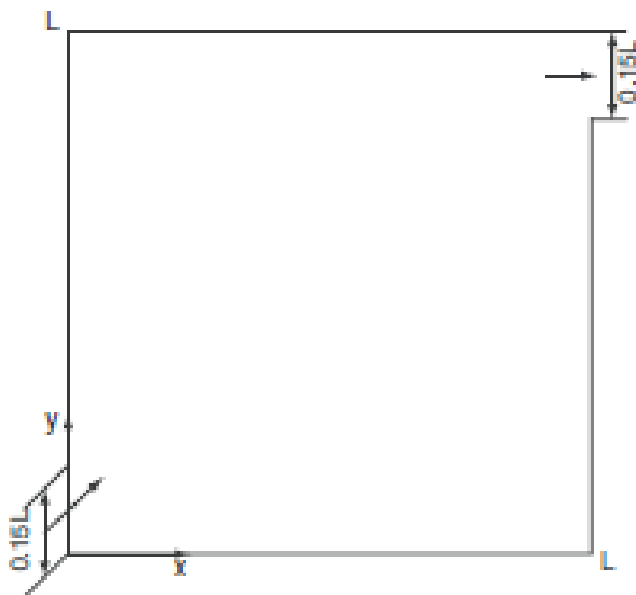


Рисунок 2.6 – Геометрія порожнини

2.3.1 Раптове розширення косоного поля швидкості в порожнині потоку

Розглянута геометрія зображена на рисунку 2.7. Потік передбачається стійким і ламінарним. На вході U -швидкість і V -швидкість задаються постійними значення U_{ref} .

Граничними умовами на виході є $\partial U / \partial x = 0$ і $\partial V / \partial x = 0$.

Розрахунки проводяться на рівномірних сітках (59×59). На рисунку 2.8 показано порівняння U -швидкості вздовж вертикальних центральних ліній порожнини з числом Рейнольдса = 400. Помічено, що схема протитоку не може передбачити цю схему при вторинній рециркуляції, яка повинна з'явитися біля верхньої сторони порожнини і змазує круті градієнти профілю швидкості біля основного русла. Спостереження, що схеми WACEB і QUICK виразно прогнозують вторинну рециркулюючу область. Крім того, варто звернути увагу на схожі результати.

Моделі раціоналізації, передбачені трьома схемами показані на рисунку 2.8.

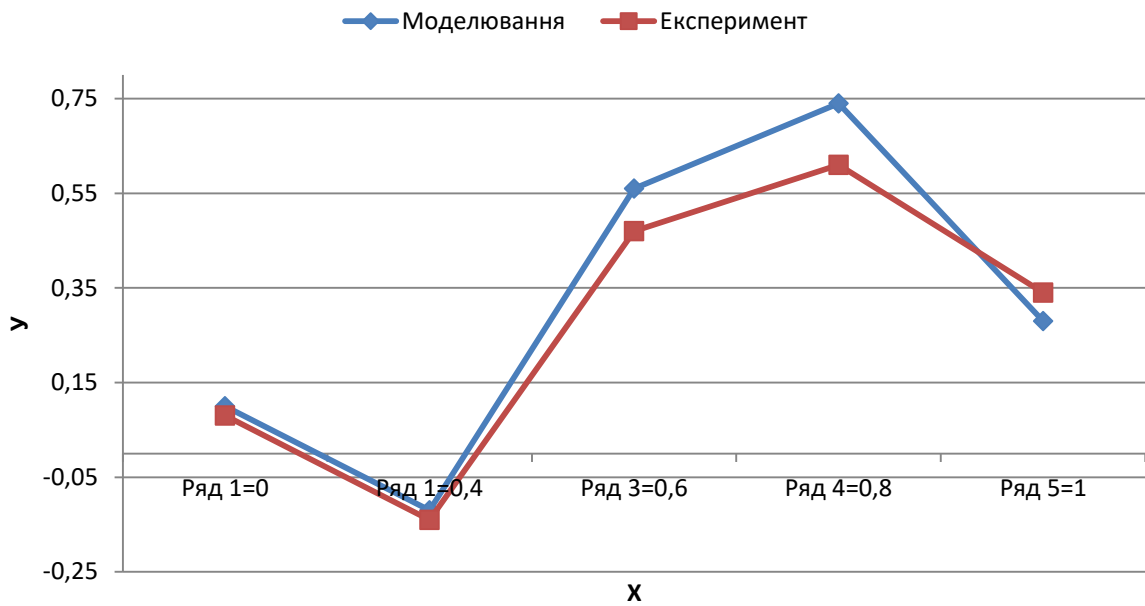


Рисунок 2.7 – Профіль швидкості по вертикалі вздовж вертикальної центральної лінії домену ($Re = 400$)

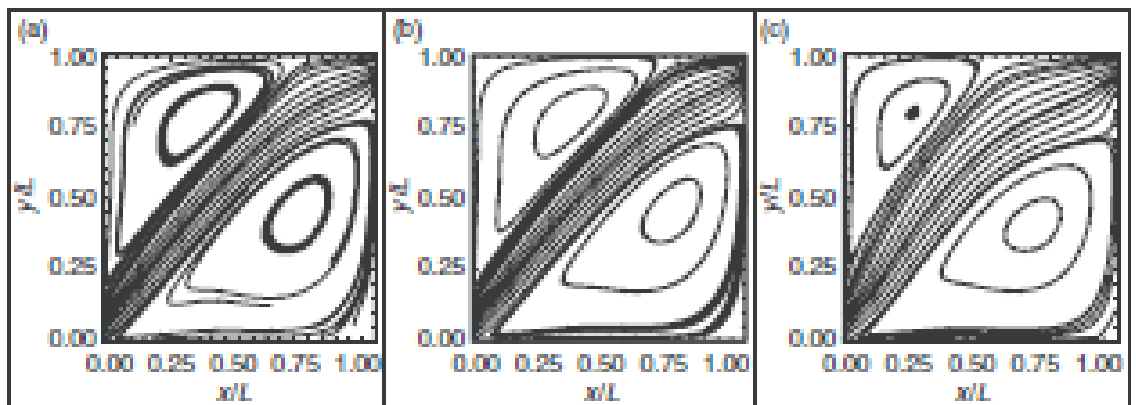


Рисунок 2.8 – Потоківі лінії для раптового розширення косою поля швидкості ($Re = 400$): (a) експеримент; (b) моделювання; (c) протиток схеми чітко демонструє тенденцію

Добре видно, що схема протитоку передбачає набагато менший вихор у верхній лівій частині порожнини та набагато ширшу основну зону, ніж схеми

QUICK та WACEB. Розрахунки були також розширені на більшу кількість потоків при числі Рейнольдса до 1000, які показані на рисунку 2.9.

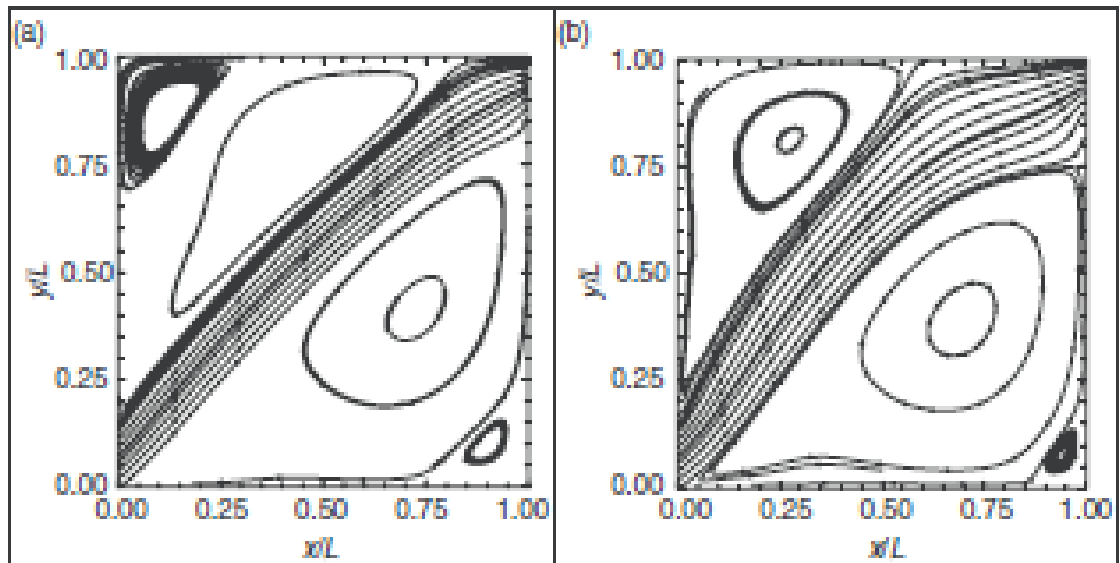


Рисунок 2.9 – Потоківі лінії при раптовому розширенні косою поля швидкості ($Re = 1000$): (а) WACEB; (б) протиток

Рисунок 2.10 показує схеми упорядкування, передбачені за схемами WACEB та протитоком. Ці схеми дають дуже різні схеми потоку, зі збільшенням числа Рейнольдса, кількість конвекції посилюється і дифузія пригнічується.

Також зазначається, що схема виробляє два додаткові вихори в двох кутах порожнини. Однак, схема протитоку передбачає лише дуже невеликий додатковий вихор в нижній правій частині кута і не вдається захопити додатковий вихор у верхньому лівому куті.

Навіть під сильно конвективними умовами, в яких безмежна схема швидкого виробництва може виробляти технологічні рішення, обмежена схема WACEB дає розумне рішення.

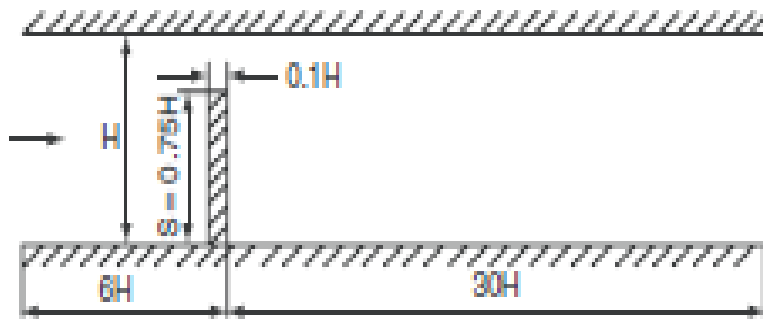


Рисунок 2.10 – Геометрія течії через перешкоду

2.3.2 Двовимірний ламінарний потік з засувками

Двовимірний ламінарний потік через засувку з числом Рейнольдса виходячи з висоти проходу потоку, середньої осьової швидкості 82,5, і коефіцієнт блокування (s / H) 0,75, зображений на рисунку 2.11 – це дослідний випадок.

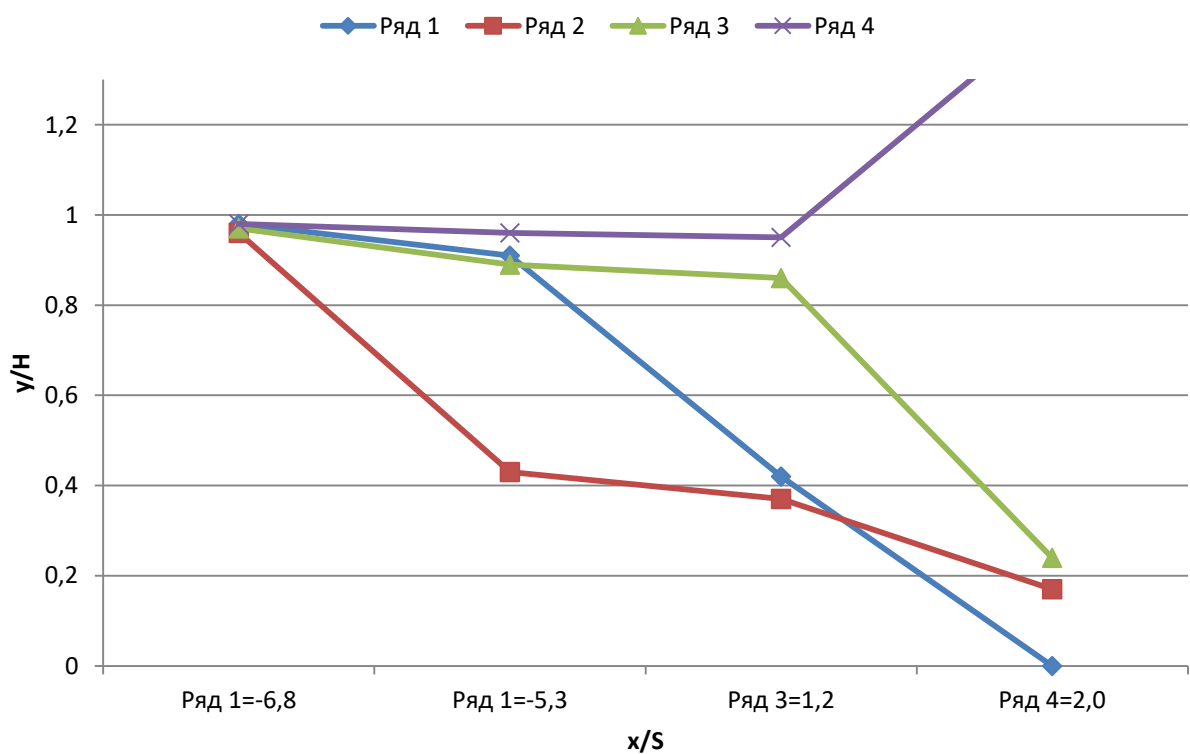


Рисунок 2.11 – Порівняння між прогнозом та вимірами потоку через засувку ($Re = 82,5$)

Прикордонні умови на вході призначають як параболічний профіль для осьової швидкості U і нуля для швидкості поперечного потоку V . На виході граничні умови задаються як $\partial U / \partial x = 0$ і $\partial V / \partial x = 0$.

Це дослідження показує, що сітка – незалежність результатів можна досягти за допомогою 150×78 рівномірних сіток для всіх схем.

На рисунку 2.12 представлені профілі осьової швидкості в різних перетинах (x/S) [11] та обчислюється за схемами QUICK, WACEB та протиток. У випадку $x/s \geq 2$, з'являється другий відокремлений потік на верхній стінці, схема протитоку передбачає дуже погані результати, і схеми QUICK and WACEB дають дуже багато задовільні результати порівняно з експериментальними даними [11].

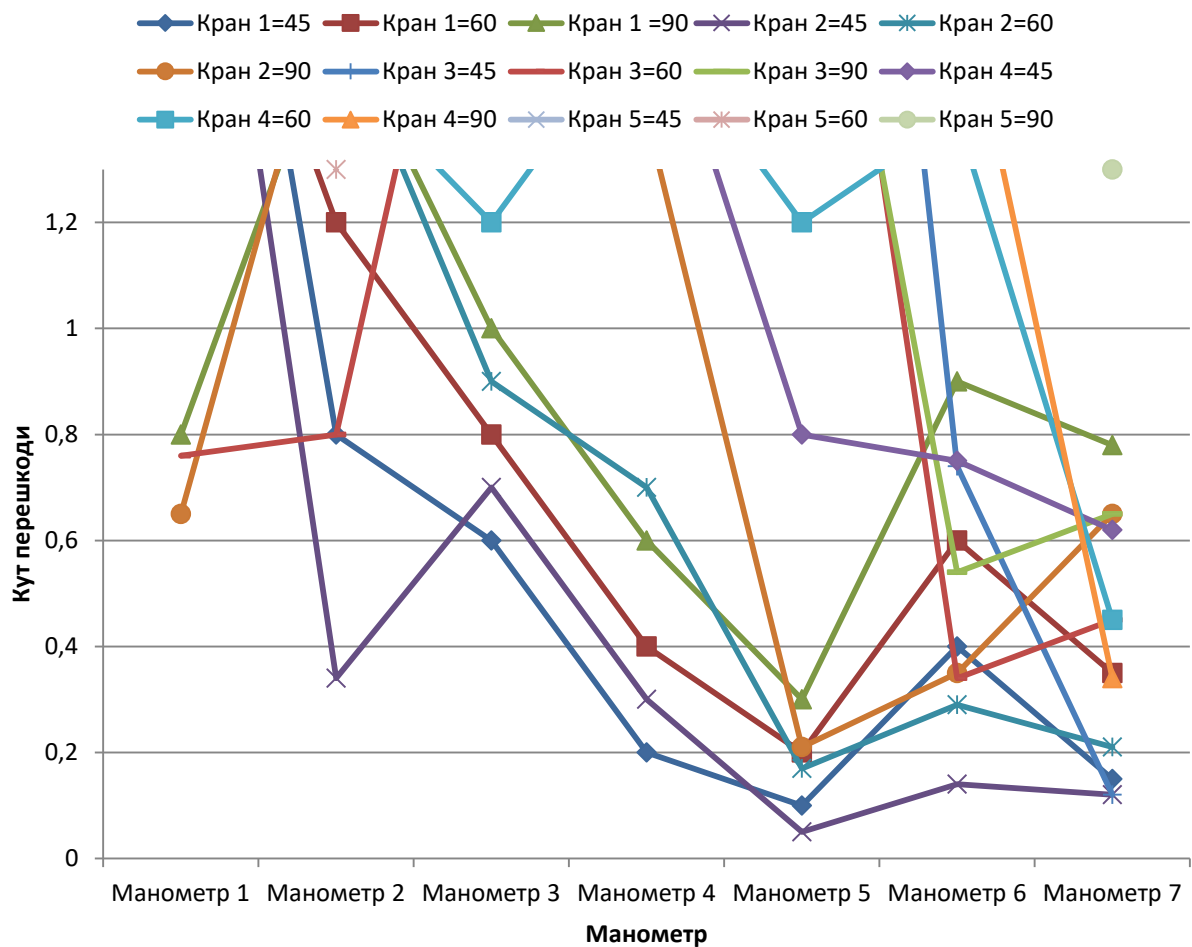


Рисунок 2.12 – Фізичний експеримент ($Re = 1560$). Значення тиску при різних перешкодах трубопроводу

Використовуючи нормовану форму змінної та обмеження засувками, поворотами та градуїтованими кранами визначаємо найбільш сприятливий режим руху теплоносія за потрібною схемою мікрорайону.

Нова схема тестується для чотирьох різних застосувань потоку, включаючи лінійно конвекційний потік скаляра, раптове розширення косоного потоку і ламінарний потік через засувку. Чисельні тести показують, що нова схема зберігає здатність швидкого зменшення числової дифузії без введення будь-яких перешкод та місцевого опору. Схема дуже проста у виконанні, стабільна і вільна від коливань конвергенції.

Термін перехресної дифузії в рівнянні (2.15) визначається наступним чином:

$$S^{CD} = \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{21} \Phi_n + q_{21} \Phi_{\xi}) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{12} \Phi_r + q_{32} \Phi_{\xi}) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma_{\Phi}}{J} (q_{13} \Phi_{\xi} + q_{23} \Phi_n) \right) \right) \right). \quad (2.15)$$

2.4 Числові схеми вищого порядку тепло, масо та передача імпульсу потоку рідини.

Кінцеві числові симуляції постраждали від помилкової дифузії, яка синонімічно називається числовою дифузиею. Цей недолік та інші помилки в динаміці обчислення потоку рідини - неминучий результат різних інтерполяційних схем, що використовуються для конвективних дослідів. Схеми інтерполяції конвективних потоків класифікуються як одноточкові схеми, такі як проти точний рух першого порядку, двоточкові схеми, такі як центральна диференціація та гібридні схеми, являє собою комбінацію [1–4]. Схеми вищого порядку, такі як три точкова схема (ТТС) [5], квадратична інтерполяція третього порядку для конвективна кінетика (КІЗ [6] та КК [7]), чотирьохточкова інтерполяція третього порядку (4ТІЗ) та чотирьохточкова

інтерполяція четвертого порядку (4T14) [8], пропонують шлях до підвищення точності обчислень. Схема КІЗ є розширення алгоритму КК для підвищення його стійкості в потоці еліптичної рідини [7]. Він використовує квадратичну інтерполяційну поверхню в шість точок, яка надає перевагу місцевим точкам за течією [7]. Усі вищезазначені схеми не змогли передбачити точний профіль вздовж осі у на середній площині 45-градусного косого потоку з нескінченним числом Пеклета. Ці схеми породжували невизначеності, починаючи від помилкової дифузії та числових нестабільностей до дослідження та аналізу [8]. Впровадження вищого класу алгоритму обмеженої дискретизації (середньозважений коефіцієнт, що забезпечує обмеженість, WACEB) для подолання аналізу, що виникають у них попередні схеми FPTOI та FPFOI [8]. Вони змогли зняти завищення їх числових результатах косого потоку 45 градусів.

Навіть згадані вище схеми вищого порядку не змогли передбачити нескінченно крутий градієнт скалярної змінної ϕ , оскільки вона різко змінюється від 0 до 1 у випробуванні. Представлення схему розрізнення перекосів, яка використовує вихідні значення, що переважають уздовж локальних векторів швидкості на чотирьох гранях 2D контрольного об'єму, надає додаткові переваги дослідження.

Ця схема розрізнення перекосів зафіксували більшість деталей косого потоку, якщо сітка вирівняна уздовж локального вектору швидкості. Отримані точні результати для кроку зміни пасивного скаляра за допомогою квадратної рівномірної сітки розмірами 11×11 коли потік нахилений під кутом 45 градусів [11]. У цьому випадку одна з діагоналей контрольного об'єму, що оточує кожен вузол, вирівнюється вздовж рівномірної швидкості поля, а інша діагональ перпендикулярна напрямку потоку. Використання контрольних об'ємів, досліджено для дискретизації складу фізичного розчину.

Однак дифузійні умови регулювання рівняння потоку рідини є набагато простіше і більш точно моделюються в більшості числових схем.

2.4.1 Одномісні схеми

Більшість опублікованих числових процедур використовують одну сітку. Основне керівництво рівняння можна подати в одній загальній формі

$$\frac{\partial(\rho u_k \Phi)}{\partial x_k} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_k} \right) = S_\Phi, \quad (2.16)$$

де u_k - швидкість рідини вздовж координатного напрямку x_k , м/с;

Φ - будь-яка залежна змінна, така як масова частка або безрозмірна температура, К.

Рівняння (2.16) може бути формально інтегровано в контрольний об'єм, показаний на рисунку 2.1, для отримання наступної кінцевої різниці рівняння

$$\begin{aligned} & (d_{i+1,j} + d_{i-1,j} + d_{i,j+1} + d_{i,j-1} - S_p) \phi_{i,j} = \\ & = d_{i+1,j} \phi_{i+1,j} + d_{i-1,j} \phi_{i-1,j} + d_{i,j+1} \phi_{i,j+1} + d_{i,j-1} \phi_{i,j-1} \\ & + c_{i-1,j} \phi_{i-1/2,j} - c_{i+1,j} \phi_{i+1/2,j} + c_{i,j-1} \phi_{i,j-1/2} - c_{i,j+1} \phi_{i,j+1/2} \\ & \quad + 1/2 + S_u, \end{aligned} \quad (2.17)$$

де $d_{i+1,j}$ і $c_{i+1,j}$ - коефіцієнти дифузії та конвекції, які потрібно обчислити при центрі східної грані контрольного об'єму, посередині між центральним вузлом (i) та східним вузлом (i + 1). Вони даються як:

$$d_{i+1,j} = \left(\frac{A \Gamma_\Phi}{\delta_x} \right)_{at\ i+0,5j}; \quad (2.18)$$

$$c_{i+1,j} = (\rho u A)_{at\ i+0,5j}, \quad (2.19)$$

де ρ - щільність, кг/м³;

u - швидкість вздовж осі x , м/с;

A - площа східної поверхні, м²;

δx - відстань між вузлами i та $(i + 1)$, м;

φ - коефіцієнт дифузії φ ;

S_u і S_p - коефіцієнти інтегрального терміна джерела.

Рівняння, аналогічні (2.18) та (2.19), застосовуються на західні $(i - 1, j)$, південні $(i, j - 1)$ та північні $(i, j + 1)$ вузли. На відміну від конвективних додатків, умови дифузії не потребують інтерполяції для проміжних значень φ . Конвективні терміни, що стосуються номінальних значень CV , такі як $\varphi_{i + 1/2, j}$, вимагають інтерполяції між вузлами сусідньої сітки. Односіткове рівняння кінцевої різниці можна записати для центрального вузла точка P та сусідні вузли схід - захід - північ - південь (E, W, N, S)

$$(a_E + a_W + a_N + a_S - S_p) \varphi_p = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W + a_N \varphi_N + a_S \varphi_S + S_u. \quad (2.20)$$

Гібридна схема визначає наведені вище коефіцієнти кінцевих різниць

$$a_E = \max[d_{i-1,j}(1/2 c_{i+1,j})] - 1/2 C_{i+1,j};$$

$$a_W = \max[d_{i-1,j}(1/2 c_{i-1,j})] - 1/2 C_{i-1,j}. \quad (2.21)$$

У наведених рівняннях $\max [. . . , . . .]$ представляє максимальне значення два значення всередині дужки. Коефіцієнти a_N і a_S мають подібні вирази в гібридній схемі. Схема розмежування чистого проточного потоку дещо відрізняється для кінцевих різницевого коефіцієнтів.

2.4.3 Новий багатоядерний числовий порядок

Основна сітка визначає вузли де φ_i, j розташовані у просторі. Три інші сітки зміщені в просторі, де $\varphi_{x i, j}$, φ_y, i, j , і $\varphi_{xy i, j}$ розташовані посередині між вузлами основної сітки.

Суперскрипти x і y вказують на зміщення сіток на середину відносно вузла. Більше того, суперскрипт xy вказує на те, що сітка зміщена по діагоналі таким, що зміщені вузли займають центральний вузол між сусідніми чотирма вузлами основної сітки. Кластери з стрілками чотирьох вузлів, використовується для позначення загальних показників (i, j) , пов'язаних з ϕ , ϕ_x , ϕ_y та ϕ_{xy} .

Просторові розташування ϕ , ϕ_x , ϕ_y та ϕ_{xy} , пов'язані з кластером (i, j) , у розчині теплоносія. Є просторові розташування (x_i, y_j) , $(x_i + x_i / 2, y_j)$, $(x_i, y_j + y_j / 2)$ і $(x_i + x_i / 2, y_j + y_j / 2)$ - відповідно. Ця кластерна методика значно спрощує рівняння з кінцевою різницею. Це також спрощує комп'ютерне кодування системи рівнянь схеми. Зображені контрольні обсяги NIMO CV , CV_x , CV_y та CV_{xy} . Типовий контрольний об'єм CV для основної сітки формується чотирма площинами, що ділять відстані між сусідніми вузлами та центральним вузлом (i, j) . Контрольні томи CV_x , CV_y та CV_{xy} містять вузлові змінні ϕ_{x_i} , ϕ_{y_j} , ϕ продуктивність ϕ_{x_j} , ϕ_{y_i} , ϕ_{xy} . Уздовж координати x - або y , які проходять повз граней цих контрольних томів та найближчі сусідні вузли, що належать до будь-якої з чотирьох сіток.

Слід зазначити, що прийнятий підхід до контролю за обсягом тут схожий з методом кінцевих обсягів [2]. Однак у методі кінцевих обсягів, область вирішення дискретизується на кінцеві об'єми, орієнтовані на вузли [2].

При такому розташуванні обчислення конвективних потоків, що відносяться до кожного контрольного об'єму, можна обчислити навіть без інтерполяції при використанні неоднорідних сіток. Спочатку розглядається основний контрольний об'єм CV .

Рівняння (2.1) формально інтегровано над основним контрольним об'ємом навколо типового вузла (i, j) , де інтеграл об'єму замінені на їх поверхневий аналог, виконані на чотирьох гранях. Отримуємо кінцеве рівняння основної сітки

$$\begin{aligned}
(d_{i-1,j} + d_{i-1,j} + d_{i,j+1} + d_{i,j-1} - S_{p,i,j})\Phi_{i,j} = & d_{i+1,j}\Phi_{i+1} + d_{i-1,j}\Phi_{i-1,j} + \\
& + d_{i,j+1}\Phi_{i,j+1} + d_{i,j-1}\Phi_{i,j-1} + c_{i-1,j}\Phi_{i-1,j} - c_{i+1,j}\Phi_{i,j} + c_{i,j-1}\Phi_{i,j-1} + \\
& + c_{i,j+1}\Phi_{i,j} + S_{ui,j}.
\end{aligned} \tag{2.22}$$

Рівняння безперервної маси основних вузлів сітки може бути написано так:

$$c_{i+1,j} - c_{i-1,j} + c_{i,j+1} - c_{i,j-1} = 0. \tag{2.23}$$

Рівняння (2.23) вказує, що сума вхідних масових потоків дорівнює сумі вихідних масових потоків. Рівняння, аналогічні (2.22) та (2.23), існують для контрольних об'ємів CV^x , CV^y та CV^{xy} інших трьох сіток. Конвективний і дифузійні потоки (наприклад, $d_{i+1,j}$ і $c_{i+1,j}$) задаються рівняннями (2.3) і (2.4).

Рівняння (2.22) разом з аналогічними рівняннями для CV^x , CV^y та CV^{xy} являє собою замкнутий набір кінцево-різницевого рівнянь для ϕ , ϕ^x , ϕ^y та ϕ^{xy} . Рішення цих взаємопов'язаних нелінійних рівнянь, представляють тридіагональний матричний алгоритм (TDMA). Навіть для пасивного скаляра рівняння (2.8) має додаткові умови, які повинні бути включеними як вихідні умови. У цьому випадку вихідні терміни представляють пасивний скаляр конвективних потоків від сітки x - та y до основної сітки. Тому рівняння (2.23) множиться на $\phi_{i,j}$ і використовується для модифікації рівняння (2.8). Ця модифікація зманеврується таким чином, що вхідні потоки ϕ додаються вліво, в той час як вихідні потоки ϕ прикріплені до правої частини рівняння (2.8). Ця модифікація допомагає стабілізувати розчини, отримані за допомогою TDMA, як частини алгоритму змінного напрямку (ADA). Оскільки TDMA дуже економічне в зберіганні та вимогах до часу виконання, воно має перевагу над 2D-матричним вирішувачем алгоритму. Більше того, ітерація між чотирма сітками неминуха як рішення кожної сітки сильно залежить від рішень інших сіток. Отримуємо останнє кінцеве рівняння NIMO

$$\begin{aligned}
& (d_{i-1,j} + d_{i-1,j} + d_{i,j+1} + d_{i,j-1} - S_{p,i,j} + c_{i+1,j} + c_{i-1,j} + c_{i,j+1} + \\
& + c_{i,j-1})\Phi_{i,j} = d_{i+1,j}\Phi_{i+1} + d_{i-1,j}\Phi_{i-1,j} + d_{i,j+1}\Phi_{i,j+1} + d_{i,j-1}\Phi_{i,j-1} + \\
& + c_{i-1,j}\Phi_{i-1,j} - c_{i+1,j}\Phi_{i,j} + c_{i,j-1}\Phi_{i,j-1} + c_{i,j+1}\Phi_{i,j} + S_{ui,j}, \quad (2.24)
\end{aligned}$$

де \hat{c} і \tilde{c} - конвективні потоки.

З'являються вхідні потоки, які потрібно перенести в ліву частину під час вихідних лише в правій частині рівняння (2.10). Визначено нові конвективні потоки по напрямках E – W

$$c_{i-1,J} = \left(\frac{1}{2}\widehat{c_{i-1,J}}\right) + \frac{1}{2}c_{i-1,J}; \quad (2.25)$$

$$\hat{c}_{i-1,J} = \widehat{c_{i-1,J}} - c_{i-1,J}; \quad (2.26)$$

$$c_{i+1,J} = \left(\frac{1}{2}\widehat{c_{i+1,J}}\right) - \frac{1}{2}c_{i+1,J}; \quad (2.27)$$

$$\hat{c}_{i+1,J} = \widehat{c_{i+1,J}} + c_{i+1,J}. \quad (2.28)$$

Аналогічно, у напрямку N – S, \hat{c} і \tilde{c} визначаються

$$\hat{c}_{i,J-1} = \left(\frac{1}{2}\widehat{c_{i,J-1}}\right) + \frac{1}{2}c_{i,J-1}; \quad (2.29)$$

$$c_{i,J-1} = \widehat{c_{i,J-1}} - c_{i,J-1}; \quad (2.30)$$

$$c_{i,J+1} = \left(\frac{1}{2}\widehat{c_{i,J+1}}\right) - \frac{1}{2}c_{i,J+1}; \quad (2.31)$$

$$\hat{c}_{i,J+1} = \widehat{c_{i,J+1}} + c_{i,J+1}. \quad (2.32)$$

Неважко показати, що сума чотирьох компонентів \tilde{c} дорівнює сумі чотирьох складових \hat{c} , це робиться додаванням рівнянь (2.12), (2.14), (2.16) і (2.18)

$$\begin{aligned}
& c_{i-1,j} + \tilde{c}_{i+1,j} + \tilde{c}_{i,j-1} + \tilde{c}_{i,j+1} = \\
& = \hat{c}_{i-1,j} + \hat{c}_{i+1,j} + \hat{c}_{i,j-1} + \hat{c}_{i,j+1} + (c_{i+1,j} - c_{i-1,j} + c_{i,j+1} - c_{i,j-1}). \quad (2.33)
\end{aligned}$$

Сума додатків у дужках правої частини рівняння (2.19) дорівнює до нуля, як задано рівнянням (2.9).

Подальше спрощення може бути досягнуто, якщо дифузійні та конвективні потоки є парними

$$\begin{aligned}
 & (a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1} - Sp_{i,j}) \varphi_{i,j} = \\
 & = d_{i+1,j} \varphi_{i+1,j} + d_{i-1,j} \varphi_{i-1,j} + d_{i,j+1} \varphi_{i,j+1} + d_{i,j-1} \varphi_{i,j-1} + \\
 & + (c_{i-1,j} \varphi_{xi-1,j} + \tilde{c}_{i-1,j} \varphi_{i,j}) + (\tilde{c}_{i+1,j} \varphi_{i,j} - c_{i+1,j} \varphi_{xi,j}) + \\
 & + (c_{i,j-1} \varphi_{yi,j-1} + \tilde{c}_{i,j-1} \varphi_{i,j}) + (\tilde{c}_{i,j+1} \varphi_{i,j} - c_{i,j+1} \varphi_{yi,j}) + Su_{i,j}. \quad (2.34)
 \end{aligned}$$

Слід зазначити, що рівняння (2.20) все ще еквівалентне рівнянню (2.10) або рівнянню (2.8). Коефіцієнт a в лівій частині рівняння (2.20) аналогічний коефіцієнту, що відрізняється протитоком теплоносія, настільки, наскільки вони обоє представляють чистий транспорт конвекцією та дифузією. Однак правий бік має зовсім інше структуру, вона приймає вихідні потоки. Ці вихідні потоки зменшуються до нуля в схемі чистого протитоку. Виявлено, що рівняння (2.20) має характеристики кращої конверсії, ніж остаточне рівняння NIMO (2.10). Наведені вище коефіцієнти визначаються

$$a_{i+1,j} = d_{i+1,j} + \hat{c}_{i+1,j}; \quad (2.21)$$

$$a_{i-1,j} = d_{i-1,j} + \hat{c}_{i-1,j}; \quad (2.22)$$

$$a_{i,j+1} = d_{i,j+1} + \hat{c}_{i,j+1}; \quad (2.23)$$

$$a_{i,j-1} = d_{i,j-1} + \hat{c}_{i,j-1}. \quad (2.24)$$

Аналогічно рівняння кінцевої різниці NIMO для контрольних об'ємів CV_x , CV_y , і CV_{xy} можна записати

$$\begin{aligned}
& (a_{i+1,j}^x + a_{i-1,j}^x + a_{ij+1}^x + a_{ij-1}^x - S_p^{xij})\Phi_{ij}^x = \\
& = d_{i+1,j}^x \Phi_{i+1,j}^x + d_{i-1,j}^x \Phi_{i-1,j}^x + d_{i,j+1}^x + \\
& + d_{i,j-1}^x \Phi_{i,j-1}^x + (c_{i-1,j}^x \Phi_{ij}^x + c_{i-1,j}^x \Phi_{ij}^x) + \\
& + (\overline{c_{i+1,j}^x \Phi_{i,j}^x - c_{i+1,j}^x \Phi_{i+1,j}^x}) + (\hat{c}_{ij-1}^x \Phi_{i,j-1}^{xy} + \bar{c}_{i,j-1}^x \Phi_{i,j}^x) + \\
& + (\bar{c}_{i,j-1}^x \Phi_{i,j}^x - c_{ij+1}^x \Phi_{ij}^{xy})x_{i,j} + S_u^{xij}; \tag{2.35}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (a_{i+1,j}^y + a_{i-1,j}^y + a_{ij+1}^y + a_{ij-1}^y - S_p^{yij})\Phi_{ij}^y = \\
& = d_{i+1,j}^y \Phi_{i+1,j}^y + d_{i-1,j}^y \Phi_{i-1,j}^y + d_{i,j+1}^y \Phi_{i,j+1}^y + \\
& + d_{i,j-1}^y \Phi_{i,j-1}^y + (c_{i-1,j}^y \Phi_{ij}^y + c_{i-1,j}^y \Phi_{ij}^y) + \\
& + (\overline{c_{i+1,j}^y \Phi_{i,j}^y - c_{i+1,j}^y \Phi_{i+1,j}^y}) + (\hat{c}_{ij-1}^y \Phi_{i-1,j}^{xy} + \bar{c}_{i,j-1}^y \Phi_{i,j}^y) + \\
& + (\bar{c}_{i,j-1}^y \Phi_{i,j}^y - c_{ij+1}^y \Phi_{ij+1}^{xy})x_{i,j} + S_u^{yij}; \tag{2.36}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (a_{i+1,j}^{xy} + a_{i-1,j}^{xy} + a_{ij+1}^{xy} + a_{ij-1}^{xy} - S_p^{xyij})\Phi_{ij}^{xy} = \\
& = d_{i+1,j}^{xy} \Phi_{i+1,j}^{xy} + d_{i-1,j}^{xy} \Phi_{i-1,j}^{xy} + d_{i,j+1}^{xy} \Phi_{i,j+1}^{xy} + d_{i,j-1}^{xy} \Phi_{i,j-1}^{xy} + \\
& + (c_{i-1,j}^{xy} \Phi_{ij}^{xy} + c_{i-1,j}^{xy} \Phi_{ij}^{xy}) + (\overline{c_{i+1,j}^{xy} \Phi_{i,j}^{xy} - c_{i+1,j}^{xy} \Phi_{i+1,j}^x}) + \\
& + (\hat{c}_{ij-1}^{xy} \Phi_{i-1,j}^x + \bar{c}_{i,j-1}^{xy} \Phi_{i,j}^{xy}) + (\bar{c}_{i,j-1}^{xy} \Phi_{i,j}^{xy} - c_{ij+1}^{xy} \Phi_{ij+1}^x)x_{i,j} + \\
& + S_u^{xyij}. \tag{2.37}
\end{aligned}$$

Конвективні потоки, відносяться до кожної з чотирьох сіток NIMO. Правильні місця розташування флюсів, що надходять або залишають CV , CV_x , CV_y , та CV_{xy} чітко показані. Інтерпретація вищезазначеного загального NIMO рівняння непросте.

Побудуємо графік обчислювальної області тестової задачі похилого потоку під кутом θ з двоступеневою зміною пасивної скалярної змінної ϕ від 0 до 1 на рисунку 2.13

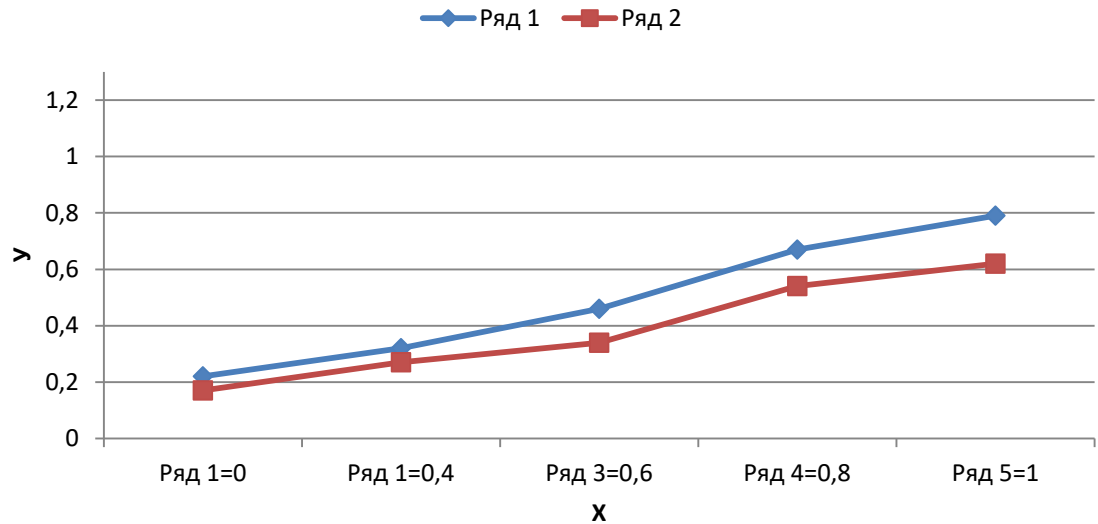


Рисунок 2.13 – Обчислювальна область тестової задачі похилого потоку під кутом θ з двоступеневою зміною пасивної скалярної змінної φ від 0 до 1

2.5 Перше обмеження тесту

Обмежуючий випадок конфігурації потоку на рисунку 2.5 з нескінченним числом Пекле має точне аналітичне рішення. У цьому випадку при відсутності дифузії значення φ залишається константою в районі діагоналі стабільного розчину при значенні 1,0, тоді як φ приймає значення нуля в іншому місці, як показано на рис. Змінна φ дорівнює пасивний скаляр, що має термін, що зникає. Домен рішення тестової проблеми є $[(1/\tan\theta) \times 1]$, тоді як компоненти швидкості (u і v) рівні $1/\tan\theta$ і 1,0 відповідно. Щільність також приймається за постійну і дорівнює 1,0. Ширина уздовж координати x , при $y = 0,0$ і $\varphi = 1,0$, дорівнює $(0,15/\tan\theta)$, тоді як уздовж y -координати, при $x = 0,0$, вона дорівнює 0,15, як показано на рисунку 2.5. Гранична умова також показана на рисунку 2.5, при $\varphi = 1,0$ дуюма зону району та всюди нуль на межах домену рішення. Клітина с числом Пекле в будь-якому вузлі (i, j) визначається

$$Pe_{i,j} = |c_{i,j}| / d_{i,j} \quad (2.38)$$

Для рівномірних потоків конвекції та дифузії номер клітини Пекле також є рівномірним, це залежить від вузла сітки.

Для тестової задачі на рисунку 2.5 значення термінів джерела та потоків коефіцієнти в рівняннях (2.20), (2.25) - (2.27)

$$Sp_{i,j} = 0; Su_{i,j} = 0, \quad (2.39)$$

$$\hat{C}_{i-1,j} = c_{i-1,j}; \hat{C}_{i,j-1} = c_{i,j-1}, \quad (2.40)$$

$$\tilde{c}_{i-1,j} = 0; \tilde{c}_{i,j-1} = 0, \quad (2.41)$$

$$\hat{C}_{i+1,j} = 0; \hat{C}_{i,j+1} = 0, \quad (2.42)$$

$$\tilde{c}_{i+1,j} = c_{i+1,j}; \tilde{c}_{i,j+1} = c_{i,j+1}, \quad (2.43)$$

Аналогічно, значення \hat{c} і \tilde{c} в трьох інших контрольних обсягах, CV_x , CV_y та CV_{xy} , можна отримати. Кінцево-різницеві рівняння NIMO для тестової задачі таким чином можна отримати з рівнянь (20), (25) - (27) наступним чином:

$$\begin{aligned} & [d_{i+1,j} + (d_{i-1,j} + c_{i-1,j}) + d_{i,j+1} + (d_{i,j-1} + c_{i,j-1})\Phi_{i,j} = d_{i+1,j}\Phi_{i+1,j} + \\ & + d_{i-1,j}\Phi_{i-1,j} + d_{i,j+1}\Phi_{i,j+1} + d_{i,j-1}\Phi_{i,j-1} + c_{i+1,j}\Phi_{i-1,j} + c_{i+1,j}(\Phi_{i,j} - \Phi_{ij}^x) + \\ & + c_{i,j-1}\Phi_{i,j-1}^y + c_{i,j+1}(\Phi_{ij} - \Phi_{ij}^y)] ; \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} & [d_{i+1,j}^x + (d_{i-1,j}^x + c_{i-1,j}^x) + d_{i,j+1}^x + (d_{i,j-1}^x + c_{i,j-1}^x)\Phi_{i,j}^x = \\ & = d_{i+1,j}^x\Phi_{i+1,j}^x + d_{i-1,j}^x\Phi_{i-1,j}^x + d_{i,j+1}^x\Phi_{i,j+1}^x + d_{i,j-1}^x\Phi_{i,j-1}^x + \\ & + c_{i+1,j}^x\Phi_{i-1,j}^x + c_{i+1,j}^x(\Phi_{i,j}^x - \Phi_{i+1,j}^x) + c_{i,j-1}^x\Phi_{i,j-1}^{xy} + \\ & + c_{i,j+1}^x(\Phi_{i,j}^x - \Phi_{ij}^{xy})] ; \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned}
& [d^y_{i+1,j} + (d^y_{i-1,j} + c^y_{i-1,j}) + d^y_{i,j+1} + (d^y_{i,j-1} + c^y_{i,j-1})]\Phi^y_{i,j} = \\
= & d^y_{i+1,j}\Phi^y_{i+1,j} + d^y_{i-1,j}\Phi^y_{i-1,j} + d^y_{i,j+1}\Phi^y_{i,j+1} + d^y_{i,j-1}\Phi^y_{i,j-1} + \\
& + c^y_{i+1,j}\Phi^y_{i-1,j} + c^y_{i+1,j}(\Phi^y_{i,j} - \Phi^{xy}_{ij}) + c^y_{i,j-1}\Phi^{xy}_{i,j-1} + \\
& + c^y_{i,j+1}(\Phi^y_{i,j} - \Phi_{ij})]; \quad (2.46)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [d^{xy}_{i+1,j} + (d^{xy}_{i-1,j} + c^{xy}_{i-1,j}) + d^{xy}_{i,j+1} + (d^{xy}_{i,j-1} + \\
& + c^{xy}_{i,j-1})]\Phi^{xy}_{i,j} = = d^{xy}_{i+1,j}\Phi^{xy}_{i+1,j} + d^{xy}_{i-1,j}\Phi^{xy}_{i-1,j} + \\
& + d^{xy}_{i,j+1}\Phi^{xy}_{i,j+1} + d^{xy}_{i,j-1}\Phi^{xy}_{i,j-1} + c^{xy}_{i+1,j}\Phi^{xy}_{i-1,j} + \\
& + c^{xy}_{i+1,j}(\Phi^{xy}_{i,j} - \Phi^y_{ij}) + c^{xy}_{i,j-1}\Phi^x_{i,j-1} + c^{xy}_{i,j+1}(\Phi^{xy}_{i,j} - \Phi^x_{ij})]. \quad (2.47)
\end{aligned}$$

Слід зазначити, що всі перераховані вище конвективні потоки, показані на рисунку 2.5, є позитивними. Це тому, що вся швидкості компонентів в області рішення є позитивними.

Вищевказані рівняння поділяють одну особливість методом протитоку теплоносія. Спільною ознакою є ліва частина вищевказаних рівнянь. Однак праворуч сторони рівнянь NIMO істотно відрізняються, оскільки вони вміщують вихідні потоки, які ігноруються у схемі протитоку. Кожен елемент управління NIMO об'єм отримує вхідні конвективні потоки з двох інших сіток; наприклад основний отримує два вхідні конвективні потоки з сіток x- та y. Окрім вхідних потокових потоків, вихідні потоки мають унікальний характер обурення. Вони залишають сліди в контрольних обсягах, як видно з останні додатків рівнянь (2.34) - (2.37). Ці сліди є результатом відмінностей між центром CV^o та залишковими значеннями ϕ .

Хоча вхідні потоки ϕ мають тенденцію до збільшення центральних значень CV, сліди можуть збільшуватися або зменшуватися ϕ в центрі контрольного об'єму сітки. Кожна сітка отримує флюси з сусідніх сіток, а також сліди в результаті вихідних потоків ϕ до тих самих сусідніх сіток, як видно з вищевказаного набору рівнянь, що визначають схему NIMO. Чистий приріст у кожному контрольному об'ємі перерозподіляється дифузійним

механізмом, як це продиктовано за рівняннями кінцевих різниць. Інтерпретації редукованих рівнянь застосовуються рівняння NIMO різниць, що відображають поточні умови дослідної задачі однаково до їх загальних аналогів.

2.6 Числові результати першої задачі дослідження

Розв'язання задач по кожному напрямку отримують чисельно. TDMA, по черзі, АДА прийнято [1]. Рівняння (2.34) - (2.37) модифікуються у вузлах, що прилягають до кордону для задоволення накладених умов. Значення числа Пекле фіксується на дуже великій кількості для імітації $Pe = \infty$ граничного випадку наукового дослідження. Значення $Pe > 104$ виявляється достатньою, щоб уповільнити дифузійний транспорт з рівнянь (2.47) - (2.48). Результати моделювання NIMO зображені на рисунку 2.14, отримують для фіксованого значення $Pe = 106$. Рішення NIMO програма обчислює дифузні потоки від заданого числа Пекле і рівняння (2.47). Для косого потоку 45 градусів для чотирьох користувачів використовуються різні сітки схеми NIMO.

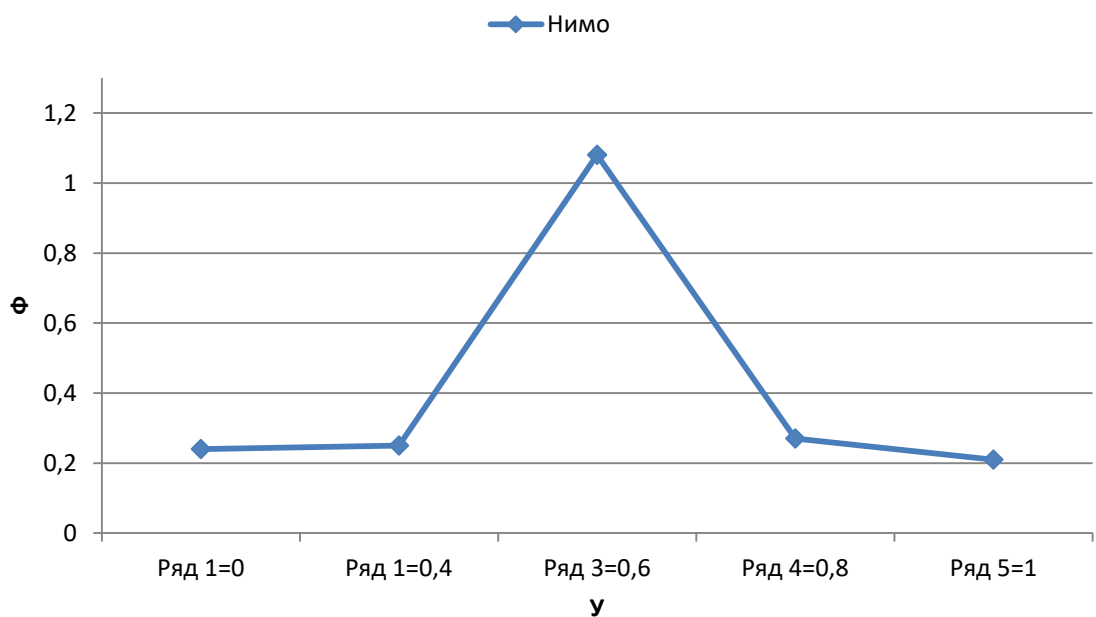


Рисунок 2.14 – Профілі ϕ для попередніх числових схем і NIMO при $x = 0,5$ і $Pe = \infty$ для 59×59 сітки і $\theta = 45$ градусів

Різновиди сітки: одна квадратна сітка (59×59), дві прямокутні сітки (59×69 та 59×53) та одна неоднорідна сітка (59×69).

Однак рівномірна сітка 99×59 використовується для косоного потоку 30 градусів. Для дослідження поведінки схеми NIMO при умовних обмеженнях використовуються різні сітки накладені квадратними, прямокутними та неоднорідними сітками. Послаблення статистичних коефіцієнтів в діапазоні від 0,3 до 0,5 для косоного потоку 45 градусів і 0,6 для косоного потоку 30 градусів використовують для рівнянь кінцевих різниць. Вищезазначені діапазони зручні для управління процесами перетворення взаємопов'язані змінними ϕ , ϕ_x , ϕ_y та ϕ_{xy} схеми NIMO.

Рисунок 2.14 зображує результати дослідження для різних одномеревих потоків та результатів гібридних мереж та NIMO-схем при $\theta = 45$ градусів.

Поточні результати багаторешітчастої системи (NIMO) дали числове рішення, яке точно відповідає аналітичному розв'язку граничного випадку, коли $Re = \infty$.

Схема NIMO прогнозує правильний нескінченний градієнт ϕ при $y = 0,35$ та $0,65$, як зображено на рисунку 2.15. Більше того, гібридна схема з домінуючою хибною дифузиею дала рисунку 2.15 профілі ϕ при $x = 0,5$ для $Re = 10, 50, 200$ та 1000 і точні рішення для $Re = \infty$ для 59×59 квадратних сіток і $\theta = 45$ градусів.

FPFOI, FPFOI та WACEB схеми набагато краще, ніж гібридні схеми. Однак FPFOI та FPFOI схеми [8] страждають від перевантаження та аналізу і не змогли передбачити нескінченність ($d\phi / dy$) при $y = 0,35$ і $0,65$. Хоча схема WACEB [9, 10] результати належним чином обмежені між 0 і 1, він все ще не міг передбачити нескінченність градієнту ϕ при $y = 0,35$ та $0,65$, як видно з рисунка 2.6.

Цікаво було побачити, як NIMO працює на значення числа Пекле менше, ніж нескінченність. Числові результати ϕ також отримані для тієї самої межі умови та використання косоного потоку 45 градусів. Профілі схеми NIMO ϕ

вздовж осі y та при $x = 0,5$ для $Re = 10, 50, 200$ та 1000 зображено на рисунку 2.7. Гібридні результати для $Re > 2$ та аналітичний розчин для $Re = \infty$ повторно відновлено на рис 2.7 для порівняння. Видно, що по мірі збільшення Re ($d\phi / dy$), при $y = 0,35$ і $0,65$, збільшується. Коли $Re = 1000$, ($d\phi / dy$) настільки крутий, що майже досягає нескінченності.

Значення чотирьох сіток пасивної скалярної змінної, тобто ϕ , ϕ_x , ϕ_y і ϕ_{xy} , зображено на рисунку 2.8. Профілі скалярної змінної побудовані на $x = 0,5$ для значення числа Пекле, рівного 5. Значення ϕ_x і ϕ_{xy} при $x = 0,5$, використані в рисунку 2.8 отримані при інтерполяції конвергованого кінцевого розчину внаслідок зсуву сіток x - та xy відносно площини $x = 0,5$. Чотири профілі падають один на одного, що вказує на те, що поля ϕ , ϕ_x , ϕ_y і ϕ_{xy} сходяться разом, по суті, однакових значень. Точність кожної сітки NIMO є доступ до якого здійснюється шляхом обчислення суми абсолютних залишкових помилок по всіх вузлах.

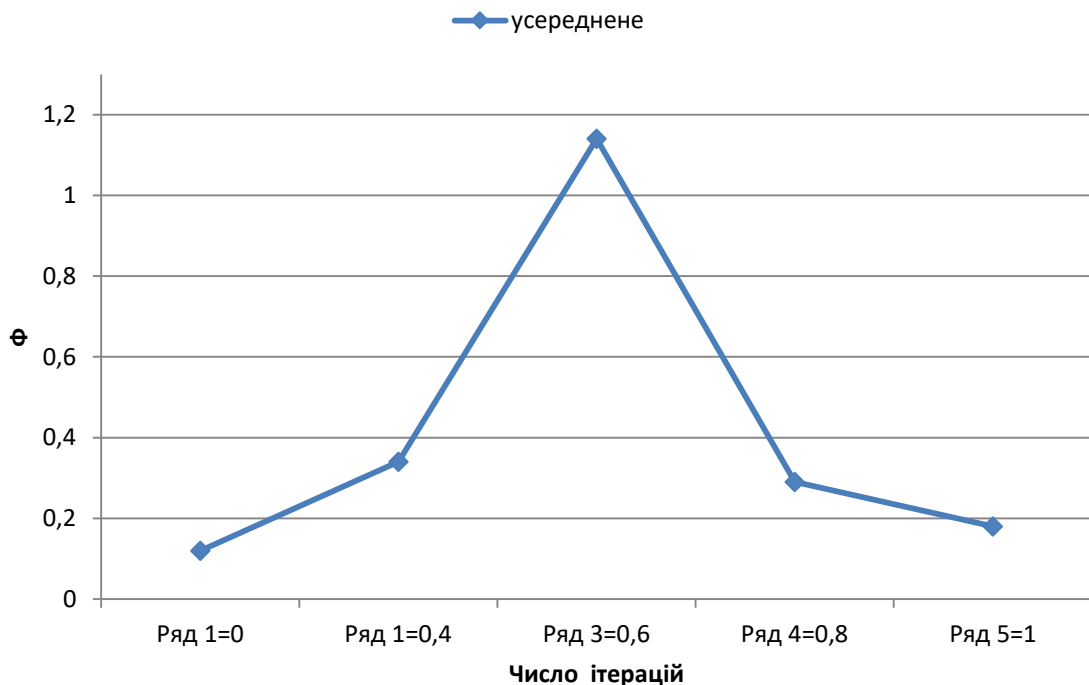


Рисунок 2.15 – Профілі ϕ , ϕ_x , ϕ_y і ϕ_{xy} при $x = 0,5$ для $Re = 5$ для 59×59 сітки та $\theta = 45$ градусів

Залишкова помилка у вузлі кожної сітки обчислюється як дисбаланс відповідного кінцево-різницевого рівняння.

Суми абсолютних залишкових помилок основної сітки, x -сітки, y -сітки та xy -сітки наводяться у відсотках від загальних потоків ϕ , що надходять, проти кількості ітерації (n) на рисунку 2.9, для $Pe = 5$ та $URF = 0,3$.

Ітерації зупиняються коли максимальна похибка будь-якої сітки становить менше 0,1%. Умова задовольняється при $n = 975$ ітерацій. Вищенаведений критерій перетворення також майже задоволений поблизу $n = 600$.

Однак більша кількість ітерацій прихильна для забезпечення повного перетворення.

Шаблон змін кривих помилок дуже цікавий. Основна сітка та помилки xy -сітки схожі і монотонно зменшуються. Однак x -сітка і помилки y -сітки майже однакові, як видно з рисунка 2.9. Вони сходяться швидше на початку, а потім раптом трохи розходяться лише для сходження до бажаної точності при 975 ітераціях.

Частина швидкої конвергенції на початку пояснюється тим, що для x -сітки використовувались значення чотирьох сторін за ітерацію та y -сітка, тоді як лише два значення за ітерацію виявились достатніми для основної сітки. Цікаво помітити, що чотири сітки взаємодіють таким чином, що основна сітка та сітка xy не мають прямого зв'язку. Однак вони є опосередковано пов'язані завдяки їх взаємодії як з x -сіткою, так і з y -сіткою. З іншого боку, x -сітка та y -сітка встановлюють свій непрямий зв'язок, взаємодіючи безпосередньо як з основною сіткою, так і з xy -сіткою.

Зв'язок сіток пояснює спарювання суми абсолютних залишкових помилок основної сітки та xy -сітки як а також сполучення x -сітки та y -сітки.

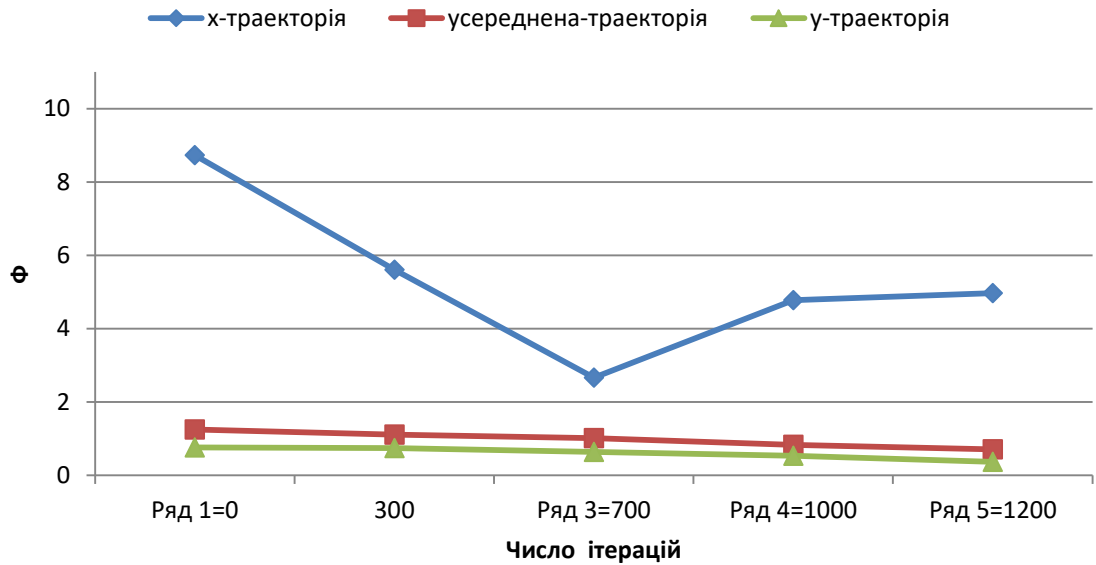


Рисунок 2.16 – Відсоткова сума абсолютних залишкових помилок рівнянь кінцевих різниць усереднених, x-, y- к NIMO для $Re = 5$ для 59×59 сітки і $\theta = 45$ градусів

Точне аналітичне рішення питання використовується як початкова здогадка для φ , φ_x , φ_y та φ_{xy} для всіх циклів. NIMO та гібридні профілі φ зображені на рисунку 2.10 для $Re = 1.0$ та $x = 0,5$. У цьому випадку φ рівномірно транспортується конвекцією та дифузією.

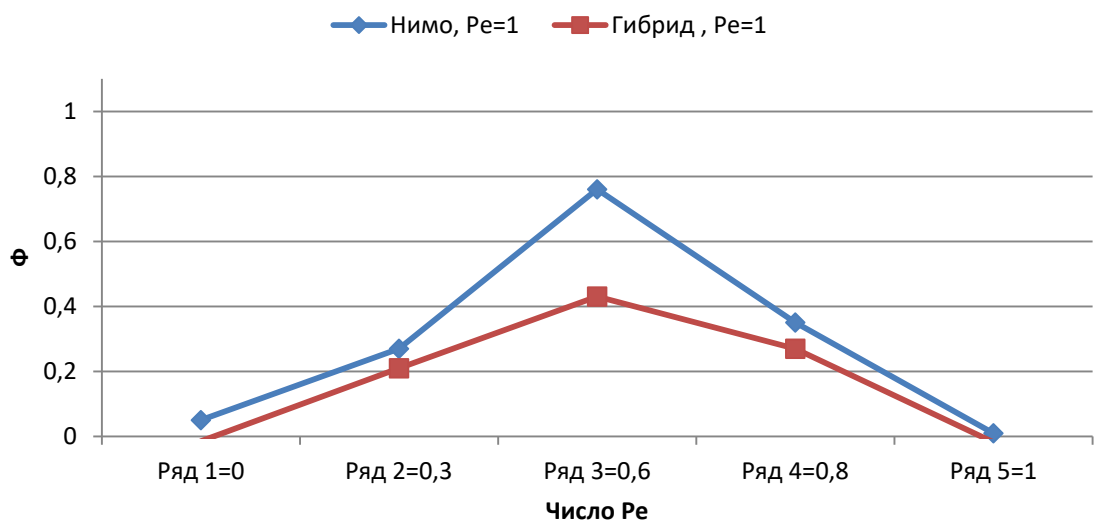


Рисунок 2.17 – Профілі φ для NIMO та гібридні схеми при $x = 0,5$ для $Re = 1$ для 59×59 сітки та $\theta = 45$ градусів

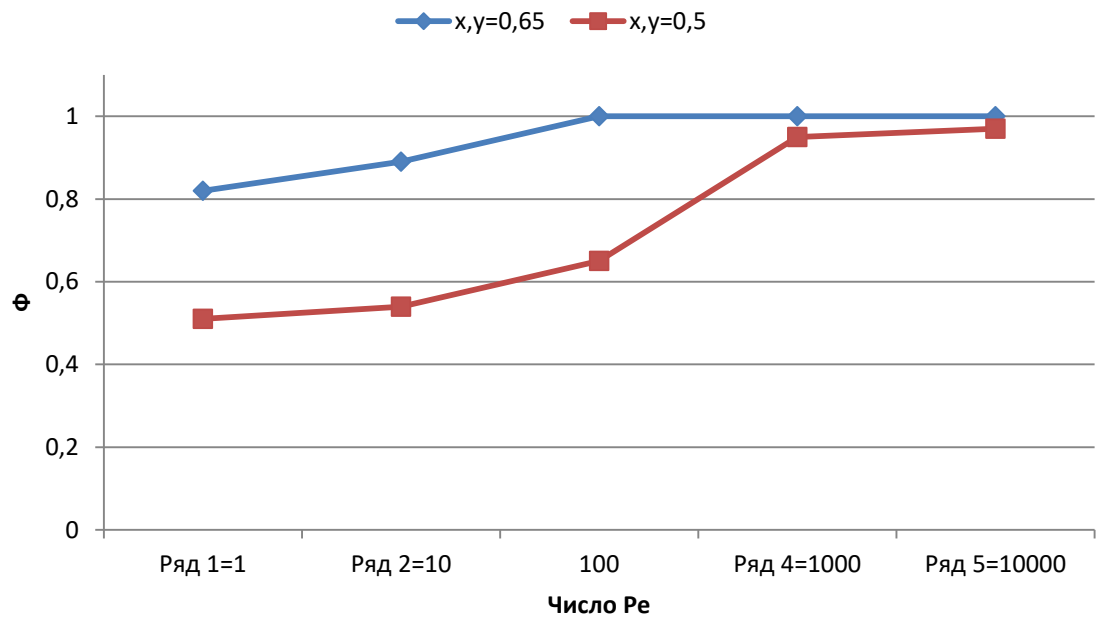


Рисунок 2.18 – Значення NIMO ϕ на межі $[(x, y) = (0, 65)]$ та в центрі матриці рішення $[(x, y) = (0, 5)]$ числа Пекле для 59×59 сітки і $\theta = 45$ градусів

На рисунку 2.10 видно, що гібридна схема виробляла похилі профілі ϕ уздовж вісь y , тоді як NIMO правильно прогнозує симетричні профілі. Скручена частина ϕ - результат неминучої хибної дифузії гібридної схеми, якає результатом дуття вітру по позитивному напрямку осі y . Це також може бути виявленим з профілю гібридної схеми ϕ , для $Re > 2,0$, що показано на рисунку 2.7. Подібні перекошені профілі ϕ отримано для $Re > 2,0$. З рисунка 2.10 видно, що центральне значення ϕ вище по схемі NIMO. Це пояснюється тим, що гібридна схема страждає від екстранумерів дифузії, як показано на рисунку 2.10.

Цікаво також визначити мінімальну значення числа Пекле, яку виробляє по суті плоский профіль ϕ вздовж осі y на $0,35 < y < 0,65$. Це досягається в рисунку 2.11, побудувавши графік значення ϕ по краю і по центру діагонального краю проти Пекле. Значення 104 якраз достатньо для Пекле для отримання майже бездифузійної картини результатів.

Контури ϕ , що створили рисунок 2.11 зображені на рисунку 2.12, косий ϕ профіль гібридної схеми вздовж напрямку координат також з рисунка 2.12а.

Однак, здається, контури гібридної схеми є майже симетричний навколо діагоналі області рішення, оскільки це справжній напрямок потоку. Більше того, результати NIMO вказують, що ϕ більше міститься всередині зони, обмеженої $y = 0,35$ і $y = 0,65$, як видно з рисунку 2.12b. Більше контурів нанесено на рисунку 2.13. Додаткові контури NIMO є для $Pe = 10, 50, 200$ та 1000 . На рисунку 2.13а показана гібридна схема ϕ контурів для $Pe > 2.0$. Гібридні контури показують, що ϕ залишається близьким до єдності в дуже невеликих площах поруч із впускною секцією, де ϕ приймає значення $1,0$.

Однак, контури NIMO показують, що площа, де ϕ залишається незабрудненою, збільшується зі збільшенням числа Пекле. Нарешті при $Pe = 1000$, більша частина ядра вздовж діагоналі області розчину заповнена однорідною ϕ рідини, як видно оточує діагональне ядро, зменшуються зі збільшенням числа Пекле.

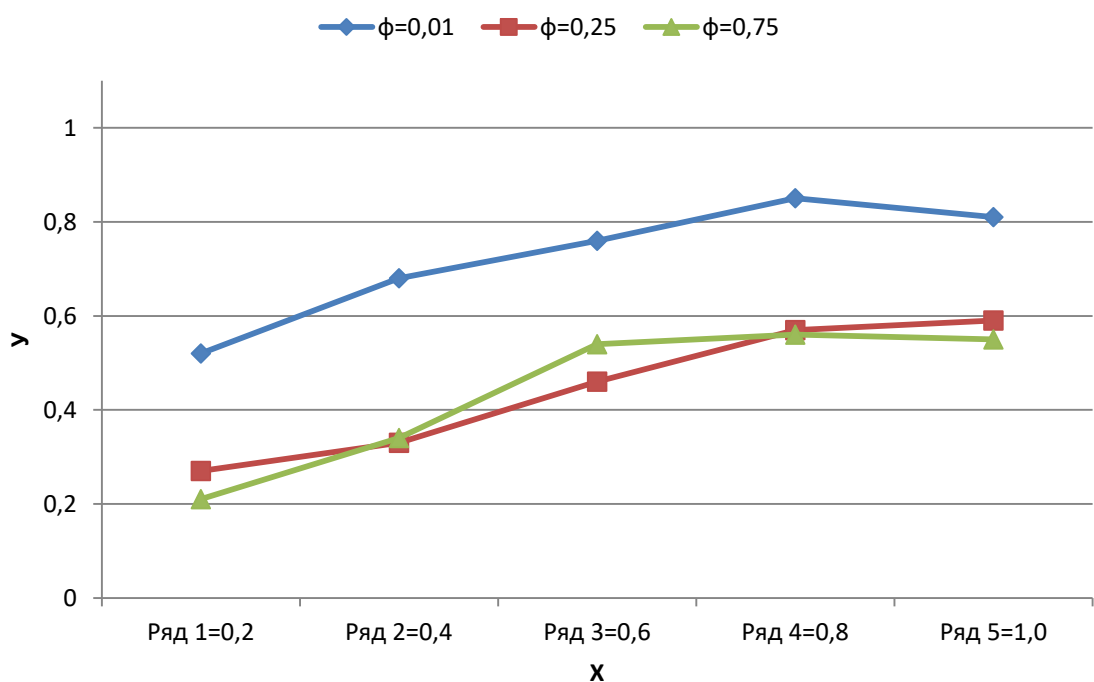


Рисунок 2.19 – Вплив ϕ на число Пекле. Сітка 59×59 квадратів, $\theta = 45$ градусів, $Pe = 1$

Вузькі смужки стають майже відсутніми в міру збільшення кількості Пекле понад 1000. Для того, щоб з'ясувати, скільки схем NIMO залежить від умов, вздовж розділів виходу матриці рішення, працює кілька комп'ютерів. Ці дослідження мали нульові градієнти ϕ на виїзній ділянці замість граничної умови з фіксованою ϕ -величиною.

Дослідження показали що схема NIMO не чутлива до зміни граничної умови для конфігурації потоку на рисунку 2.5, за винятком вузлів, що знаходяться дуже близько до виходу межі матриці. Для цих вузлів незначні відмінності на порядок $\pm 0,1\%$ між граничними умовами нульового градієнта та фіксованою величиною не впливають.

Для того щоб перевірити узгодженість схеми NIMOshe, було встановлено ряд сіток використовується для обчислення косоного потоку на рисунку 2.5 для $\theta = 45$ градусів. Всі сітки мають 59 вузлів уздовж координати x , тоді як 53, 59 та 69 вузлів використовують уздовж y -координата. Одна з цих сіток є неоднорідною (59×69), а інші три є рівномірними (59×53 , 59×59 і 59×69).

Програми скалярної змінної, уздовж $x = 0,5$ площини, показані на рисунках 2.14 та 2.15, для двох номінальних значень числа Пекле, а саме 50,0 і 1000. Тільки 59×59 квадратної сітки має рівномірну форму. Однак прямокутні рівномірні сітки мають значення числа Пекле вздовж осі y , вищого або нижчого, ніж номінальне значення по осі x . Це тому що x не дорівнює y для прямокутних сіток, тоді як рідина фізична властивості є рівномірними і $u = v$ для 45-градусного потоку. Причому неоднорідність сітки має значення Пекле, які залежать від місця. Для номінальної кількості Пекле – 50,0, профілі ϕ при $x = 0,5$ для вищезазначених розмірів сітки.

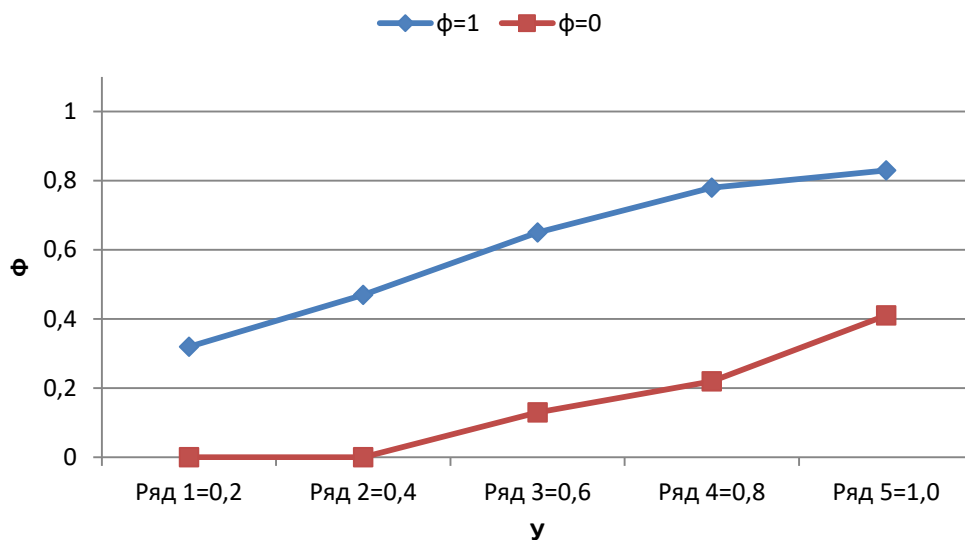


Рисунок 2.20 – Гібридна схема ($Pe > 2$) та система NIMO (59×59) квадратних сіток, $\theta = 45$ градусів і $Pe = 10, 50, 200$ і 1000 . (e) NIMO, $Pe = 1000$

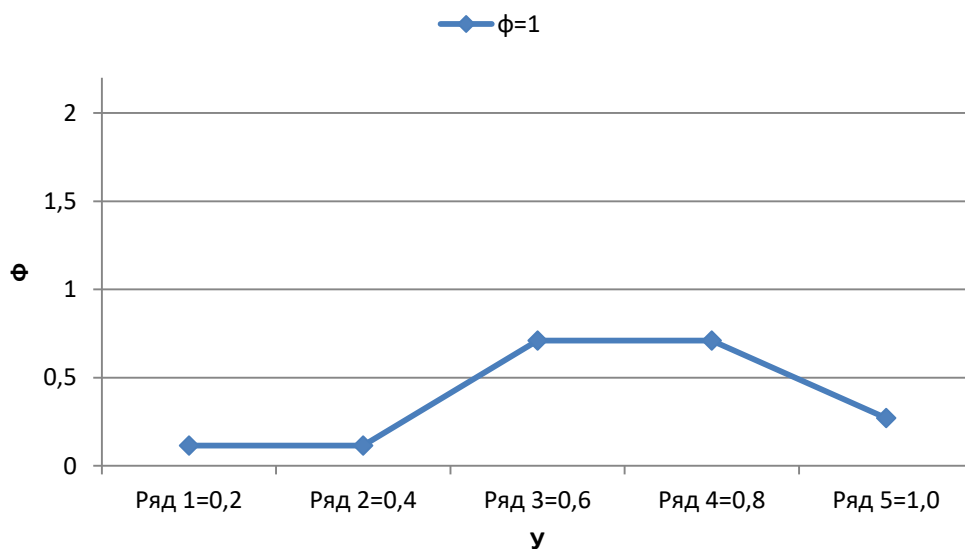


Рисунок 2.21 – Профілі ϕ при $x = 0,5$ для різних розмірів і геометрії сітки для чисел Пекле 50 і $\theta = 45$ градусів

Незначні відмінності між ними виникають через неоднорідність числа Пекле прямокутної і неоднорідної сітки. Профілі ϕ для різних геометрій і розмірів сітки зображені на рисунках 2.22 та 2.23.

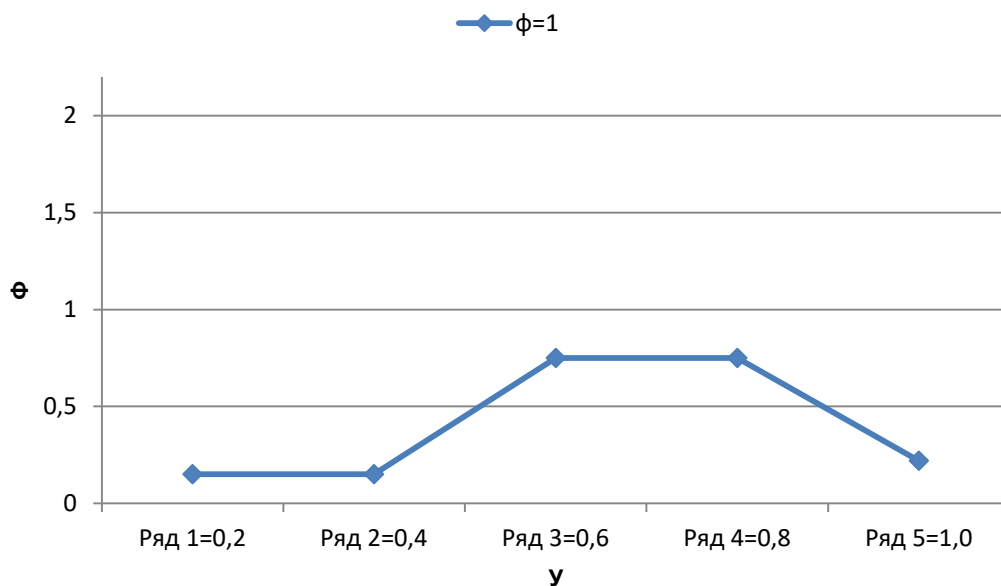


Рисунок 2.22 – Профілі ϕ при $x = 0,5$, для одноманітних і нерегулярних різних розмірів сітки, Пекле по $x = 1000$ і $\theta = 45$ градусів

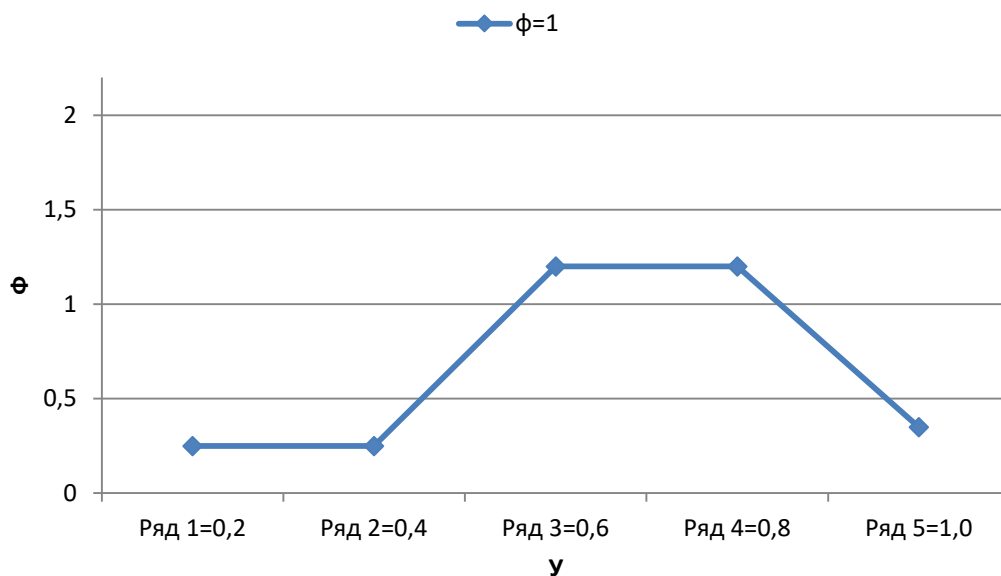


Рисунок 2.22 – Профілі ϕ , при $x = 0,5 / \tan \theta$, для сіток 99×59 , значення Пекле по $y = 1000$, а $\theta = 30$ градусів

Неоднорідна сітка рівномірна уздовж x -координати, неоднорідна -у напрямком. Сітка 59×69 скорочується уздовж координати y від зовнішніх меж у напрямку до центру, де $y = 0,5$. Для цієї сітки співвідношення максимум

приросту до мінімального приросту уздовж координати y становить 4,5. Профілі по суті, фіксують аналітичний розчин для нескінченного числа Пекле і $\theta = 45$ градусів, хоча вони були обчислені для різних геометрій та розмірів сітки.

Можна зробити висновок, що незалежно від розмірів або геометрії обчислювальна сітка, схема NIMO здатна обчислити точне рішення. Однак перекошена схема, що відрізняється від течії Райтбі [11], може охопити точне рішення тільки для квадратних сіток, де діагоналі обчислювальної осередки паралельні та нормальні до напрямку потоку.

Ще одне випробування введено на рисунку 2.16 для кута нахилу 30 градусів. У цьому випадку косий потік проходить по діагоналі через прямокутник матриці. Відстань матриці рішення та компоненти швидкості вздовж осі x приблизно рівні 1,73. Сітка, яка використовується для профілів на малюнку розміри 99×59 . Значення Пекле вздовж x - та y становлять 1,730 та 1000 відповідно. Тут також немає жодної обчислювальної комірки, діагоналі паралельні або нормальні. Однак профіль ϕ захоплює точне аналітичне рішення для нескінченних чисел Пекле, як видно з рисунку 2.16.

2.7 Дослідження радіального обертання потоку

Питання підвищення ефективності тепломасообміну обрано в циліндрично-полярній області для перевірки точності та застосованості числової схеми NIMO в координатах. Циліндрично-полярна обчислювальна область задачі обертання радіального потоку в кільцевому секторі з одномоментною зміною на пасивну скалярну змінна ϕ від 0 до 1 кривизна.

Тангенціальна швидкість u приймається рівномірною і дорівнює одиниці, тоді як радіальна швидкість v пропорційна радіальній відстані r . Ця конфігурація швидкості задовольняє масовій безперервності радіального потоку, що обертається з постійною щільністю, у кільцевому секторі.

Кільцевий сектор обмежений уздовж $r_0 = 1,0$; $r_1 = 2,0$; $\theta = 0,0$ і $1,0$ радіальний і тангенціальний напрямки відповідно. Пасивна скалярна змінна ϕ дорівнює $0,0$ та $1,0$ для двох вхідних секцій, визначених $\theta = 0,0$ та $r = 1,0$. Для нескінченних чисел Пекле, секції виходу мають значення ϕ , рівні $1,0$ та $0,0$ для $\theta = 1,0$ і $r = 2,0$ відповідно. У цьому випадку точне рішення для потокової лінії що розділяє сектор на зону $\phi = 0,0$ та іншу зону з $\phi = 1,0$ на рисунку 2.18 показано потік, який проходить від точки $(1,0)$ до точки $(2,1)$, накладеному на задане поле вектора швидкості. Вектор швидкості різниться за напрямком і величиною, що є хорошим прикладом ступіні точності чисельної схеми NIMO в умовах, коли хибна дифузія відсутня. Рівняння (2.20), (2.25), (2.26) та (2.27) застосовні до 2D циліндричних полярних координат потоків. Надписи x , y і xu замінюються на θ , r і $r\theta$, при цьому відстані між центральним вузлом та сусідніми вузлами стають $r\delta\theta$ і δr , по тангенціальному та радіальному напрямкам відповідно. Питання використання однакої сітки 59×59 накладається на область рішення кільцевого сектору. Відстані по тангенціальному (кутовому) напрямку, які є залучені до рівнянь NIMO, збільшують в радіальному напрямку, хоча сітка сама по собі рівномірна.

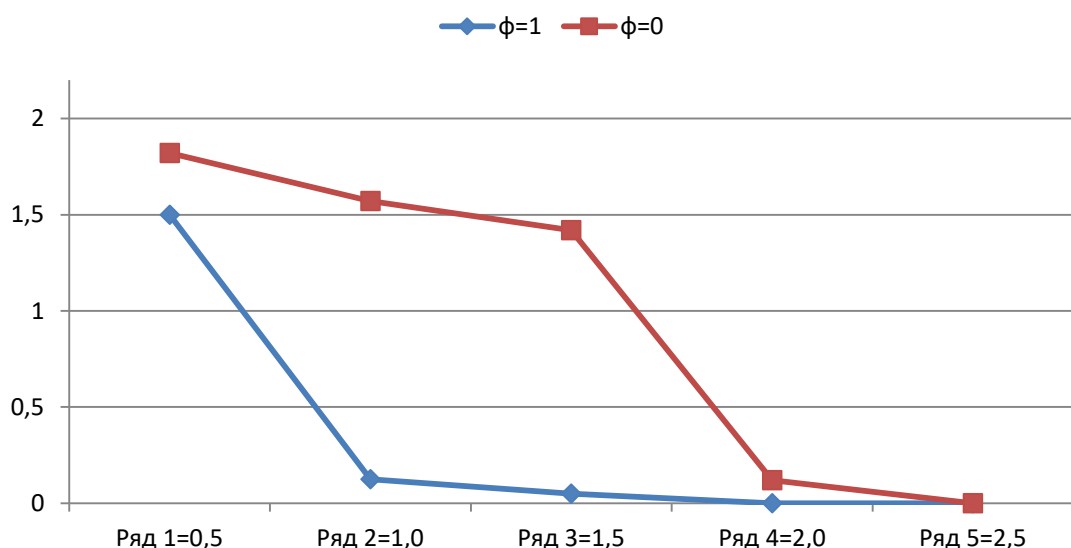


Рисунок 2.24 – Поле вектора швидкості для обертового радіального потоку, гранична крива між областями $\phi = 1$ і $\phi = 0$ у площині $r\theta$, для нескінченного числа Пекле

2.8 Числові результати другої задачі тесту

Чисельне рішення задачі виміру теплового потоку отримано за допомогою TDMA, рядок за рядком, АДА. Значення 10^4 для значення Пекле в точці $(r, \theta) = (1, 0)$ вважається достатнім для отримання майже бездифузійних профілів пасивного скаляру змінної. URF приймається як 0,5, що дало конвергентні розчини після 500 ітерації з похибкою менше 0,1%. Місцеве значення Пекле уздовж тангенціального (кутового) напрямку збільшується від 10^4 до 2×10^4 , одночасно по радіальному напрямку вона зменшується з 10^4 до 5×1000 . Це результат варіацій уздовж радіального напрямку променевої швидкості та тангенціальної відстані.

На рисунку 2.19 показані кутові профілі обчисленої пасивної скалярної змінної ϕ чисельно і відповідний крок функціонує точне рішення. Точне рішення виходить для граничного випадку нескінченного числа Пеклета. Угоди між двома профілями відмінні. Основні відмінності виникають у дуже вузькому кутовому поясі, де ϕ різко змінюється від 1,0 до 0,0. Однак за межами цієї вузької зони, ϕ правильно обчислюється як нуль з одного боку та одиниця з іншого.

Аналогічно радіальні профілі пасивного скаляра зображені на рисунку 2.20. Результати NIMO показують відмінну згоду з точним рішенням зміни кроку функції пасивної скалярної змінної. Градієнт пасивного скаляра по радіальному напрямку ($\delta\phi / \delta r$) вище, ніж по тангенціальному напрямку ($\delta\phi / r\delta\theta$), як видно з рисунків 2.19 та 2.20. Це результат вище середнє значення числа Пекла по радіальному напрямку.

Обчислюється за допомогою тонкої вигнутої смуги, де ϕ коливається від 0,001 до 0,999 схема NIMO. Поза цією вузькою смужкою змінюється пасивна скалярна змінна різко від 0,0 до 1,0. Цікаво помітити схожість між формою вузької смуги і точної кривої розчину, що розділяє кільцеву секторів до $\phi = 0,0$ та 1,0 зони (рисунок 2.18).

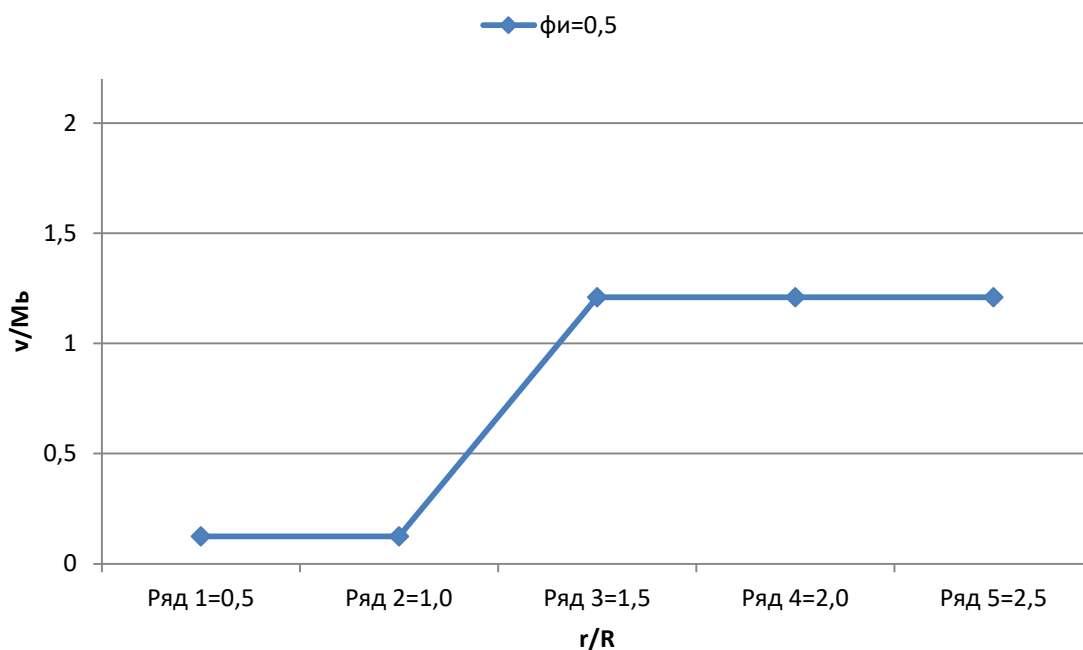


Рисунок 2.25 – Кутові профілі ϕ , при $r = 1,5$, для чисел Пекле, починаючи від 5 000 до 10 000 (кутовий) і від 10 000 до 20 000 (радіальний), використовуючи 59×59 циліндрично-полярної сітки

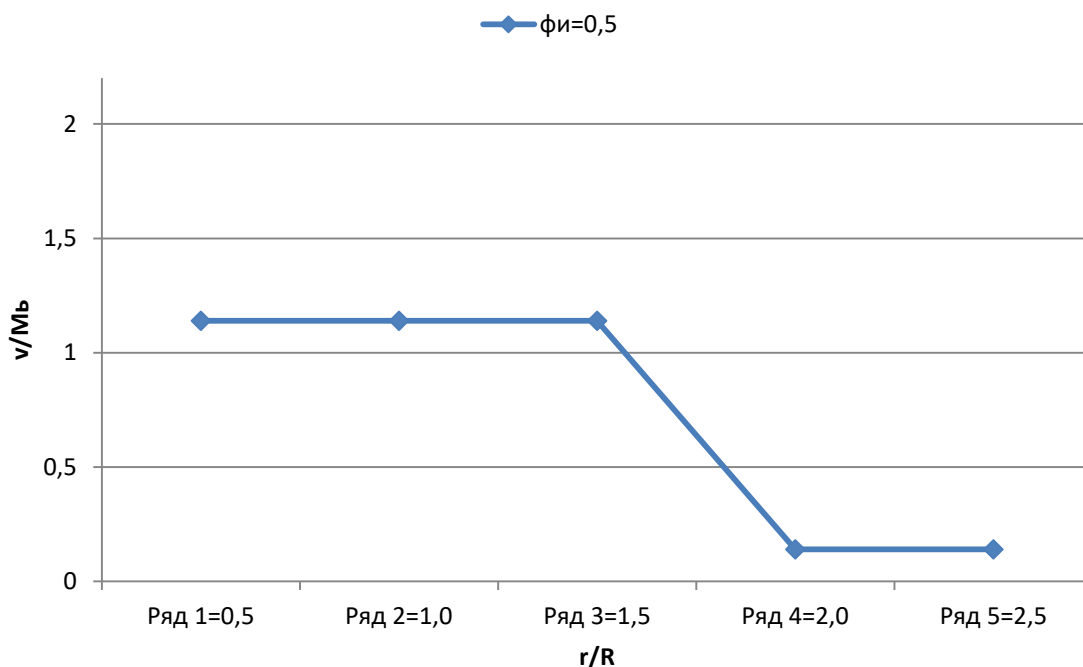


Рисунок 2.26 – Профілі ϕ , при $\theta = 0,5$ рад, для чисел Пеклета від 5000 до 10 000 (кутовий) і від 10 000 до 20 000 (радіальний), використовуючи 59×59 циліндрично-полярну сітку

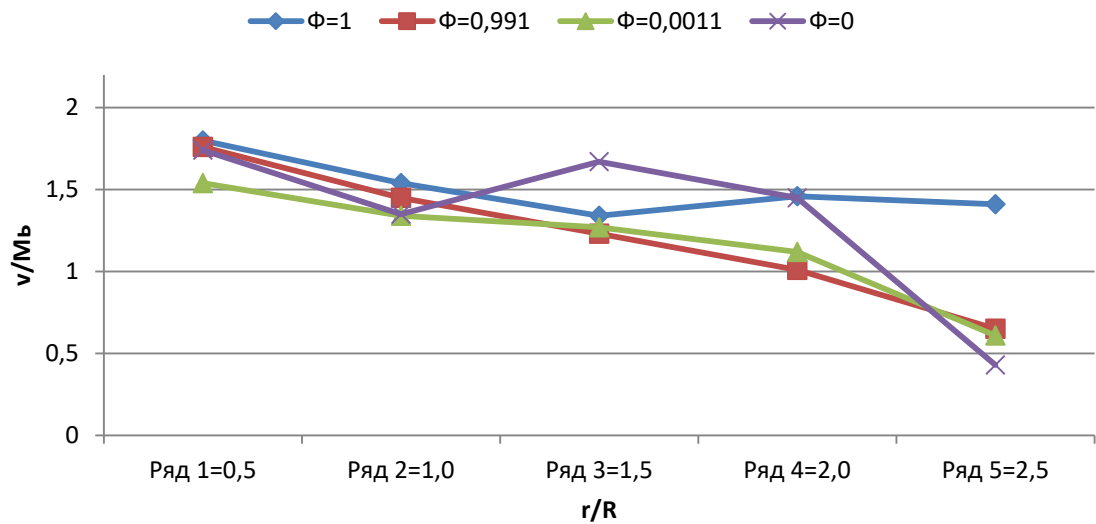


Рисунок 2.27 – Відкриті контури пасивної скалярної змінної ϕ , для сітки 59×59 $r\theta$ сектор

Система кінцево-різницевих рівнянь (2.20), (2.25) - (2.27) може далі бути спрощеним, якщо центральний вузол (i, j) замінено на індекс P , тоді як сусідні вузли позначаються E , W , N та S . Фактичне положення у просторі xy визначається суперскрипт на головній змінній ϕ для відображення різні обсяги контролю CV , CV^x , CV^y та CV^{xy} схеми NIMO.

Тому рівняння NIMO спрощуються

$$a_{\rho} \Phi_{\rho} = \sum_n a_n \Phi_n + S_n + S_u; \quad (2.48)$$

$$a_{\rho}^x \Phi_{\rho}^x = \sum_n a_n^x \Phi_n^x + S_n^x + S_u^x; \quad (2.49)$$

$$a_{\rho}^y \Phi_{\rho}^y = \sum_n a_n^y \Phi_n^y + S_n^y + S_u^y; \quad (2.50)$$

$$a_{\rho}^{xy} \Phi_{\rho}^{xy} = \sum_n a_n^{xy} \Phi_n^{xy} + S_n^{xy} + S_u^{xy}; \quad (2.51)$$

де підсумовування \sum та знаходиться над чотирма сусідніми вузлами (E , W , N та S) центральний вузол P кожної сітки схеми NIMO.

Коефіцієнти a_P , a_P^x , a_P^y , a_P^{xy} визначаються

$$a_p = \sum_n a_n - S_p; \quad (2.52)$$

$$a_p^x = \sum_n a_n^x - S_p^x; \quad (2.53)$$

$$a_p^y = \sum_n a_n^y - S_p^y; \quad (2.54)$$

$$a_p^{xy} = \sum_n a_n^{xy} - S_p^{xy}. \quad (2.55)$$

У наведених рівняннях S_P і S_u є коефіцієнтами лінеаризованого джерела умов початкових керуючих рівнянь. Більше того, S_N , S_{xN} , S_{yN} і S_{xyN} зайві вихідні умови, що впливають із схеми NIMO

$$\begin{aligned} S_N = & (\bar{c}_w \Phi_\Gamma + c_w \Phi_w^x - \bar{c}_w \Phi_w) + (\bar{c}_E \Phi_\Gamma + c_E \Phi_\Gamma^x - \bar{c}_E \Phi_E) + \\ & + (\bar{c}_S \Phi_\Gamma + c_S \Phi_S^x - \bar{c}_S \Phi_S) + (\bar{c}_N \Phi_\Gamma + c_N \Phi_\Gamma^x - \bar{c}_N \Phi_N); \end{aligned} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} S_N^x = & (\bar{c}_w^x \Phi_\Gamma^x + c_w^x \Phi_w^x - \bar{c}_w^x \Phi_w^x) + (\bar{c}_E^x \Phi_\Gamma^x + c_E^x \Phi_\Gamma^x - \bar{c}_E^x \Phi_E^x) + \\ & + (\bar{c}_S^x \Phi_\Gamma^x + c_S^x \Phi_S^x - \bar{c}_S^x \Phi_S^x) + (\bar{c}_N^x \Phi_\Gamma^x + c_N^x \Phi_\Gamma^x - \bar{c}_N^x \Phi_N^x); \end{aligned} \quad (2.58)$$

$$\begin{aligned} S_N^y = & (\bar{c}_w^y \Phi_\Gamma^y + c_w^y \Phi_w^y - \bar{c}_w^y \Phi_w^y) + (\bar{c}_E^y \Phi_\Gamma^y + c_E^y \Phi_\Gamma^y - \bar{c}_E^y \Phi_E^y) + \\ & + (\bar{c}_S^y \Phi_\Gamma^y + c_S^y \Phi_S^y - \bar{c}_S^y \Phi_S^y) + (\bar{c}_N^y \Phi_\Gamma^y + c_N^y \Phi_\Gamma^y - \bar{c}_N^y \Phi_N^y); \end{aligned} \quad (2.59)$$

$$\begin{aligned} S_N^{xy} = & (\bar{c}_w^{xy} \Phi_\Gamma^{xy} + c_w^{xy} \Phi_w^{xy} - \bar{c}_w^{xy} \Phi_w^{xy}) + \\ & + (\bar{c}_E^{xy} \Phi_\Gamma^{xy} + c_E^{xy} \Phi_\Gamma^{xy} - \bar{c}_E^{xy} \Phi_E^{xy}) + (\bar{c}_S^{xy} \Phi_\Gamma^{xy} + c_S^{xy} \Phi_S^{xy} - \\ & - \bar{c}_S^{xy} \Phi_S^{xy}) + (\bar{c}_N^{xy} \Phi_\Gamma^{xy} + c_N^{xy} \Phi_\Gamma^{xy} - \bar{c}_N^{xy} \Phi_N^{xy}). \end{aligned} \quad (2.60)$$

У наведених рівняннях кінцеві різницеві коефіцієнти a_E , a_w , a_N і a_S є все ще задані відповідно рівнянням (2.59) - (2.60). Наприклад, $\Phi^x P$ – залежна

змінна в центральному вузлі Р контрольного об'єму CV^x , що відображає зсув x -сітки відносно основної сітки, як показано на рисунку 2.3.

2.9 Застосування схеми NİMO до вивчення ламінарного потоку

Схема NİMO може застосовуватися для проблем з постійним потоком. Для постійної щільності питання ламінарного потоку в'язкості та керуючі рівняння для імпульсу та маси записуються в тензорній формі

$$\frac{\partial(\rho u_i \rho u_j)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i}; \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (2.62)$$

де μ - ламінарна в'язкість, m^2/c ;

u_j - компонент швидкості по координаті x_j , m/c ;

p - тиск рідини, МПа.

Для 2D потоку $u_j = (u_1, u_2)$, а $x_j = (x_1, x_2)$.

З іншого боку, якщо використовується площина x - y , тоді $u_j = (u, v)$ і $x_j = (x, y)$. У цьому випадку, використовуючи рівняння (2.38) - (2.41), рівняння кінцевих різниць для u і v дано

$$a_u p_u p = \sum a_{un} u_n + A_u E (p_p^x - p_E^x) + S_{un}; \quad (2.63)$$

$$a_v p_v p = \sum a_{vn} v_n + A_v E (p_s^y - p_s^x) + S_{uv}, \quad (2.64)$$

де u і v позначають коефіцієнти компонентів швидкості.

Також A_u та A_v - це ділянки поверхонь CV з основної сітки з контрольним об'ємом нормально до u та v відповідно. Аналогічно для CV^x , CV^y та CV^{xy} імпульс кінцево-різницевого рівняння

$$a^x_u p u^x p = \sum a^x_{unu} u^x_n + A^x_u E (p_p^x - p_E^x) + S^x_{uv}; \quad (2.65)$$

$$a^x_v p v^x p = \sum a^x_{vnu} v^x_n + A^x_v E (p_S^x - p_p^x) + S^x_{vN}; \quad (2.66)$$

$$a^u_u p u^x p = \sum a^y_{unu} u^y_n + A^x_u E (p_p^x - p_E^x) + S^x_{uv}; \quad (2.67)$$

$$a^y_v p v^y p = \sum a^y_{vnu} v u^y_n + A^y_v N (p_p - p_N) + S^y_{vN}; \quad (2.68)$$

$$a^{xy}_u p u^{xy} p = \sum a^{xy}_{unu} u^{xy}_n + A^{xy}_u E (p_p^y - p_E^y) + S^{xy}_{uN}; \quad (2.69)$$

$$a^{xy}_v p v^{xy} p = \sum a^{xy}_{uN} v^{xy}_n + A^{xy}_v N (p_p^x - p_N^x) + S^{xy}_{vN}. \quad (2.70)$$

Рівняння (2.65) - (2.70) визначають вісім компонентів швидкості чотирьох сіток схема NIMO. Для закриття системи потрібні додаткові рівняння для p , p_x , p_y та p_{xy} вищевказані рівняння. Це робиться шляхом написання рівнянь корекції тиску для схеми керування обсягом NIMO CV, CV^x, CV^y та CV^{xy}. Ці корекційні рівняння є аналогами рівнянь масової безперервності для контрольних обсягів CV, CV^x, CV^y та CV^{xy}.

Рівняння корекції тиску CV можна отримати з виправленого компоненти швидкості u^x_p , u^x_w , v у P, і v у S, які використовуються в масовій безперервності кінцево-різницевого рівняння контрольного об'єму CV. Даються кориговані компоненти швидкості

$$u^x_p = u^{x*}_p + D^x_{uE} (p_p^\infty - p_E^\infty); \quad (2.71)$$

$$u^x_w = u^{x*}_w + D^x_{uw} (p_w^\infty - p_p^\infty); \quad (2.72)$$

$$v^y_p = v^{y*}_p + D^y_{vN} (p_p^\infty - p_N^\infty); \quad (2.73)$$

$$v_s^y = v_s^{y*} + D_{vE}^y (p_s^\infty - p_p^\infty), \quad (2.74)$$

де u^x_p , u^x_w , v^y_p , і v^y_s - скориговані компоненти швидкості.

Відповідно до вищевказаних коригованих компонентів швидкості, тиск на кожен вузол сітки виправляється на $(p^* + p')$. Більше того, зірочки вказують компоненти швидкості та тиску на основі імпульсу. У рівняннях (2.60) - (2.63), то D_{uE}^x та D_{vN}^y визначаються коефіцієнти

$$D_{uE}^x = \left(\frac{\partial u}{\partial p} \right)_E = \frac{A_{uE}^x}{a_{uP}^x}, \quad (2.75)$$

$$D_{vN}^y = \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_N = \frac{A_{vN}^y}{a_{uP}^y}. \quad (2.76)$$

Подібні вирази існують і для D_{uw}^x та D_{vs}^y . Підстановка рівнянь (2.60) - (2.63) в рівняння масової безперервності CV, відповідне рівняння корекції тиску можна отримати

$$a_p p_p^\infty = \sum a_n p_n' - \delta_m p_x, \quad (2.77)$$

де p - корекція тиску основної сітки;

$\delta_m p_x$ - надлишкова маса залишаюча контрольний об'єм CV за одиницю часу.

Він визначається

$$\delta_m p_x = \rho_E A_{uE}^x U_p - \rho_w A_{uw}^x W^x + \rho_N A_{vN}^y v p^y - \rho_S A_{vs}^y v^y. \quad (2.78)$$

Коефіцієнт кінцевих різниць a означає a_E , a_w , a_N і a_S , і може визначатися

$$a_E = \rho_E A_{uE}^x D_{uE}^x. \quad (2.79)$$

$$a_N = \rho_N A_{vN}^y D_{vN}^y. \quad (2.80)$$

Подібні вирази існують для AW та AS. Решта виправлення тиску рівняння для CV^x , CV^y та CV^{xy} отримують аналогічно:

$$a^x_p p'_p{}^x = \sum a^x_n p'_n{}^x - \delta^x_{mp}; \quad (2.81)$$

$$a^y_p p'_p{}^y = \sum a^y_n p'_n{}^y - \delta^y_{mp}; \quad (2.82)$$

$$a^{xy}_p p'_p{}^{xy} = \sum a^{xy}_n p'_n{}^{xy} - \delta^{xy}_{mp}. \quad (2.83)$$

Рівняння (2.75), (2.76), (2.81) - (2.83) являють собою повний набір скінченної різниці рівняння для u , v , u^x , v^x , u^y , v^y , u^{xy} , v^{xy} , p , p^x , p^y і p^{xy} NIMO схеми. Вищенаведені рівняння корекції різниці тиску застосовуються до турбулентних потоків, а також до ламінарного потоку. Рівняння кінцевих різниць імпульсів для турбулентного потоку мають додаткові умови, ніж ламінарні аналоги. Тепер схема NIMO вищого порядку застосовуватиметься для постійного ламінарного потоку в трубах і 2D стійкого ламінарного потоку через перешкоду.

2.9.1 Стійкий ламінарний потік у трубах

Рівняння (2.50), (2.51) є керуючими рівняннями для постійних ламінарних проточних труб з постійними фізичними властивостями. Точне аналітичне рішення для цього типу потоку є параболічним профілем для повністю розвиненого розподілу осьової швидкості вздовж радіальної координати

$$\frac{u}{u_0} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (2.84)$$

де u_0 - рівномірна осьова швидкість на вході в трубу, м/с;

r - радіальна відстань від осі труби, м;

R - внутрішній радіус труби, м.

Для вирішення цього рівняння використовується рівняння (2.73), для перевірки точності схеми NIMO. Рівняння (2.52) - (2.59), (2.67) та (2.70) - (2.72) представляють кінцеві різницеві рівняння NIMO, застосовні до ламінарного потоку. Радіус труби R приймається як 1,0 см, а рівномірна осьова швидкість входу 1,0 м/с. Потік газ - повітря при атмосферному тиску і 300 К. Для цього потоку число Рейнольдса дорівнюється 1300. Безрозмірна довжина труби (L / D) - 50. Тиск, нормальний градієнт корекції для кожної сітки схеми NIMO дорівнює нулю, для чотирьох меж матриці рішення. Ця гранична умова діє для всіх питань дослідження. Нульові нормальні градієнти всіх залежних змінних, на ділянці виходу, накладаються. Ця гранична умова є загальною для всіх питань. Вхідна осьова швидкість становить 1,0 м/с, а радіальна швидкість дорівнює 0 м/с.. На стінці труби компоненти швидкості дорівнюють 0 м/с. Однак на осі труби градієнт осьової швидкості дорівнює 0 м/с, радіальна швидкість дорівнює 0 м/с. Для рівномірної (80 × 80) сітки кількість ітерацій дорівнює 1000, що дає помилку менше 0,1 відсотка в рівняннях з кінцевою різницею.

На рисунку 2.22 зображені радіальні профілі безрозмірної осьової швидкості для осьових відстаней (x / D) = 2, 10 та 20. Радіальні профілі осьової швидкості для основної сітки і x -сітки послідовні, показуючи постійне збільшення швидкості по центру.

Повністю розроблені радіальні профілі осьової швидкості, показані на рисунку 2.23 для сіток схеми NIMO, чудово узгоджуються з точним аналітичним рішенням рівняння (2.73). На рисунках 2.22 та 2.23 показано середню осьову швидкість. Профілі радіальної швидкості зображені на рисунках 2.24 та 2.25 для безрозмірних осьових відстаней 2, 10, 20 та 50. Цікаво помітити, як що максимум від'ємної променевої швидкості відбувається при (x / D) = 2, то він різко зменшується при вході. На рисунку

2. 26 показані зміни тиску вздовж осі. Числові результати показують, що тиск рівномірно знижується по довжині труби для подолання напружень зсуву ламінарної стінки.

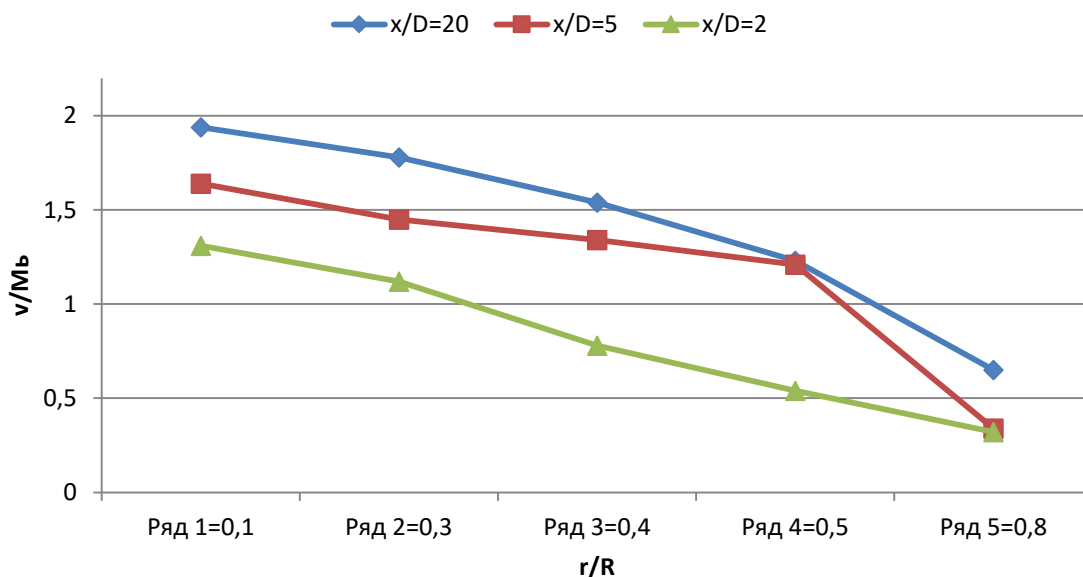


Рисунок 2.28 – Профілі осьової швидкості у різних осьових місцях при ламінарному потоці у трубах з $Re = 1300$

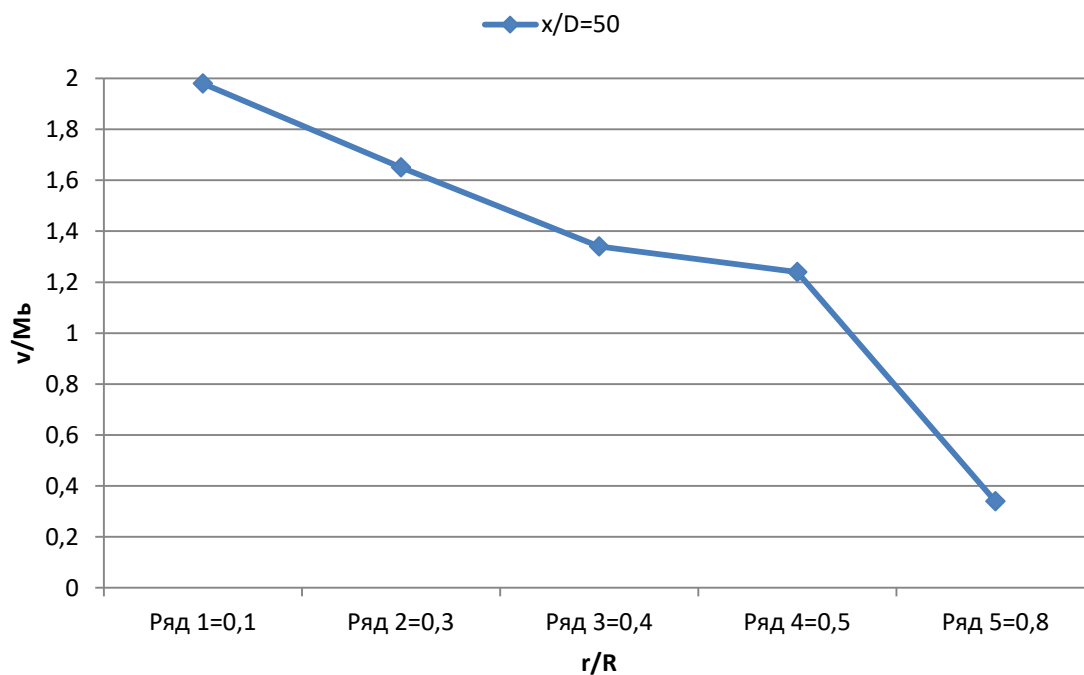


Рисунок 2.29 – Осьовий профіль швидкості для ламінарного потоку в трубі з $Re = 1300$

2.9.2 Стійкий ламінарний потік через перешкоду

Представляє собою 2D стійкий ламінарний потік через одну перешкоду у прямокутному каналі.

Кінцево-різницеві рівняння, які використовуються в задачі про потоки ламінарної труби, також застосовані для течії через перешкоду. Відмінні експериментальні результати отримані, використовуючи лазерно-доплерову анемометрію. Геометрія потоку представлено на рисунку 2.27.

Відстань від нижньої пластини позначається y , а вертикальна відстань між двома пластинами задається H . У наведеному рівнянні y знаходиться в межах від $H = 0,0$ до $1,0$ см. Значення u_0 дорівнює $0,175$ м/с. Потік газ - повітря при 300 К. Число вхідного Рейнольдса (Re) дорівнює $82,5$, що базується на u_0 та висоті огорожі $S (= 0,75H)$. Товщина огорожі - $0,1$ см. Швидкість вхідного потоку обчислюється з рівняння (2.74), тоді як поперечна швидкість (v) дорівнює 0 . Нормальні градієнти корекції тиску, u і v , всі дорівнюють 0 .

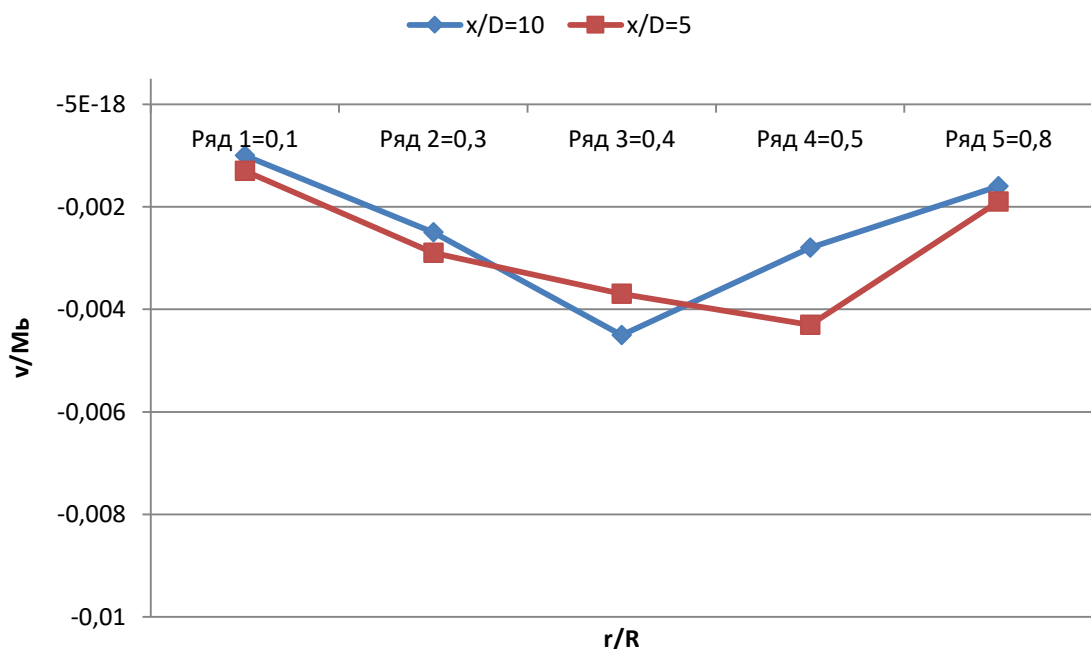


Рисунок 2.30 – Програми радіальної швидкості у різних осьових місцях для ламінарного потоку в трубах з $Re = 1300$

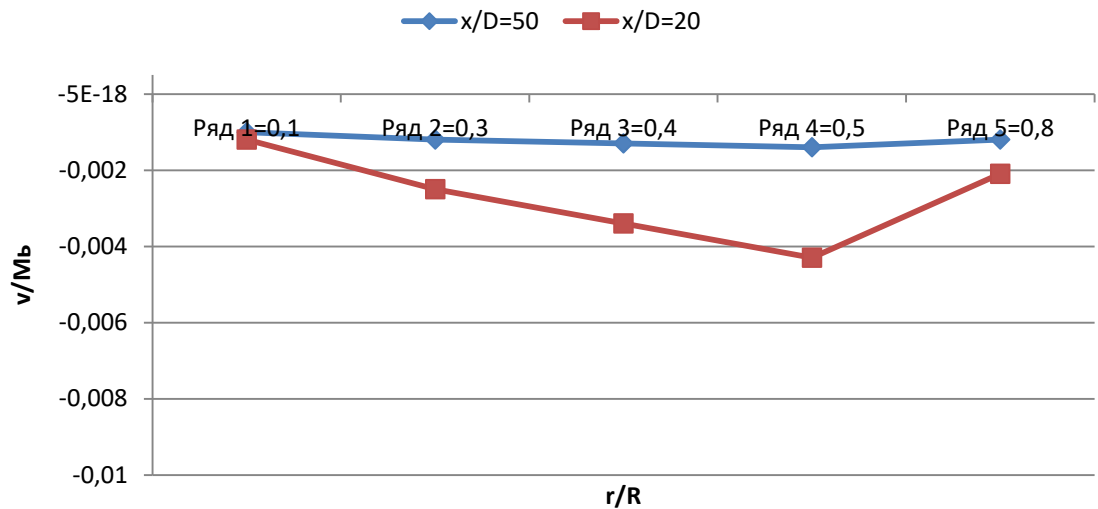


Рисунок 2.31 – Радіальна швидкість у різних осевих місцях для ламінарного потоку в трубах з $Re = 1300$

Вхідна швидкість призначається як повністю розроблений профіль для ламінарного потоку між двома паралельними пластинами граничні тверді поверхні

$$\frac{u_i}{u_o} = 1,5 \left[1 - \left(\frac{H-2y}{H} \right)^2 \right]. \quad (2.85)$$

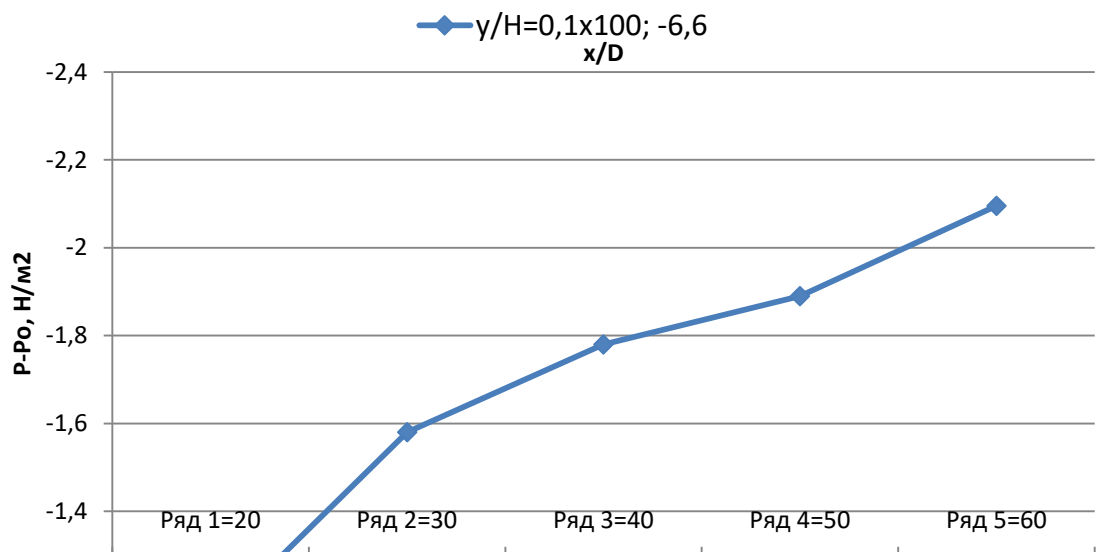


Рисунок 2.32а – Осьовий профіль тиску центральної лінії в ламінарному потоці при $Re = 1300$

Для цього питання з ламінарним потоком використані дві сітки, а саме (100×100) та (150×150) для зменшення помилок, як показано на рисунку 2.326.

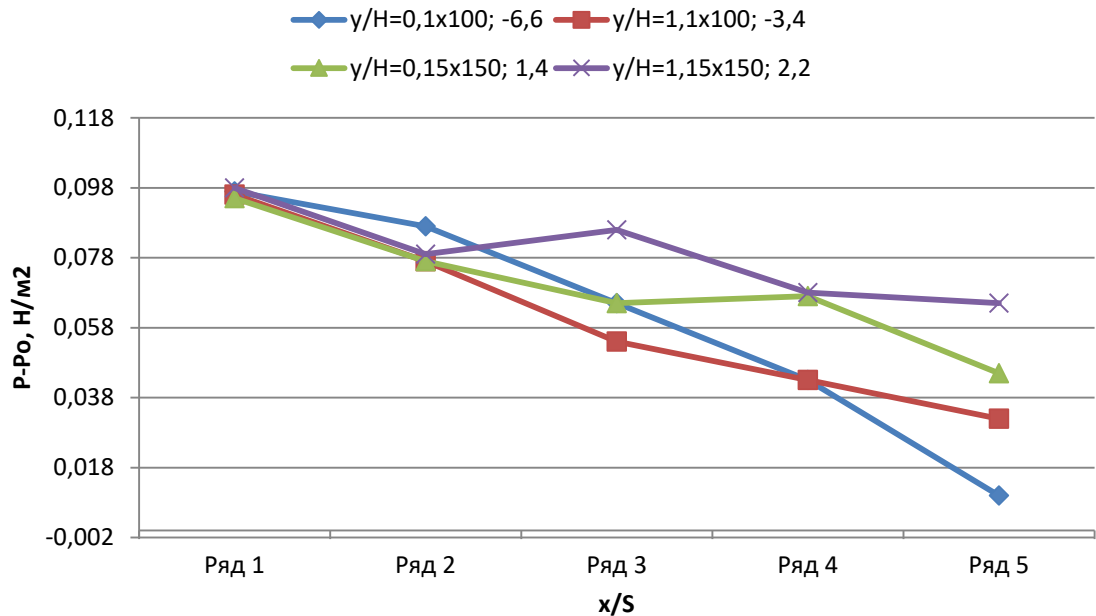


Рисунок 2.326 – Порівняння між прогнозами та вимірами швидкості вздовж осі x (u / u_0) [13] для потоку через засувку, $Re = 82,5$; 1757 та 4000 ітерацій використовується для (100×100) та (150×150) сітки відповідно

Поперечні профілі безрозмірної складової швидкості вздовж осі x зображено на рисунку 2.28 для $(x / S) = -6,6, -5,3, 0,0, 1,2, 2,0, 4,0$ і $6,0$. Осьова відстань вимірюється від лінійного опору. Для $(x / S) < 0,0$ (100×100) і (150×150) сітки ідеально підходили до експериментальних даних. Однак для $(x / S) < 0,0$ більш тонка сітка дала відмінну згоду з експериментальними даними. Однак сітки тонше (150×150) не могло дати більш високої точності.

На рисунку 2.28 видно, що напрямок потоку вниз на $0,0 < (x / S) < 4,0$; тоді газ тече вгору для більш високих значень відстані вздовж осі x . Таким чином, зони рециркуляції створюються біля нижньої стінки для $(x / S) < 4,0$ з подальшими зонами рециркуляції на верхній стінці для більш високих значень (x/S) .

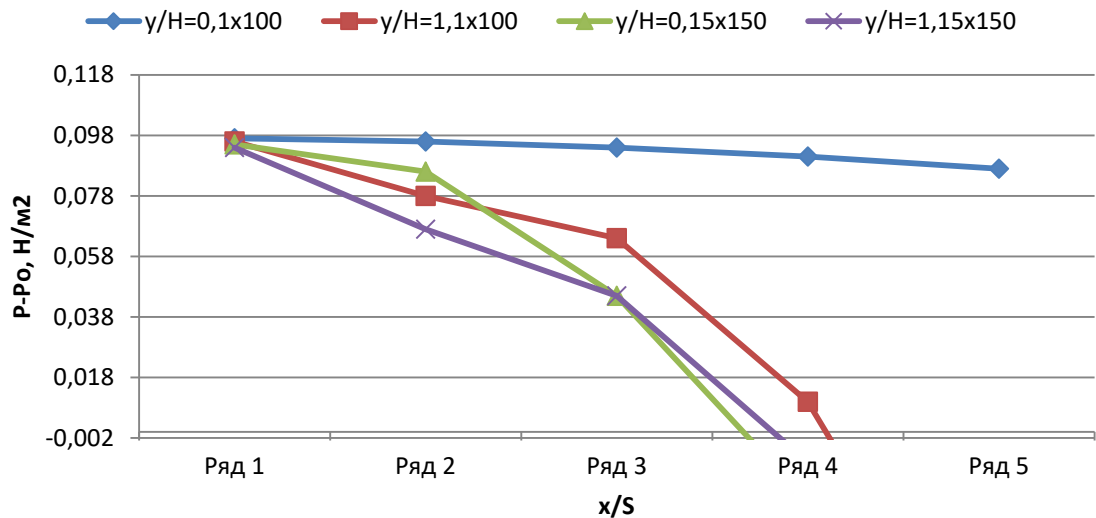


Рисунок 2.33 – Профілі осьового тиску біля верхньої та нижньої стінок для потоку з лінійними опорами по довжині з сіткою 100×100 та 150×150 , $Re = 82,5$

Профілі радіального тиску вздовж осі x зображено на рисунку 2.29 для сіток (100×100) та (150×150). Профілі вибираються при (y / H) , рівних приблизно 0,0 та 1,0 відповідно, біля нижнього і верхньої межі, представлено раптове падіння тиску біля місцевих опорів. Однак біля верхньої стінки вона більш гладка. Більше того, (100×100) сітка прогнозує нижчий тиск на паркані щодо (150×150) сітки.

2.10 Застосування схем вищих порядків точності NİMO до турбулентних течій

Для постійного турбулентного потоку постійної щільності в трубах моделюється середнє значення часу, можна записати рівняння імпульсу

$$\frac{\partial(\rho_i \rho_j)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_t + \mu) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_t + \mu) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \frac{2}{5} \rho k \delta_{ij} \right], \quad (2.86)$$

де u_i , u_j і p - середньочасові значення.

Бурхлива в'язкість і турбулентність кінетичної енергії позначають μ_t і k , крім середнього часу рівняння імпульсу, середньочасова безперервність маси повинна бути включена

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (2.87)$$

Турбулентну в'язкість можна обчислити за допомогою дворівневої моделі турбулентності для кінетичної енергії (k) та швидкості її розсіювання (ε). Головне рівняння кінетичної енергії турбулентності та її розсіювання швидкості записуються для застосування до стандартної k - ε моделі та його низьких значень Рейнольдса [15]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) = G - p(\varepsilon + D); \quad (2.88)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \varepsilon) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = (C_1 f_1 G - C_2 f_2 \rho \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} + \rho E, \quad (2.89)$$

де

$$G = \left(\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left[\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \right)$$

- турбулентний термін генерації кінетичної енергії.

Таким чином, турбулентна в'язкість μ_t задається

$$\mu_t = c_\mu f_\mu \rho k / 2. \quad (2.90)$$

Стандартна модель k - ε з високим числом Рейнольдса визначена з ефективною в'язкістю $\mu_e = \mu_t$, $D = E = 0,0$, і $f_1 = f_2 = f_\mu = 1,0$. Причому високий Рейнольдс k - ε моделює логарифмічні функції стінок, які визначені біля стіни напруження зсуву, терміну генерації (G) та значення ε .

Однак низьке число Рейнольдса $k\text{-}\varepsilon$ [15] приймає розчин прямо у стінки труби. Загальні константи між ними версії $k\text{-}\varepsilon$ моделі наведені дослідженням у вигляді $c_\mu = 0,09$, $c_1 = 1,44$, $c_2 = 1,92$, $\sigma_k = 1,0$, а $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Більше того, низьке число Рейнольдса додаткові функції визначаються наступним чином [15]:

$$f_\mu = \exp \left[\frac{-3,4}{\left(1 + R_t/53\right)^2} \right]; \quad (2.91)$$

$$F1=0 \quad f_2 = 1 - 0,3 \exp[-R_t^2]; \quad (2.92)$$

$$D = 2(\mu/\rho) \left[\frac{\partial(k)^{0,86}}{\partial r} \right]^2; \quad (2.93)$$

$$E = 2(\mu/\rho)(\mu_T/\rho) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right]^2, \quad (2.94)$$

де турбулентне число Рейнольдса R_t визначається як [15]

$$R_T = \rho k^2 (\mu \varepsilon),$$

де r - радіальна відстань, м;

u - осьова швидкість, м/с.

Рівняння (2.83) і (2.84) наведені спеціально для турбулентного потоку в трубах У моделі з низьким числом Рейнольдса μ визначається як $\mu + \mu_t$ і межа стінки умова визначається як $\partial p' / \partial r = u = v = k = \varepsilon = 0,0$. Гранична умова в центральній лінії визначається як $\partial \phi / \partial r = v = 0$, де ϕ означає всі залежні змінні крім v . На ділянці виходу є осьові градієнти всіх залежних змінних дорівнює 0. На вхідному перерізі $u = u_0$ і $v = \partial p' / \partial x = 0$, де u_0 –рівномірна осьова швидкість на вході.

Оцінка точності результатів схеми NIMO досягається за допомогою експериментів [16] при $Re = 500\ 000$ і напівемпіричних відношень [17] для великої кількості експериментальних даних для повністю розвиненого турбулентного потоку теплоносія.

Теорему потужності задано

$$\frac{u}{u_{cl}} = \left(\frac{R-r}{R}\right)^{0,76} \text{ при } 0 < r < 0,95 R, \quad (2.95)$$

де u_{cl} - центральна осьова швидкість, м/с.

Чисельні прогнози для турбулентного потоку в трубах, використовуючи NIMO схему, показані на рисунках 2.30–2.34. Повітря на 1,0 бар і 300 К надходить в трубу при рівномірній осьовій швидкості 29 м/с. Діаметр труби - 24,7 см безрозмірна довжина (L / D) дорівнює 30. Для цього потоку число Рейнольдса дорівнює 500 000. Для турбулентних моделей з низьким і високим рівнем Рейнольдса, використовується (100×100) сітка. Сітка моделі високого числа Рейнольдса є рівномірною, хоча для моделі низького Рейнольдса перетворюється на трубопровід. Для обох моделей кількість ітерацій приблизно 1000, що дає помилки менше 0,1 відсотка.

Розвивається турбулентний потік у трубах зображено на рисунку 2.30 для осьової відстані (x / D), що дорівнюють 2 та 5. Безрозмірна осьова швидкість (u / u_m) результати основної сітки по суті не відрізняються від результатів x -сітки, як видно з рисунка 2.30. Пристінна область показана на рисунку 2.30b, ефект стіни, як прогнозували низьку і високу моделі числа Рейнольдса. Ефект стіни при низькому числі Рейнольдса поширюється в серцевину турбулентного потоку в трубах, тоді як високий Рейнольдс, числова модель має ефект стінки, обмежений $(r / R) > 0,95$ для $(x / D) < 5$. Більші числові результати, показані на рисунку 2.31 для (x / D) , рівного 10 і 20. Високий ефект Рейнольдса k - ϵ ефект стіни досі обмежений $(r / R) > 0,75$, в той час як низьке число Рейнольдса впливає на всі стіни над турбулентним потоком при

$(x / D) = 20$. Безрозмірна радіальна швидкість (v/u_m) профілі зображені на рисунку 2.32, при $(x / D) = 5$ і 20 та на виході.

Модель низького числа Рейнольдса передбачає більш високі абсолютні радіальні швидкості, в той час як обидві моделі передбачають зникаючу радіальну швидкість при повністю розвиненому потоці поблизу виходу $(x / D) = 30$. Повністю розвинена турбулентна середньо-осьова швидкість радіального профілю зображена на рисунку 2.33 для високого та низького числа Рейнольдса. На цій же цифрі вимірюється повністю розвинений безрозмірний осьова швидкість [16] та подібний профіль.

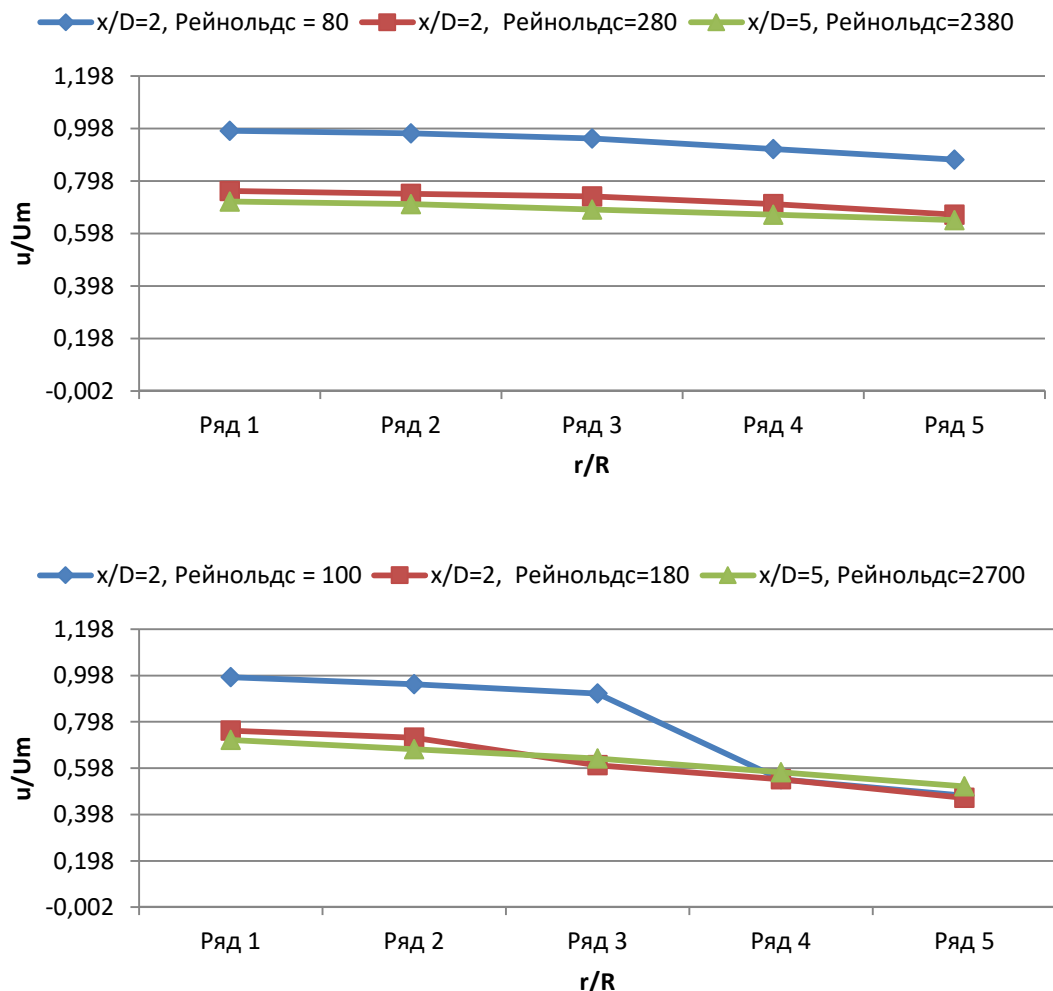


Рисунок 2.34 – Осьова швидкість (u / u_m) в різних осьових місцях для турбулентного потоку в трубах з $Re = 500\,000$, (a) r / R від 0 до 1. (b) r / R від 0,75 до 1

Схема NIMO прогнозує відмінні узгодження з повністю розробленим осьовим профілем швидкості, заданим $1/72$ потужністю, при низьких числах Рейнольдса $k-\epsilon$. Однак, теперішні чисельні результати для u / u_{CL} добре описуються між експериментальними даними та $1/72$ закону потужності.

З іншого боку, модель високого Рейнольдса погано прогнозує повністю розвинений турбулентний потік.

Тиск, осьові розподіли, прогнозовані за допомогою низьких та високих чисел Рейнольдса $k-\epsilon$, показані на рисунку 2.34.

Осьова швидкість у різних осьових місцях для турбулентних витрат, профілі осьового тиску центральної лінії для турбулентного потоку, середня за часом осьова швидкість для турбулентних потоків з низьким і високим значенням Рейнольдса та програми радіальної швидкості у різних осьових місцях для турбулентних потоків при $Re = 500\,000$ показані на рисунках 2.35 – 2.38.

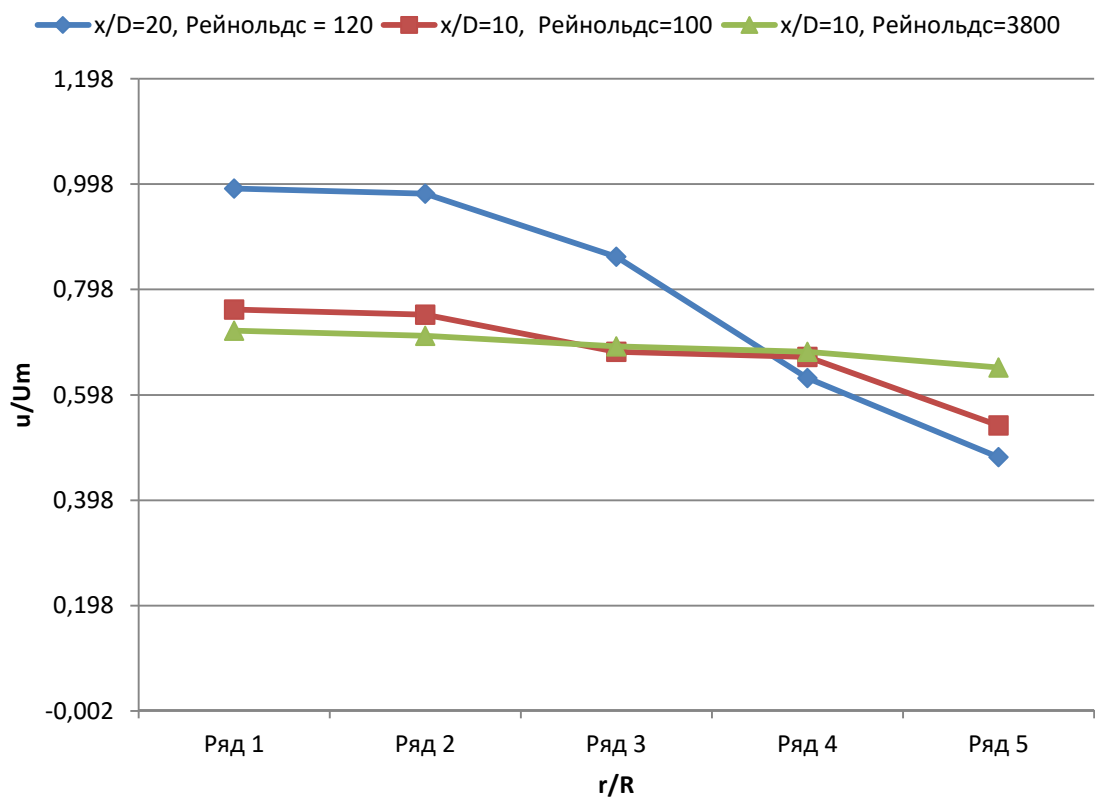


Рисунок 2.35 – Осьова швидкість у різних осьових місцях для турбулентних витрат, $Re = 500\,000$

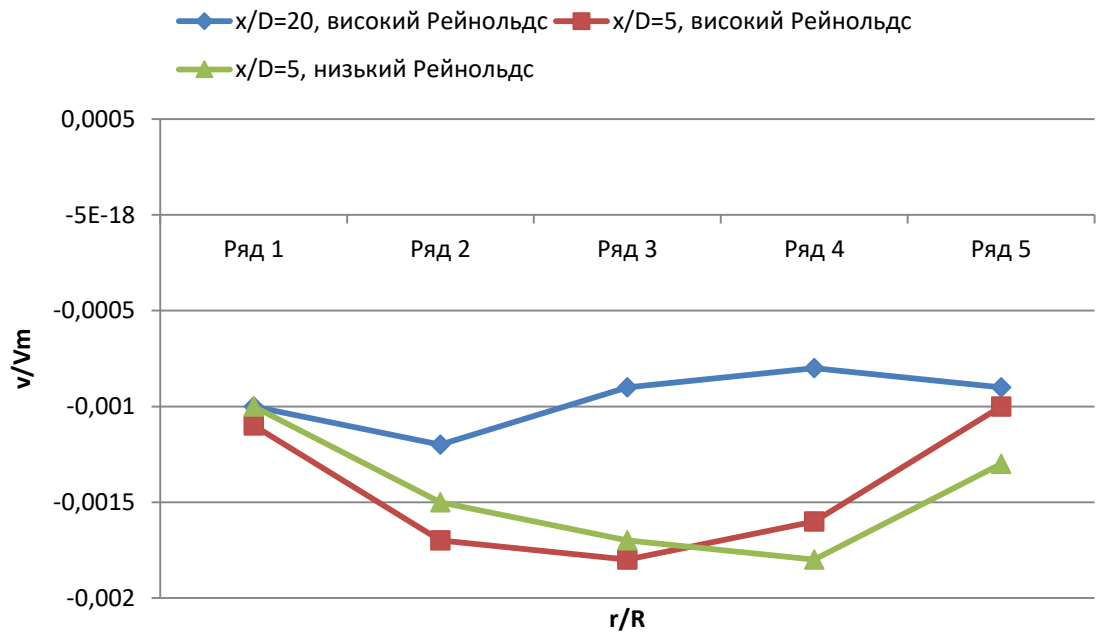


Рисунок 2.36 – Програми радіальної швидкості у різних осьових місцях для турбулентних потоків, $Re = 500\,000$

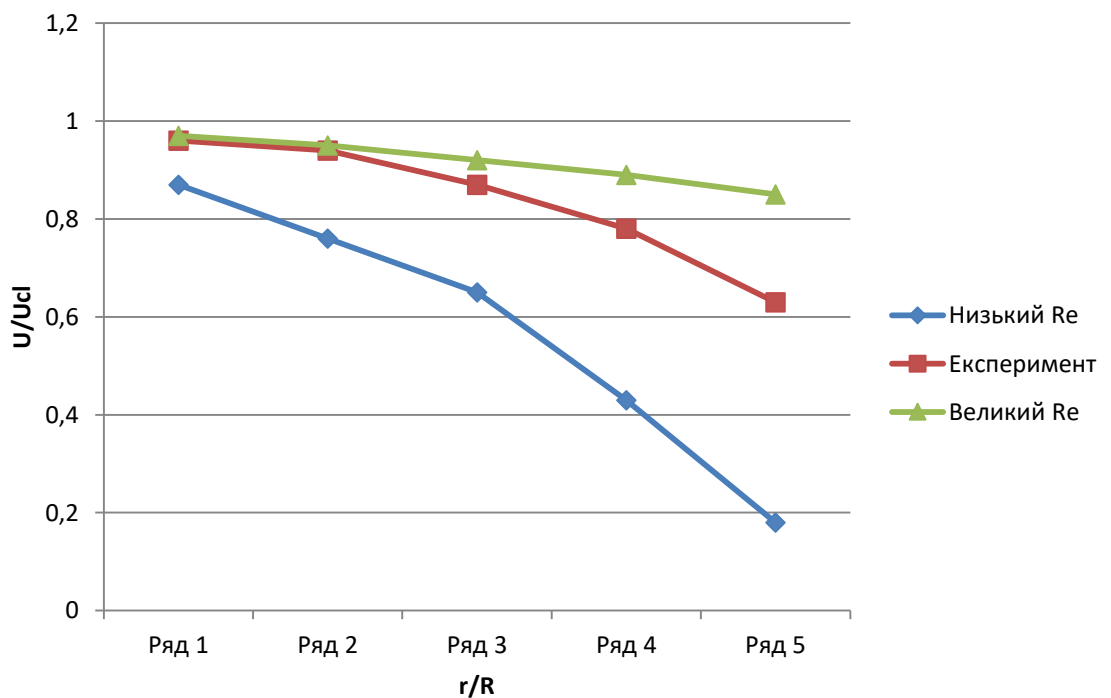


Рисунок 2.37 – Середня за часом осьова швидкість для турбулентних потоків з низьким і високим значенням Рейнольдса, $Re = 500\,000$

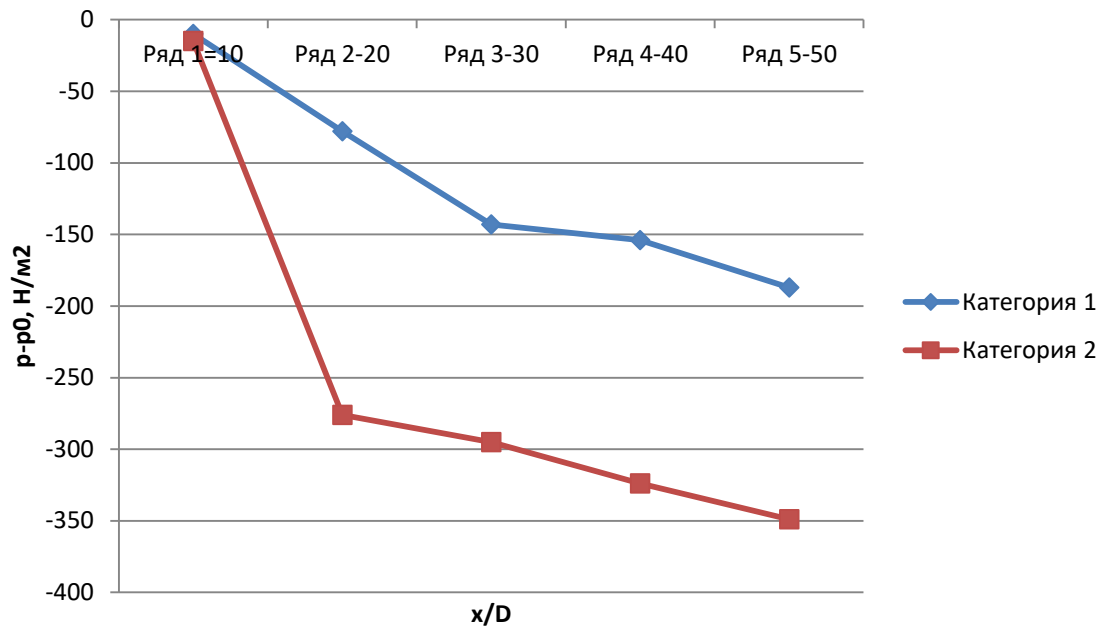


Рисунок 2.38 – Профілі осевого тиску центральної лінії для турбулентного потоку, $Re = 500\,000$

3 СТАБІЛІЗАЦІЯ ТА ПРИСКОРЕННЯ АЛГОРИТМУ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ДИНАМІКИ РІДИНИ

Прискорення конвергенції нелінійних рішучих потоків за допомогою представлених лабораторних та дослідних методів, які використовувати рекурсивні властивості методів обчислювальної динаміки рідини з фіксованою точкою. Нелінійні ітераційні алгоритми створити підпростір Крилова, який можна вважати лінійним у другому порядку точності поблизу локальних рішень. Повторне застосування ітерацій з фіксованою точкою породжують різні методи вектора екстраполяції які використовуються для прискорення основного ітераційного методу. Зокрема, придатність алгоритму скороченої екстраполяції для використання конвергенції досліджено для прискорення нелінійних рішучих потоків. В алгоритмі розчин отримують за допомогою лінійної комбінації векторів Крилова з зважуванням коефіцієнтів, отриманих мінімізацією норми похибки (0,05) в просторі з правильно обраними умовами обмеження. Цей процес ефективно визначає вектор процес екстраполяції послідовностей у підпросторі, що відповідає задачам програми *Gorizont 2020*, застосовуваний до нелінійних задач. Більше того, коли алгоритм використовується для вирішення нелінійних задач, витратовідвідник відіграє роль попереднього буфера для нелінійного методу.

Переваги від застосування. Алгоритм включає кращі показники конвергенції, усунення залишкової зупинки та вдосконалене сполучення між рівняннями в числових моделях. Запропонований алгоритм не залежить від типу розв'язання задач потоку і однаково застосовується до явних даних, та алгоритмів на основі неявних факторів- тиску та щільності. Алгоритм також може розглядатися як узагальнення алгоритмів без матриць, які широко використовуються при моделюванні.

Охарактеризована обчислювальна динаміка рідини (CFD) у сучасних інженерних програмах за допомогою складних фізичних моделей, складних форм обчислювальної області, і великих розмірів сітки. Керуючі рівняння

потоків рідини та пов'язані з ними рівняння для транспорту збережені змінні здаються простими, але вони містять дуже видатні нелінійності, найвідоміша з яких проявляється крізь явища турбулентності. Необхідність моделювання турбулентних потоків у поєднанні з випромінюванням, тепло- і масообміну та багатофазних взаємодій призводять до дуже складних фізичних моделей, що містять багато нелінійних термінів і широкий діапазон просторових і скроневих переваг. Ця складність безпосередньо пов'язана з числовими труднощами умов, і вони тут називаються обчислювальною жорсткістю.

В сучасних цілях поточних задач використовується жорсткість позначений обчислювальними труднощами). Пов'язане ще одне джерело жорсткості при моделюванні із застосуванням великих розмірів сітки з метою захоплення відповідних просторових масштабів пов'язані з фізичними моделями. Загальновідомий факт, що умова лінійної системи збільшується зі збільшенням розміру сітки, що перевіряється шляхом рівномірного уточнення обчислювальної сітки. Крім того, топологічні складності обчислювальних областей призводять практиків до використання неструктурованих сіток з майже довільною формою контрольних об'ємів. Головне питання неструктурованих сіток, таких як наявність сильно перекошених обсягів, високе співвідношення сторін, близьких до меж, втрати ортогональності та відсутності опуклості безпосередньо сприяють горизонту обчислювальної задачі. Зазвичай це виявляється у втраті діагонального домінування матриці в лінійній системі дискретних рівнянь. Ітеративні розв'язувачі для лінійних систем рівнянь не особливо ефективні, коли матриця лінійної системи сильно відхиляється від діагонального домінування, виражене через умову M -матриці.

Складність не обмежується лише фізичними моделями та пов'язаними з ними проблемами описано вище; моделювання потоку також характеризується великою кількістю різних алгоритми від явного до дробового кроку до неявних методів [1].

Крім того, залежно від вибору змінних рішення та обраного дискретного можна виділити склади, тиск [2–4] та розчинники на основі щільності [5,6].

Розчинники на основі тиску та щільності можуть бути сформульовані як неявні, явні або дробові поетапні методи. Складність морфології та геометрії каналу ще більше збільшується вибором лінійного розв'язувача, що використовується в неявних алгоритмах. Додатково різні флюсові склади використовуються, включаючи рішальник Рімана, розщеплення векторного потоку, центральна різниця з формулою флюсу дисипації [6], щоб назвати лише вагомі. Кожен із алгоритмів мають параметри керування, які мають оптимальні значення для даної програми області, таким чином виробляючи оптимальну швидкість конвергенції під час ітераційного процесу.

Прикладами параметрів управління є фактори на основі щільності та релаксації факторів алгоритмів на основі тиску.

Оптимальний діапазон параметрів управління визначається обмеженнями стійкості чисельного алгоритму, що лежить в основі фізики, обчислювальної сітки, геометричної складності обчислювальної області та граничних умов. Через нелінійний характер рівнянь, що описує явища потоку, вибір значень контрольних параметрів, що знаходяться за межами оптимального діапазону, призводить до повільного коефіцієнту конвергенції або розбіжності залишкової норми. Лінійний аналіз стійкості [5] наведено деякі вказівки щодо вибору оптимальних значень параметрів управління але в промисловому застосуванні проточних задач зумовлена складність проблеми для фізики, геометрії матриці, граничних умов тощо різко змінюється оптимальний діапазон параметрів управління. Крім того, нелінійний характер управління рівняння змінюють оптимальні значення параметрів управління під час ітерації. Під час початкових ітерацій, залежно від початкової здогадки, оптимальні значення сильно відрізняються від оптимальних значень параметрів управління на пізніх етапах в ітераційному процесі. Зазвичай спочатку консервативні значення параметрів управління використовується

для підтримання стабільності ітераційного процесу і в міру наближення ітерацій до рішення, можна використовувати більш впливові значення.

Необхідність динамічної зміни значень параметрів управління під час ітерацій розглядається в алгоритмах, які обчислюють оптимальні або майже оптимальні значення за допомогою використання знань про стан обчислених змінних та деяких критеріїв, що вимірює стійкість обчисленої задачі. Методи продовження [7] забезпечують можливе вирішення цієї проблеми. Демонструє ще один підхід до проблеми оптимального управління параметрів у використанні алгоритму зворотного відстеження або пошуку рядків спільно з методами Ньютона [8]. Як продовження, так і Ньютон з алгоритмами зворотного відстеження є ефективними інструментами для вирішення проблеми динамічно змінюваного управління параметрів, але вони вимагають алгоритмічних змін турбулентного потоку. Багато разів не представляється можливим впроваджувати нові алгоритми у великих кодах і незважаючи на нові алгоритми забезпечують додаткову стабільність і збільшують показники конвергенції, що не можуть бути своєчасно реалізованими. Менш нав'язливих способів поліпшення конвергенції необхідні швидкості та загальної стабільності рішучого потоку.

Ще одне джерело нестабільності та низьких коефіцієнтів конвергенції в потоках рідин до штучної сегрегації дискретних рівнянь у числовій моделі. Приклад алгоритмів, які використовують сегрегований підхід, - це найпростіше сімейство алгоритмів [2,4]. Інший приклад відокремлених алгоритмів знаходиться у відновленні турбулентності моделі [9] в алгоритмах на основі щільності, де вони відстають від кількісного потоку. У моделях турбулентності з багатьма рівняннями кожне рівняння транспортного турбулентного рівняння може розв'язуватися окремо, таким чином штучно розв'язуючи рівняння числової моделі. Розв'язання рівнянь у відокремлених потоках рішень має згубний вплив на коефіцієнти конвергенції. Рішення цієї проблеми зазвичай знаходиться у створенні сполучення виходів за рахунок збільшення складності пам'яті та коду.

Методи екстраполяції векторної послідовності [10] пропонують альтернативне рішення прискорення конвергенції і стабілізації проточних рішень. Ідея векторної послідовності екстраполяція заснована на узагальненні прискорення конвергенції скалярної послідовності методи, такі як екстраполяція Річардсона [10], до векторних послідовностей створення ітераційними процедурами розв'язувальних алгоритмів під час пошуку рішення заданої задачі потоку. Крім прискорюючих властивостей методи екстраполяції векторної послідовності, також виявляють властивості сполучення, оскільки для всіх полів обчислюється лише один набір коефіцієнтів екстраполяції. Це має позитивний вплив на коефіцієнти конвергенції, дуже подібні до дії підпростору розв'язувача, що діють на системи з блоковими коефіцієнтами, видно на рисунку 3.1. Більше того, формальна еквівалентність між методами екстраполяції векторної послідовності до таких вирішувачів підпростору як існує Gorizont та UNDP [11].

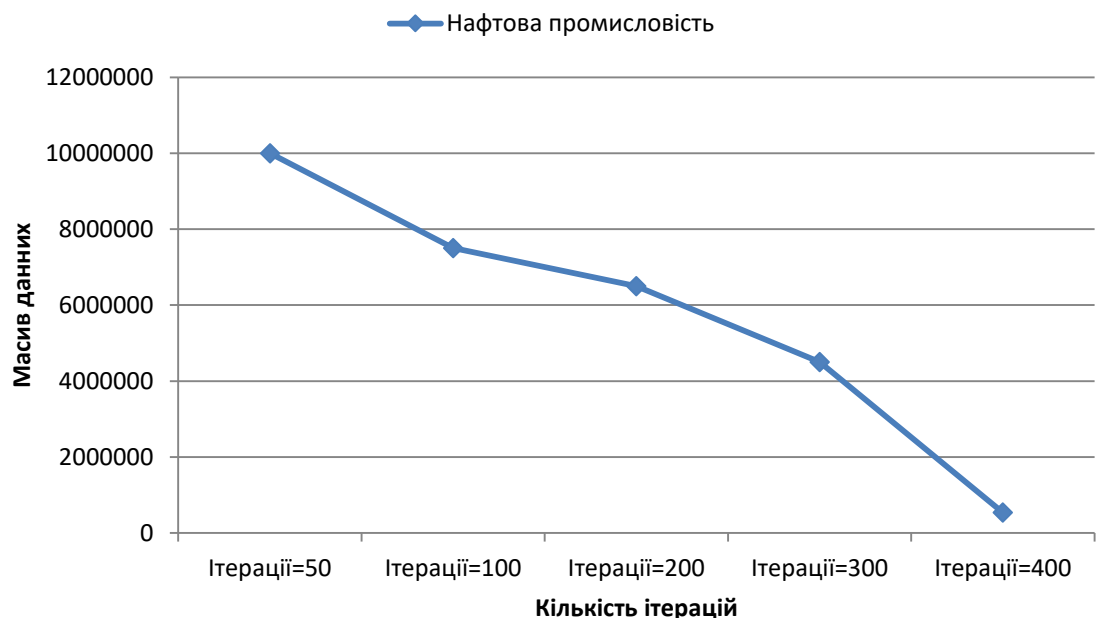


Рисунок 3.1 – Дослідження ламінарного потоку нафтових сумішей

Ранні приклади застосування [13] методів векторної послідовності при моделюванні було застосування скороченої екстраполяції, екстраполяція

мінімального многочлену та модифікована мінімальна поліноміальна екстраполяція до явних рішень потоку на основі схеми та неявного турбулентного потоку з вектором розщеплення рецептури. Прискорення швидкості конвергенції невидимого потоку були досліджені [13] та визначені граничні покращення з явним вираженням рішення, тоді як неявні варіанти показали кращі результати (рисунок 3.2). Ще одна заявка [14] методики, пов'язаної з екстраполяцією, на декілька типів потоку продемонстровано придатність екстраполяції для прискорення невидимого стисливого та в'язкого ламінарного не стисливого потоків. Метод [14], використовуваний у дослідженнях, спирався на залишкову мінімізацію і вимагало багатьох оцінок залишків, що робить цей метод дорогим. Інші застосування екстраполяції векторної послідовності до нелінійних задач включають N -рівняння Чандрасехара [15]. Екстраполяція векторної послідовності також використовується для прискорення стаціонарних ітераційних методів [16] та методу алгебраїчної багаторешітки [17].

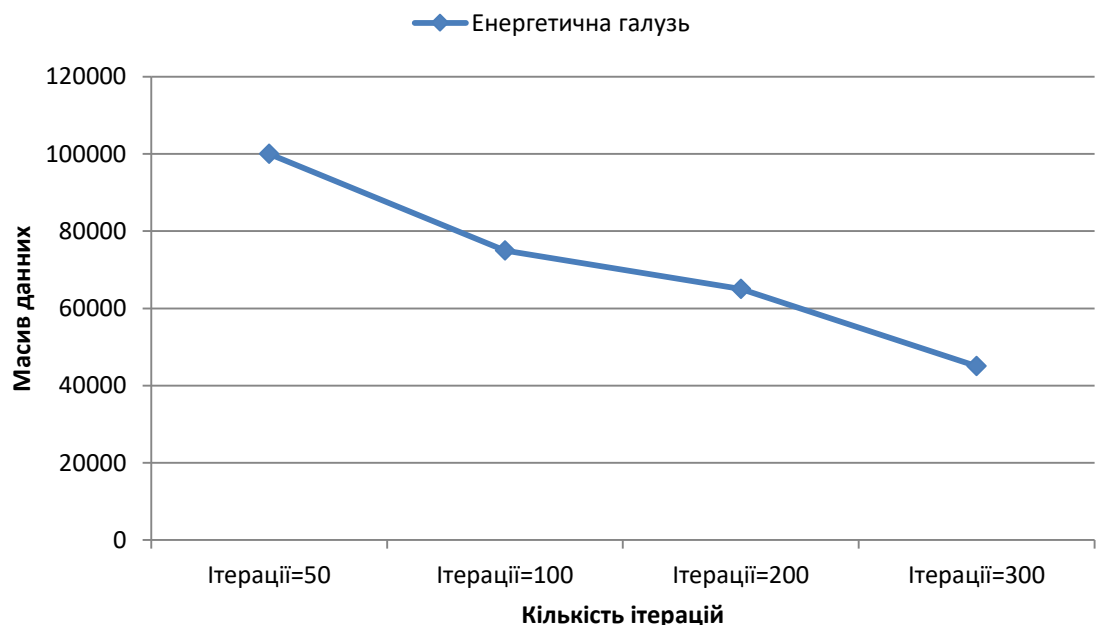


Рисунок 3.2 – Дослідження турбулентного потоку енергоносія

Традиційний погляд методів екстраполяції, застосованих до векторних послідовностей, полягає в тому, що вони виконують перетворення однієї послідовності в іншу послідовність в результаті з більш швидкими темпами конвергенції. Оскільки потоковий варіант буде генерувати вектор послідовності, які будуть використані для обчислення коефіцієнтів екстраполяції.

Думка цього процесу полягає в тому, що проточний теплоносій грає роль нелінійного попереднього буферу для екстраполяції. Завдяки еквівалентності алгоритмів, запропонована методика прискорення відповідає нелінійно обумовленому варіанту UNDP.

Сфери народного господарства, відкриті для дослідження показані в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Сфери народного господарства та економічна доцільність застосування прикладних досліджень

Сфера застосування	Режим течії	Абсолютна похибка	Пріоритет
Енергетична	Турбулентний	0,3%	1
Нафтохімічна	Ламінарний	1%	1
Водопостачання	Ламінарний	3%	1
Аерокосмічна	Турбулентний	0,05%	1
Машинобудування	Турбулентний	1	1
Металургійна	Турбулентний	2	1
Сільськогосподарський	Ламінарний	3	1
Комунальне господарство	Турбулентні	3	1
Наукові центри	Обидва	1	1
Будівельна	Обидва	1	1

Алгоритми моделювання були досліджені з точки зору алгоритму з фіксованою точкою та рекурсивної властивості цих алгоритмів. Рекурсивна

властивість алгоритмів з фіксованою точкою представляє другий порядок наближення, ітерація потужності з матрицею якобіанської фіксованої точки. Властивість відіграє важливу роль у виведенні векторної послідовності алгоритму екстраполяції. Далі йде опис векторної послідовності екстраполяційним методом, де була рекурсивна властивість функції з фіксованою точкою використана для отримання коефіцієнтів екстраполяції. Це робиться за допомогою формулювання проблеми оптимізації в підпросторі та правильним вибором обмежень до алгоритму. При дослідженні числових експериментів додаток нелінійного прискорення демонструється на різних задачах з використанням декількох проточні рішень.

4 ДИСТАНЦІЙНЕ ВИХРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКУ ТА ТЕПЛООБМІН В РЕБРИСТИХ КАНАЛАХ

4.1 Умови проектування обмежень

Для моделювання в газовій турбіні підвищення температури на вході в турбіну, зберігають прийнятну температуру матеріалу, всі методи охолодження є важливими. Для внутрішнього охолодження лопатей зазвичай призначають ребристі канали.

Наявність ребер, які також називають шорсткістю або турбуляторами, посилює коефіцієнти теплопередачі шляхом перепланування прикордонного шару після повторного приєднання потоку між ребрами та через індуковані вторинні потоки. Макети ребер і конфігурації можуть бути різними і включати 90-градусні, 60-градусні і 45-градусні паралельні ребра та V-подібні ребра 45-градусні та 60-градусні.

Важливо вміти точно передбачити посилення передачі тепла породжені елементами шорсткості для забезпечення хороших проектних рішень. Відповідно, теплопередача і потік рідини в ребристих каналах були детально вивчені і те, і інше експериментально та чисельно. Протиріччя може бути пов'язане з відмінності в експериментальних умовах, які потребують подальшого з'ясування.

В попередньому дослідженні [1] методом кінцевих елементів було встановлено, нагрівання бічних стінок, основною причиною невідповідності. Однак метод відфільтрував занадто багато факторів, так що пояснення причини стало важким. Крім того, невизначеності моделей можуть стати великими для складних геометрій потоку.

Тому більш універсальним методом моделювання є велике вихрове моделювання (ВВМ) для подальшого підтвердження та пояснення результатів кінцевих елементів.

ВВМ - обчислювальний метод, в якому обчислюються великі габарити і моделюються найменші вихрові гамаи (ВГ). Основна передумова є що на

найбільші вихри безпосередньо впливають граничні умови, несучі більшість анізотропних напруг Рейнольдса, їх необхідно обчислити. Дрібномасштабна турбулентність слабша, менше сприяє бурхливим стресам Рейнольдса, майже ізотропний і має майже універсальні характеристики. Тому він більш схильний моделювати.

При ВВМ рівняння руху потоку відфільтровані від тривимірного, нестабільного, Нав'є-Стокса рівняння за допомогою функції фільтра в просторі

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j u_i)}{\partial x_j} = -\left(\frac{\partial p}{\partial x_i} - \beta\right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \overline{\rho \tau_{ij}} \right]; \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{\Phi})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} u_j \bar{\Phi})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\bar{\mu}}{\bar{\rho} r} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial x_i} + \overline{\rho \varphi_i} \right] - \delta_{ij} \overline{\rho u_i \gamma}, \quad (4.3)$$

де $\tau_{ij} = u_i u_j - \overline{u_i u_j}$ - напруги підрешітки (НПР) через які малі ваги впливають на великі (розв'язані) шкали;

відповідно $\phi_j = \varphi_j - \overline{\varphi_j}$ називаються тепловими потоками НПР. Вони невідомі і повинні бути змодельовані у якості моделі ВВМ.

Неявна модель, запропонована автором та ін. [6], є найпростішою моделлю НПР без введення ні режиму фільтрації, ні тензора напруги ВВМ, ґрунтуючись на спостереженні, що помилки усікання в таких розсудах Нав'є-Стокса вводять числове розсіювання з неявними ефектами дискретизації якісно схожа на ефекти явних моделей ВВМ. Однак за наявності невидимої нестабільності турбулентність стає набагато сильніше, так як зона розділення розташовано вниз за течією ребра.

Отже, чисельної дифузії недостатньо для розсіювання турбулентної енергії, особливо для тонкої сітки.

Певна додаткова в'язкість необхідна для запобігання накопичення турбулентності енергії в областях високої частоти. Вперше [7] постульовано чітку модель для підкреслень ВВМ. Модель передбачає, що підкреслюються градієнтно-дифузійний процес, подібний молекулярному руху.

Отже, тіє є

$$\tau_{ij} = 2\nu_t S_{ij}, \quad (4.4)$$

де $S_{ij} = \frac{1}{3} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ називається "розв'язаною швидкістю деформації",

а в'язкість вихру задана

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad (4.5)$$

де Δ та C_s - ширина фільтра (міжряддя) та константа.

Відповідно, що має бути визначено перед моделюванням, що залежить від потоку до потоку. Константа в цьому моделюванні задається як $C_s = 0,1$.

4.2 Числовий метод

Розрахунки проводяться у внутрішньопаралельному багатообліковому комп'ютері ВВМ [8, 9], заснований на методиці кінцевих квадратів. У кодї використовується система, розміщена тілом, обладнана тілом, та використовує покращену інтерполяцію.

Алгоритм Сімплекс з'єднує тиск і швидкість. На основі алгоритму на SIP (сильно неявна процедура) використовується для розв'язання алгебраїчних рівнянь.

Як умови дифузії, так і конвекції дискретизовані центральним центром другого порядку різниця.

4.3 Результати та обговорення. Повністю розвинений потік труби

Для ілюстрації чисельної точності цього методу повністю розвинений потік труби обчислюється з ВВМ, для $Re_{\tau} = 460$. Неявна модель використовується для моделювання НПР напруги, а для умов конвекції використовується центральна схема. Метеликовий тип генерується багатоблокова сітка, і орієнтовна кількість точок сітки є навколо одного мільйону.

Хоча потоки, такі як турбулентний потік труб, геометрично прості, їх точне моделювання за допомогою таких методів, як ВВМ, в чомусь складніше ніж потік в складній геометрії. Це тому, що ніякої невидимої нестабільності немає, його точне моделювання є свідченням надійності методу. На рисунку 4.1а показаний спектр при $y^+ = 230$ (тобто точка в центральній лінії труби), і чітко проілюстровано відсічення енергії високої частоти турбулентності.

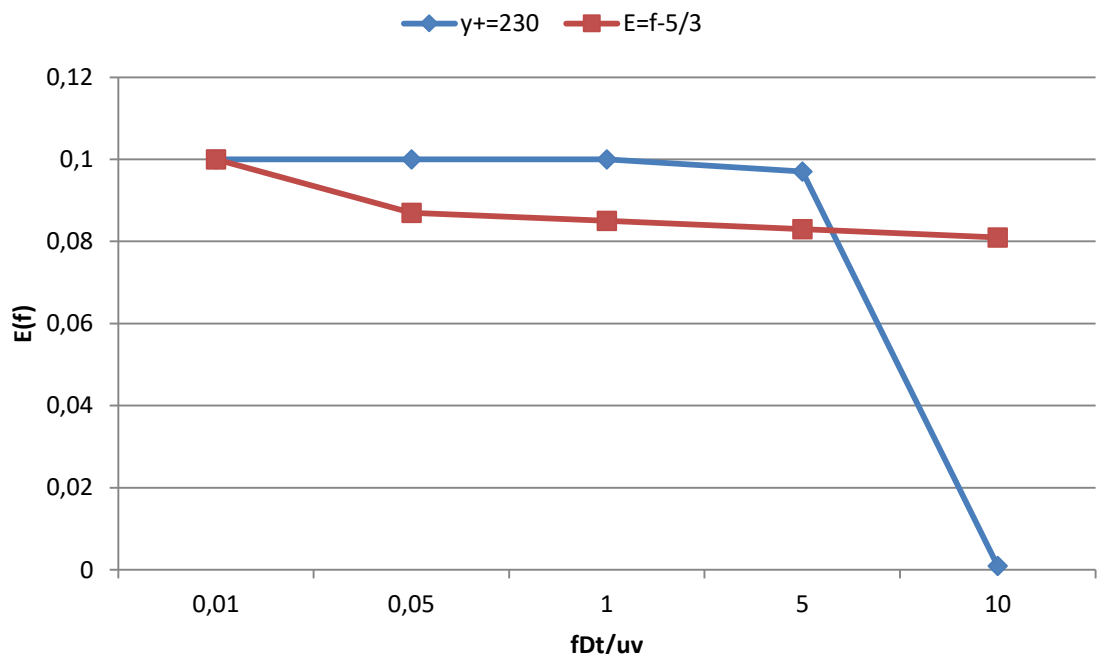


Рисунок 4.1а – Спектр турбулентної енергії при трубному потоку $Re_{\tau} = 460$

На рисунку 4.1b показана середня швидкість основного потоку і турбулентний Рейнольдс підкреслює ВВМ. Вони дуже добре узгоджуються. У області, близькій до стіни, коливання в основному напрямку набагато більший, ніж у двох інших напрямках.

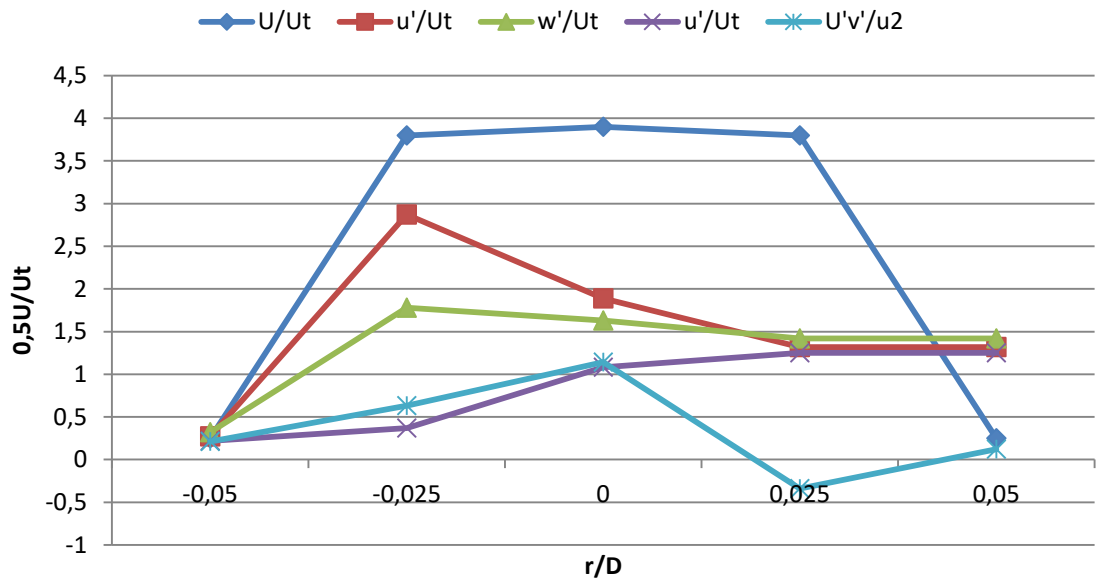


Рисунок 4.1б – Статистичні значення при трубному потоку $Re_t = 460$

З будь-якої моделі МНТР (модель напруженої турбулентності Рейнольдса), можна побачити, що виробництво коливань двох поперечних напрямків дорівнює нулю. Коливання з цих двох напрямків отримують енергію турбулентності від деформації тиску.

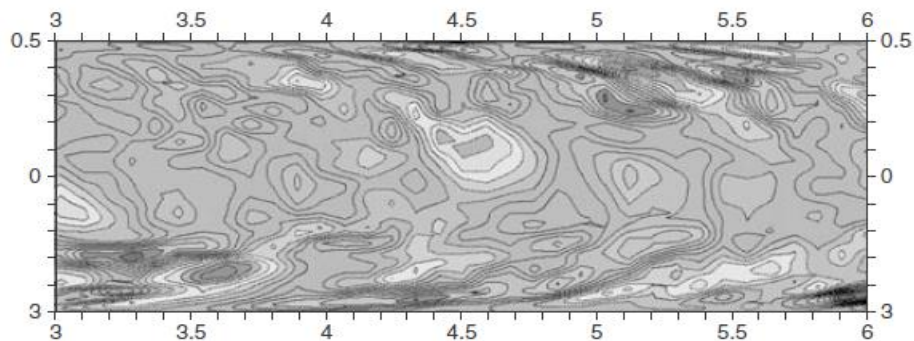


Рисунок 4.1в – (e) контури миттєвої позапланової швидкості в центральній площині при трубному потоку $Re_t = 460$

Умови деформації тиску перерозподіляють енергію з напрямків високих коливань до малих флуктуаційних напрямків, щоб зменшити різницю. Тому коливання основного напрямку значно більше, ніж у двох інших напрямках.

На рисунку 4.1в показані миттєві коливання швидкості в основній течії переріз труби. Можна чітко спостерігати події викидання з стіни в бік центру труби, і низько швидкісні смуги формуватимуть нижче цих викидів.

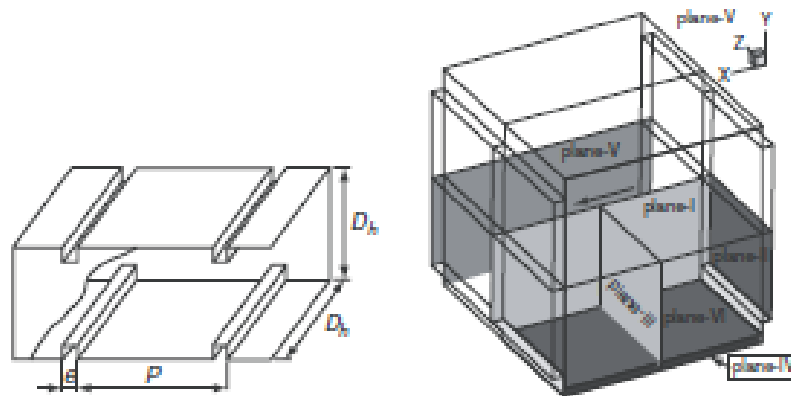


Рисунок 4.2 – Геометрія обчислень

4.4. Реєстрація параметрів енергоспоживання і зниження витрат

4.4.1 Реєстрація параметрів енергоспоживання

Постійний контроль потоків енергії є основою для системи управління процесом використання електроенергії.

Переваги реєстрації даних енергоспоживання на механізмах і установках:

- зниження витрат на електроенергію завдяки використанню можливостей економії;
- оптимізація завантаження устаткування за рахунок інтелектуального перемикавання елементів установки, скорочення вищих гармонік і рівномірного розподілу навантаження на мережу;

- оптимізація пікових навантажень завдяки раціональному розрахунку тенденцій і управління навантаженням;
- мінімізація періодів простою обладнання шляхом постійного контролю параметрів;
- функції віддаленого управління і збору даних в одному пристрої.

Автономний реєстратор даних.

Реєстратор даних є ідеальним рішенням для віддаленого управління і обслуговування децентралізованих систем автоматизації завдяки технології енергозбереження. Велика кількість інтерфейсів і підтримуваних протоколів робить збір даних як ніколи простим - без підключення струму, вбудований модем SMS / GSM / GPRS з антеною. Реєстратор даних, шлюз і управління сигналами тривоги в одному пристрої. Заощаджує енергію, інтелектуальне використання батарей. Протоколи: MEK 60870-5-101/104, Modbus. Практикують 4 інтерфейси, включаючи Ethernet. ПО для вимірювання енергії та продуктивності – EMLOG.

ПО для реєстрації даних EMLOG від Phoenix Contact разом з модульним контролером класу 100 є ефективним рішенням для реєстрації енергетичних даних, пов'язаних з теплом, холодом, повітрям або електрикою.

Налаштування всіх конфігураційних даних і введення в експлуатацію за допомогою вбудованого веб-додатку. Передача даних системі управління за допомогою сервера SQL, OPC, Modbus / TCP і в форматі CSV. Максимум 24 імпульсних і 8 аналогових входів. Приєднання до 10 пристроїв для вимірювання енергії EMpro і до 10 клем для вимірювання потужності.

Вимірювальний прилад - EEM-MA370 – 2907983.

Багатофункціональний енерговимірювальний пристрій з вбудованим інтерфейсом Modbus / TCP для вимірювання електричних параметрів низьковольтних систем до 690 В. Хмарна обробка промислових даних забезпечує інтелектуальне мережеве об'єднання бізнес-процесів, речей, установок, компонентів і людей. Phoenix Contact пропонує цілісне професійне хмарне рішення Proficloud з урахуванням індивідуальних вимог для цілей

автоматизації - від хмарних пристроїв і підходящої платформи до хмарних служб.

Переваги:

- максимальна готовність за рахунок можливості доступу до даних з будь-якої точки світу і в будь-який час;
- відкритість завдяки можливості розробки і використання власних хмарних служб в Proficloud;
- впевненість у завтрашньому дні завдяки постійній автоматичній підтримці інфраструктури, платформи і ПО на актуальному рівні.
- масштабованість завдяки динамічним ІТ-послуг, обсяг яких можна оперативно адаптувати під індивідуальні потреби;
- безпечна і сертифікована передача даних завдяки шифруванню TLS;
- простий спосіб створення хмарних служб Proficloud - набір розробника ПЗ, який дозволяє вільно програмувати індивідуальні хмарні служби.

Proficloud являє собою відкриту систему IoT, за допомогою якої можна знаходити відповідне рішення для будь-якої програми. При цьому це може бути хмарна обробка або аналіз даних, а також комплексна автоматизована концепція.

При необхідності створення програми за допомогою набору розробника ПЗ, для програмування індивідуальних хмарних служб розробляються так звані контейнерні додатки. Контейнери можна реалізувати і використовувати в Proficloud будь-яку кількість разів.

Таким чином можна створювати власні служби, наприклад, сигналізації, моніторингу та обстеження і використовувати контейнери в Proficloud або у власній локальній ІТ-інфраструктурі.

Сигналізація на базі світлодіодної технології.

В основі систем сигналізації Phoenix Contact лежить інноваційна світлодіодна технологія. Завдяки цьому у вашому розпорядженні різні інноваційні пристрої для освітлення і сигналізації.

Безпечне промислове дистанційне обслуговування. Високошвидкісна зв'язок за допомогою маршрутизаторів мобільного зв'язку mGuard.

Продукція mGuard - це індивідуально розроблені компоненти безпеки для системи дистанційного обслуговування. Міцні промислові пристрої безпеки включають в себе функції брандмауера, маршрутизатора і VPN для захисту від шкідливих кібератак і небажаних перешкод. Опціонально можна придбати пристрої mGuard з вбудованим інтерфейсом мобільного зв'язку, які забезпечують зв'язок по мобільних мереж 4G (LTE). Нове покоління захисних маршрутизаторів підтримує тепер також високошвидкісні з'єднання для передачі даних за допомогою мобільних мереж 4G (LTE) в США.

Таким чином асортимент продукції mGuard складається з моделей для європейських мереж 4G, моделей для AT & T (США), моделей для Verizon Wireless (США) і моделей без інтерфейсу мобільного зв'язку.

Дистанційне обслуговування на базі IP реалізовано через Інтернет. Безпечне дистанційне обслуговування через Інтернет і по мобільному зв'язку. Інтернет використовується в якості глобального середовища для дистанційного керування і обслуговування в області машинобудування. Технології брандмауера і VPN сприяють безпеці використання Інтернету для систем дистанційного обслуговування на основі IP. Таким чином сервісні інженери можуть отримувати доступ до виробничих систем по всьому світу простим, недорогим і, перш за все, безпечним способом.

Управління двигуном - EMM 3 24DC / 500AC-IFS – 2297497.

Електронний блок керування двигуном, для роботи з зовнішнім трансформатором струму - вимір активної потужності для контролю зниженого і підвищеного навантаження електродвигуна і установки, що забезпечує оптимальний захист для всіх класів потужності. Налаштовуються порогові значення для комутації та сигналізації.

Можливість з'єднання з системою INTERFACE і PROFIBUS-GATEWAY-IFS за допомогою з'єднувачів TBUS. Можливість вільного параметрування порогів сигналізації і перемикання. Цифрові виходи керують зовнішніми комутаційними елементами.

4.4.2 Поперечний ребристий канал

Обчислювальна геометрія схематично показана на рисунку 4.2а, а обчислювальна блок-топология проілюстрована на рисунку 4.2б. Квадратний канал з гідравлічним діаметром D_h укрупнюється періодично встановленими ребрами розміром e , $e / D_h = 0,1$ і крок - $10e$. Кут нахилу V-форми може бути 90-градусний, 60-градусний або 45-градусний. При 90-градусному рівні переважають поперечні ребра. Модельоване число Рейнольдса є невеликим, близько 4000, турбулентним потоком забезпечений. Вибір низького Re в основному тому що можна використовувати порівняно невелике число клітин та основні особливості турбулентності поля не відрізняються від високих Re випадків. Крім того, суперечність в експериментах не є Re -залежним.

На рисунку 4.2а показані середні потоки в площині симетрії. Потоківі лінії характеризуються чотирма зонами рециркуляції.

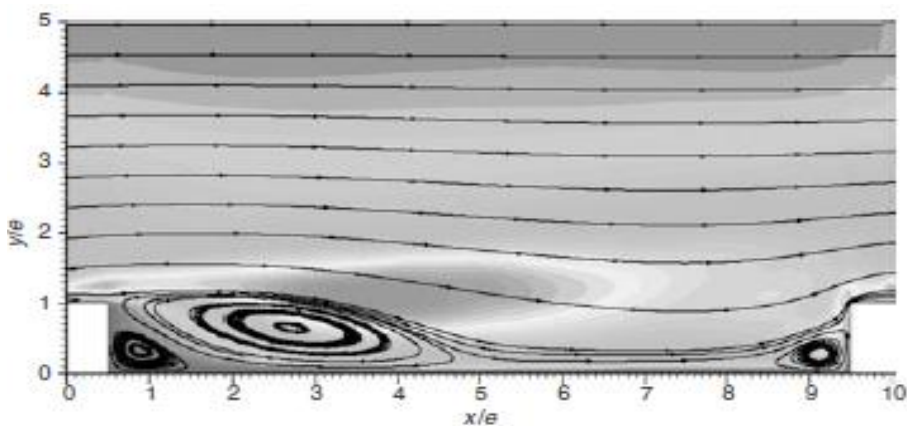


Рисунок 4.2а – Потоки та контури турбулентних напруг Рейнольдса в площині симетрії

Приєднання раптового розширення за течією ребра призводить до покоління широкого рециркуляційного вихору, пов'язаного з сильним зсувним шаром. Разом з цим, основна рециркуляція також визначається друга менша поділ, розташована в куті між нижньою стороною ребра і нижньою стінкою. Після приєднання, росте новий прикордонний шар; потік прискорюється головним потоком, поки він не натикається на наступне ребро. Нарешті, ідентифікується четвертий вихор на верхівка ребра. На рисунку 4.2b показані контури потокової інтенсивності турбулентності u/U_b .

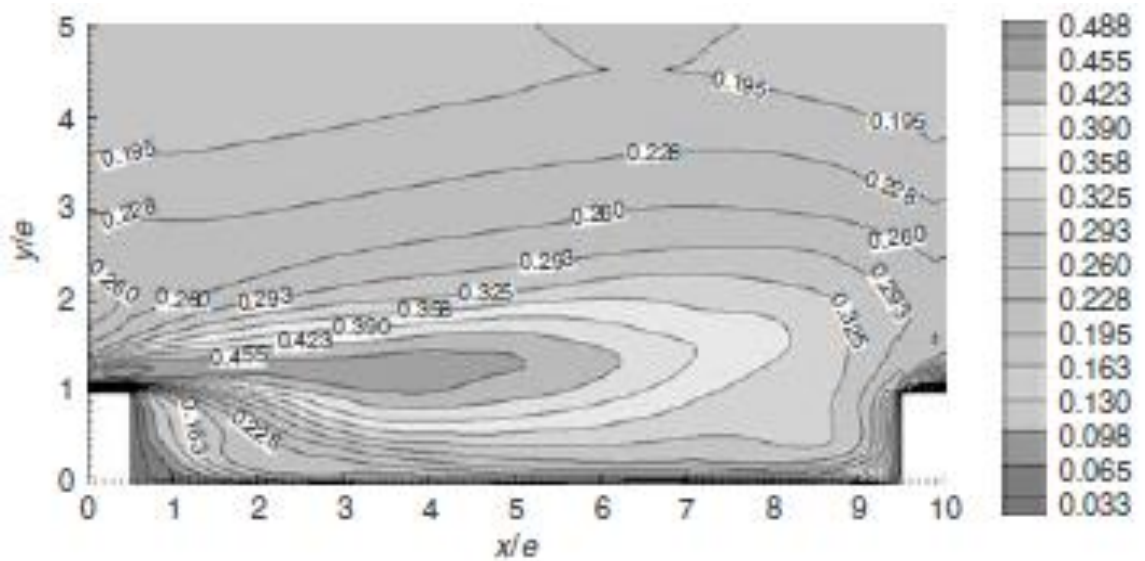


Рисунок 4.2б – Контури потокової інтенсивності

Пік значення u/U_b розташовані у верхній частині ребра. Це пов'язано з прискоренням і сильним зрізом у верхній частині ребра. Деякі локальні максимуми u/U_b значення знаходяться у верхній частині основна зона розділення за ребром вгору. Вони пов'язані з шаром зсуву що походить від краю ребра і розташовується над областю розділення. Контури з високим u/U_b ближче до ребристої стінки.

На рисунку 4.2с показані коливання швидкостей у напрямку y .

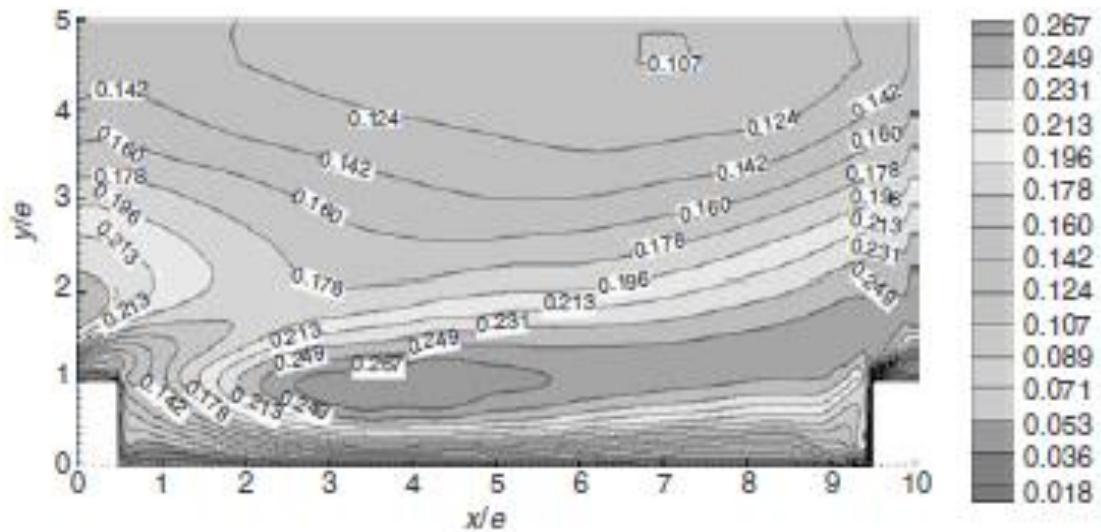


Рисунок 4.2с – Контури потокової інтенсивності

Високі v/U_b значення знайдено вище основної зони поділу всередині порожнини між двома послідовними ребрами. Значення v/U_b невелико біля нижньої стінки в порожнині, що свідчить про слабку вертикальну турбулентність руху.

На рисунку 4.2d видно, що інтенсивність турбулентності в діапазоні, w/U_b , посилено на ребра.

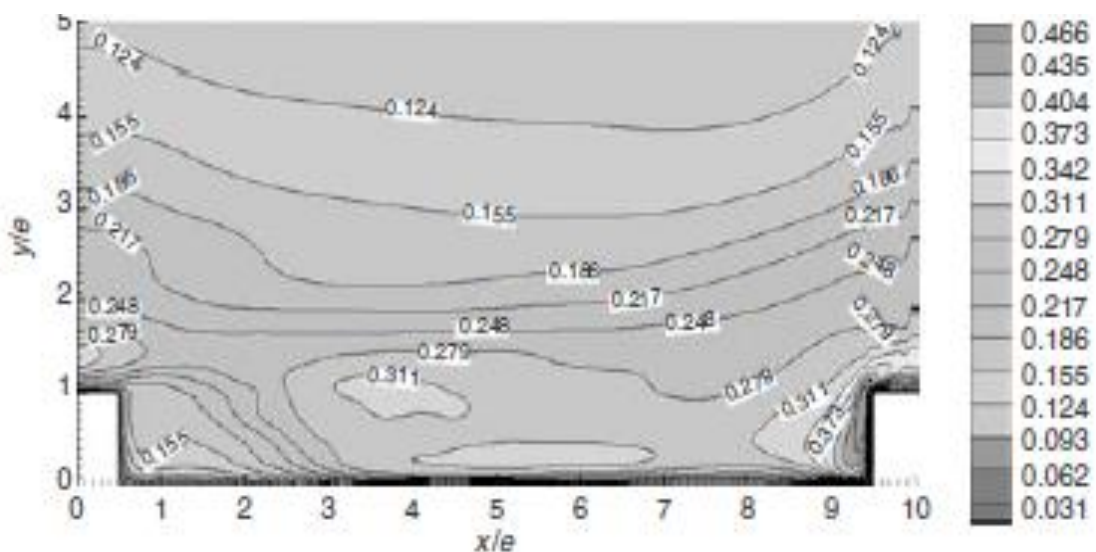


Рисунок 4.2d – Інтенсивність турбулентності

Пікове значення лежить у нижньому куті перед ребром, де потік блокується ребром. Місцевий максимум є також у головному відділенні зона позаду верхнього ребра w/U_b максимум схожий на u/U_b пік. Високий w'/U_b знаходиться вище за течією ребра, біля точки підключення в точці порожнини і близько до переднього краю ребра.

Взагалі дуже сильна анізотропія спостерігається при розподілі напруги Рейнольдса в трьох напрямках. Це робить його дуже важко передбачаємим, використовуючи лінійні моделі в'язкості.

4.5 Дослідження V-подібного ребристого каналу

Розчинник також використовувався для імітації потоку каналів, посиленого 60-градусним нахилом V-образних ребер. Коефіцієнти тепловіддачі обчислюються локально, і порівняно із середнім значенням. Відображаються контурами, що пояснює розбіжність між різними експериментальними результатами. На рисунку 4.3 показано відхилення локального Nu від середнього Nu .

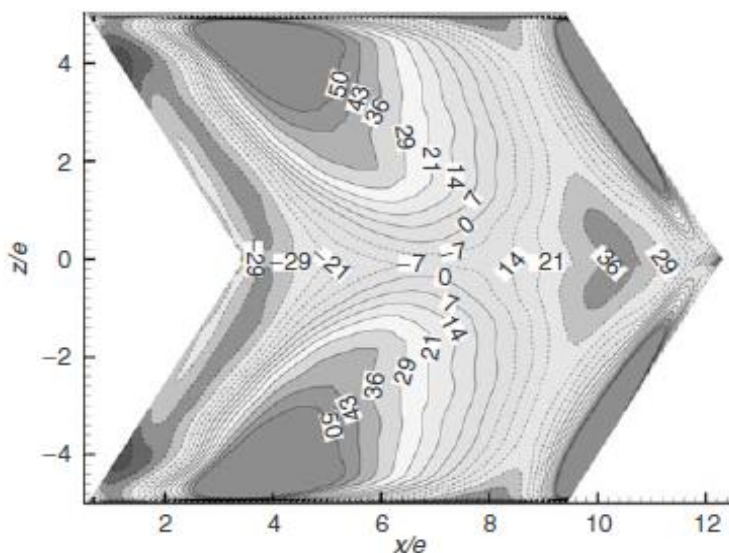


Рисунок 4.3 – Відхилення (%) від середнього критерію Нусельта (Nu) при прямоточній подачі теплоносія

Причина для експериментального протиріччя можна пояснити з цієї картини. Якщо ми використовуємо один термопара (ТС) для вимірювання температури, що представляє поверхню; в ідеалі, нам слід поставити ТС у місцях, де знаходиться усереднене значення, тобто 0% - відхилення контурних ліній. Для нижнього течії, що вказує на V-подібні ребра, якщо один ставить ТС в центрі поверхні, вийде досить точне середнє значення (рисунок 4.3), оскільки значення в центрі поверхні дуже близьке (навколо -5% недооцінка) до середнього значення.

Для вгору вказівний V-подібний образ ребер, однак, якщо поставити ТС у центр поверхні, вийде а над прогнозованим усередненим значенням, тому що значення в центрі поверхня далека (приблизно на 30% від прогнозування) від усередненого значення.

За рідкокристалічним методом (LC) визначають номери точок відбору для коефіцієнтів тепловіддачі для правильного представлення анізотропної поведінки теплопередачі. Нижня течія вказує V-подібну форму ребра забезпечують кращу ефективність передачі тепла.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1 Загальні положення

Органічною складовою частиною навчаного процесу та роботи у навчальній лабораторії при розробці стендів є охорона праці. Вона зобов'язана забезпечити найбільш сприятливі умови навчання, а також захистити здоров'я студентів та викладачів від виробничих шкідливостей.

Охорона праці - це комплекс правових, організаційно-виховних, протипожежних заходів і технічних засобів, що забезпечують створення здорових і безпечних умов праці.

У сучасних умовах виробництва продукції постійно зростає роль охорони праці, так як впровадження нової техніки та високоефективних хімікатів вимагає особливої уважності і дотримання запобіжних заходів для працівників. Тому в нашій країні з кожним роком вдосконалюється система санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на підвищення рівня охорони праці. В Україні з 1998 року введено в дію нове «положення про розслідування та облік нещасних випадків на виробництві».

Широке застосування електроенергії викликає необхідність обов'язкового ознайомлення працівників з питаннями електробезпеки. Хімізація рядів процесів викликає необхідність ретельного навчання прийомам безпеки роботи з хімікатами так як невміле використання їх, може призвести не тільки до отруєння, а й до вибуху і пожежі. Таким чином для запобігання травматизму та захворюваності на підприємствах, необхідні різносторонні знання з охорони праці. Такі як: вміння виявляти і усувати потенційні небезпеки і шкідливості, враховуючи вплив мінливих зовнішніх умов на безпеку праці, методами надання першої до лікарського втручання методами гасіння пожежі.

У Інженерному інституті ЗДУ розроблено цілий ряд заходів щодо поліпшення техніки безпеки і виробничої санітарії, які включають і згоду між дирекцією господарства та профспілковими колективами.

Інженером з техніки безпеки здійснюється контроль за дотриманням правил з техніки безпеки, а безпосередньо по галузях, головними фахівцями. Перераховані особи, згідно з положенням, проводять розробку заходів по техніці безпеки по кожній галузі і по підрозділах. На засіданнях профкому та адміністрації, проводять аналіз причин травматизму, розробляють пропозиції щодо їх попередження. Створено комісію з розробки та впровадження галузевих стандартів безпеки.

Законодавством передбачено проведення інструктажів, які за характером і часу проведення ділять на кілька видів.

Вступний інструктаж проводить головний спеціаліст тієї галузі господарства, куди надходять нові працівники. В інструктаж включають такі питання: відомості про господарство, КЗпП. Питання по техніці безпеки і виробничої санітарії, відомості про ЗІЗ, пожежної безпеки та першої допомоги потерпілому.

Первинний інструктаж проводиться на робочому місці. Його завданням є прищепити знову надійшов на роботу навички безпечних прийомів роботи. Проводить інструктаж керівник підрозділу.

Повторний інструктаж проводиться індивідуально або з групою працівників через певний проміжок часу, але не рідше ніж через 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться при зміні або порушення правил з охорони праці, при надзвичайному стані, зміні технологічного процесу, заміні машин і інструменту, при перервах в роботі більше місяця для робіт з підвищеною небезпекою і 60 днів для інших професій.

Поточний інструктаж проводиться з працівниками, які направляються на роботи з підвищеною небезпекою. Оформляють наряд-допуск.

Цільовий інструктаж проводять при виконанні небезпечних і шкідливих робіт.

Після проведення кожного виду інструктажу, обов'язково фіксується в журналі реєстрації інструктажів з техніки безпеки.

Загальні принципи охорони праці (ОП) передбачають нормування умов праці у виробництві спрямованих на усунення травм. До них відносяться:

- безпека підприємства, яка полягає у використанні можливостей регламентованої безпеки і реалізована в процесі цілеспрямованого функціонування системи охорони здоров'я і безпеки;

- дотримання матеріально-технічного забезпечення та умов праці, тобто поліпшення матеріально-технічної бази, умови праці повинні покращуватися;

- постійне поліпшення умов праці, що передбачає стабільне зниження шкідливого впливу продукції. Це означає, що безпека і нешкідливість не досягаються негайно, але створюються на основі системної діяльності. Управління рівнем охорони здоров'я, який встановлює об'єктивні потреби і здатність керувати показниками, що характеризують здоров'я і безпеку як системи.

Ефективна профілактична безпека праці передбачає свідоме врахування та використання набору принципів безпеки технічного та організаційного характеру. Система управління охороною праці на підприємстві (пізніше СУОП) являє собою набір взаємопов'язаних соціально-економічних, наукових, технічних, організаційно-правових заходів і засобів, спрямованих на забезпечення безпеки, зберегти здоров'я та здоров'я працівників у процесі їх роботи та реалізувати через регламентовані законодавчі та організаційно-методичні документи цілеспрямовану діяльність послуг, виробничі підрозділи, посадових осіб та працівників підприємства.

Метою управління охорони праці та безпеки є створення в кожній одиниці і на кожному робочому місці робоче середовище, яке відповідає вимогам правил, створюючи передумови для стійкого зниження продуктивності на робочому місці Травми. Головним завданням СУОП є впорядкування та впорядкування на основі загальних принципів виробничого управління профілактичної роботи з питань охорони здоров'я та безпеки на підприємстві. Підвищення ефективності та зосередження уваги шляхом раціонального та систематичного використання всіх технічних, організаційних, економічних та соціальних можливостей підприємства.

Діяльність СУОП забезпечується керівником підприємства та реалізується через набір організаційних заходів, що передбачають формування органів охорони праці, встановлення відповідної служби та призначення посадових осіб, а також забезпечити конкретні проблеми охорони здоров'я та безпеки та забезпечити організаційне, оперативне та методичне керівництво діяльністю структурних підрозділів у рамках СУОП:

- визначення набору спеціальних функцій управління ОП і конкретних завдань;
- організацію розробки планів діяльності по ОП;
- встановлення функціональних зв'язків між виробничими підрозділами;
- розробляється план діяльності з ОП, щорічний план, щоквартальні і щомісячні роботи служби ОП. Плани діяльності з ОП складені з урахуванням реальних матеріальних і грошових коштів, дані про які представлені планувальними, економічними та фінансовими та бухгалтерськими службами підприємства, плануванням організаційної діяльності враховується за часом бюджету виконавців.

Фінансування заходів з ОП здійснюється за рахунок власних коштів підприємствами не менше 0.5% від обсягу ремонтно-будівельних робіт.

Оперативно-методичне керівництво роботою з ОП в цілому на підприємстві здійснюється службою ВІД.

Основні форми реалізації оперативного керівництва і координації - видання наказів і розпоряджень, видача розпоряджень і вказівок, коригування (при обґрунтованій необхідності) затверджених планів і постановка нових завдань, проведення оперативних нарад з охорони праці.

Інженерно-технічне забезпечення формується і реалізується через систему інженерно-технічних рішень єдиної технічної політики щодо забезпечення ефективно надійної і безпечної роботи філії, створення на ньому умов праці, відповідних санітарним нормам, прав і стандартам.

Контроль стану охорони праці та Функціонування СУОП - носять дієвий характер. Аналіз оцінка і стимулювання роботи з охорони праці - проводяться системно. Відповідальність працівників підприємства за порушення вимог щодо охорони праці - дотримується.

Працівники, винні в порушенні законодавства про працю, правових норм та інструкцій з охорони праці, невиконання зобов'язань за колективними договорами, посадових обов'язків, розпоряджень органів державного нагляду і відомчого контролю, а також наказів, і вказівок, несуть (в залежності від характеру порушень і їх наслідків) дисциплінарну, адміністративну, матеріальну або кримінальну відповідальність.

5.2 Стан і аналіз охорони праці на підприємстві

Нещасний випадок може статися під час виконання своїх функціональних обов'язків на виробництві, по дорозі на роботу або з роботи. Виробнича травма - травма, отримана працівником при виконанні завдання керівника у встановлений розпорядком дня час.

Травми, отримані при виконанні роботи в сп'янінні, при розкраданні матеріалів і речовин або при виконанні робіт в особистих цілях, не є виробничими, хоча і отримані на робочому місці господарства.

Нещасний випадок на виробництві розслідується комісією відповідно до «Положення». Результатом розслідування нещасних випадків, які спричинили

втрату працездатності не менше одного дня, оформляють актом Н-1, який зберігається на підприємстві 45 років.

Групові та смертельні нещасні випадки розслідуються комісією за участю представників галузевого департаменту з нагляду за охороною праці та вищестоящої організації.

Для оцінки ефективності організації роботи служби охорони праці щорічно проводиться аналіз виробничого травматизму, загальних і професійних захворювань.

За результатами аналізу розробляються заходи щодо усунення недоліків в роботі служби охорони праці підприємства.

5.3 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Відповідно до [122] небезпечним фактором, що підлягає ідентифікації на даному об'єкті, є електричний струм, при напрузі $U = 380V$ та $U = 220V$.

За видами аварій, які можуть відбутися, виходячи з властивостей небезпечного фактора, електричний струм належить до групи 2 (пожежа).

Електроприймачами лабораторії є:

- електрообладнання водогрійних котлів з автоматикою;
- загальнокотельна автоматика;
- мережеві насоси;
- підживлювальні насоси;
- облаштування стендів;
- прилади контролю та автоматики;
- мережа робочого та ремонтного освітлення.

Встановлена потужність електроприймачів лабораторії становить 16 кВт, у тому числі мережу освітлення 1,2 кВт.

Максимально споживана потужність складає 14 кВт, у тому числі мережу освітлення 0,8 кВт.

Максимальна потужність одиничного електродвигуна становить 5,5 кВт (компресор).

Для компенсації реактивної потужності сітьових насосів передбачено установку трифазних конденсаторних батарей потужністю 3,15 кВт.

Зовнішній контур заземлення лабораторії, виконаного електродами з кутової сталі 50*50 довжиною 4,0 м, вбитих в землю на глибину 4,5 м від поверхні землі. Електроди з'єднані між собою смуговою сталлю 40*4 мм. Горизонтальний заземлювач прокладений на глибині 0,5 м від поверхні землі.

Зовнішній контур заземлення з'єднаний з загальним заземлювальним провідником лабораторії смугою 40×4 мм.

Загальний заземлювальний провідник лабораторії прокладено по стіні на висоті 0,7 м від рівня підлоги.

Проектоване електрообладнання заземлене шляхом приєднання до загального заземленого провідника смугою 25*4 мм і занулено за допомогою окремої жили живильної кабельної лінії.

Згідно з вимогами ПУЕ-2007 п. 1.7.92 опір розтіканню заземлювача заземлювального пристрою, при величині лінійного напруги 220 В в будь-який час року має бути не більше $R_u = 4 \text{ Ом}$.

Перевіримо величину опору, який може створити прийняте до виконання заземлюючих пристроїв:

- вертикальні заземлювачі - куточок 50x50x5 довжиною 4,0 м, 6 шт.;
- горизонтальні заземлювачі - сталева смуга 40x4 довжиною 15 м;
- глибина закладання 0,5 м від поверхні ґрунту;
- ґрунт - глина.

Розрахунковий питомий опір ґрунту, Ом · см

$$\rho = \rho_{\text{спр}} \cdot \varphi_2, \quad (5.1)$$

де $\rho_{\text{спр}}$ - величина питомого опору ґрунту

$$\rho_{\text{спр}} = 5 \cdot 10^3 ,$$

φ_2 - розрахунковий кліматичний коефіцієнт опору ґрунту, Ом · см,
 $\varphi_2 = 1,36$

$$p = 5 \cdot 10^3 \cdot 1,36 = 6,8 \cdot 10^3.$$

Розраховуємо опір заглибленого одиночного вертикального заземлювача, Ом

$$R_0 = (0,366 \cdot p/l) \cdot \lg(4 \cdot l/d), \quad (5.2)$$

де l - довжина вертикального заземлювача, см;

d - діаметр вертикального заземлювача, см,

$$R_0 = \left(0,366 \cdot 6,8 \cdot \frac{10^3}{400} \right) \cdot \lg \left(4 \cdot \frac{400}{5} \right) = 15,6.$$

Обираємо коефіцієнт взаємного екранування між заземлювачами
 $\eta = 0,68$.

Опір вибраного штучного заземлювача, Ом

$$R_{\Sigma} = R_0 / (n \cdot \eta), \quad (5.3)$$

де n - обрана кількість електродів, $n = 6$

$$R_{\Sigma} = 15,6 / (6 \cdot 0,68) = 1,768.$$

Так як R_{Σ} обраного штучного заземлювача більше розраховуємо опір сполучних металевих смуг R_n , Ом

$$R_n = \left(0,366 + \frac{\rho}{\eta_n \cdot l_n}\right) \cdot \lg \left(4 + \frac{l_n}{b_n} \cdot h_n\right), \quad (5.4)$$

де η_n - коефіцієнт екранування смуги, $\eta_n = 0,8$;

l_n - довжина смуги, см;

b_n - ширина смуги, см;

h_n - глибина закладання смуги, см.

$$R_n = (366 \cdot 6,8 \cdot 10^3 / (0,8 + 3900)) \cdot \lg(4 \cdot 3900 / 4 + 50) = 1,51.$$

Провідність штучного заземлювача складається з вертикальних заземлювачів і провідності сполучної смуги

$$l/R_u = l/R_{\Sigma s} + l/R_n, \quad (5.5)$$

Маємо

$$l/R_u = l/1,912 + l/1,51 = 1,19.$$

Захист від блискавки електрообладнання виконано відповідно до [125]. Приймачем блискавки є блисковковідводник, контур заземлення від блискавки суміщений з існуючим зовнішнім контуром заземлення лабораторії смуговою сталлю 40*4 мм.

Смугу прокладено в землі і по зовнішній поверхні будівлі, всі з'єднання виконано зварюванням.

5.4 Виробнича санітарія

5.4.1 Розрахунок штучного освітлення лабораторії

Основна відмінність умов праці у лабораторії полягає в тому, що у вона знаходиться у підвальному приміщенні і там відсутня достатня освітленість поля зору працюючого рівномірно розподіленим світловим потоком. Тому необхідно створити таке штучне висвітлення, при якому сумарний світловий потік від всіх установлених у робочій зоні світильників розподілявся рівномірно.

Завданням розрахунку освітленості є визначення числа й потужності світильників, необхідних для забезпечення заданого значення освітленості. Розрахунок проводиться методом світлового потоку. Величина світлового потоку однієї лампи дорівнює

$$\Phi_{л} = E_{н} S K_{з} Z / \eta N, \quad (5.6)$$

де $E_{н}$ - нормована освітленість, лк ($E_{н} = 25$ по [56]);

S - освітлювана площа, м²;

$K_{оз}$ – коефіцієнт запасу (приймаємо 1,3);

Z - поправочний коефіцієнт, залежно від типу лампи (приймаємо $Z = 1,15$);

N - число світильників; проектуємо $N = 6$ (мал.6.4.1.);

η - коефіцієнт використання світлового потоку, визначається по індексі приміщення і і коефіцієнту відбиття стелі, стін і підлоги ($\rho_{п}, \rho_{з}, \rho_{р}$).

Індекс приміщення

$$i = a b / h (a + b), \quad (5.7)$$

де a – довжина приміщення, $a = 5,6$ м;

b – ширина приміщення, $b = 2,2$ м;

h – розрахункова висота (до робочої поверхні).

Маємо у лабораторії

$$h = H - 1,2, \quad (4.5)$$

$$h = 3 - 1,2 = 1,8 \text{ м.}$$

$$i = 5,6 \times 2,2 / 1,8 \times (5,6 + 2,2) = 0,88.$$

Приймаємо

$$\rho_n = 70\%$$

$$\rho_c = 50\%$$

$$\rho_p = 10\%$$

Тоді $\eta = 59,76\%$.

Підставивши значення, одержимо, лм

$$\Phi = 25 \times 12,3 \times 1,3 \times 1,15 / 0,5976 \times 6 = 12\,841.$$

Вибираємо лампу накаливання типу Б-220 потужністю 100 Вт і світловим потоком $\Phi_{\text{л}} = 1\,350$ лм.

Визначимо розрахункову величину освітленості, що формується при використанні ламп типу БК-220, лм.

$$E_p = E_n * \Phi_{\text{л}} / \Phi, \quad (5.8)$$

$$E_p = 25 * 1\,350 / 12\,841 = 2,64 \approx 3.$$

Отримана величина E задовольняє умовам поставленого завдання.

5.4.2 Система вентиляції повітря

У лабораторії джерелом шуму є працюючі вентилятори, сітьові, підживлювальні насоси, а також рух середовища по трубопроводах води, і повітря.

З метою зниження шуму в лабораторії всі діаметри трубопроводів підібрані з урахуванням руху середовища без шуму.

Проектовані вентилятори, двигуни насосів використані з малошумними характеристиками повного заводського виготовлення.

Рівень шуму в лабораторії не перевищує 65 ДЦБ.

5.5 Заходи з поліпшення умов праці

У приміщенні лабораторії необхідно виконати мережу робочого освітлення напругою 220 вольт з частотою 50 Гц світильниками з світлодіодними та люмінесцентними лампами.

Мережу освітлення виконати проводом в трубах.

Аварійне освітлення передбачити від переносних акумуляторних ліхтарів (тому що площа лабораторії менше 250 м).

Відповідно до п 4.5.13 [123]. Електрообладнання спеціальних установок, зони в приміщеннях і зони навколо зовнішніх установок не належать до вибухонебезпечних.

Відповідно до [124], крім основного електроосвітлення в нормальному виконанні, встановити світильник у вибухонебезпечному виконанні, підключений до окремої лінії живлення.

Вимикач встановити поза приміщенням.

Вибір світильників провести з урахуванням середовища і норм освітленості, відповідно до [124].

5.6 Пожежна безпека

Для внутрішнього пожежогасіння використовується пожежний кран $d_y=50$, підключений до системи господарсько-питного водопроводу.

У лабораторії є щит обладнаний першочерговими засобами пожежогасіння:

1. вогнегасник порошковий ОП-5 - 1 шт.;
2. ящик з піском - 1 шт.;
3. лопата - 2 шт.;
4. азбестове полотно 2 х 2 м -1 шт.

Витрати води на внутрішнє пожежогасіння - 2,5 л/сек на струмінь. Зовнішнє пожежогасіння від пожежного гідранта, розташованого на території прилеглої житлової забудови.

Витрати води на потреби зовнішнього пожежогасіння згідно з [127] - 10 л/сек. Зовнішнє пожежогасіння здійснюється від існуючого пожежного гідранта житлового кварталу. Гідрант розташований на відстані 31м від котельні.

5.7 Захист навколишнього середовища

При проведенні монтажних робіт слід дотримуватися вимог загальномайданчикових і технологічних заходів з техніки безпеки згідно з «Охорона праці і промислова безпека у будівництві, сновні положення», з пожежної безпеки – [127], [129], [130], та санітарно-гігієнічними нормами і вимогами.

Прибирання і транспортування сміття і бою матеріалів повинне проводитися тільки в закритих коробках або закритих жолобах.

Сміття і бой повинні вивозитися тільки на дозволені звалища.

5 ВИСНОВКИ

Метод BVM, реалізований у цьому рішенні, має хорошу точність при прогнозі передачі тепла і потоку рідини.

На основі моделювання V-подібного ребристого потоку каналу ми виявили це експериментальні дані ЖК надійніші, ніж дані ТС, якими є причина невідповідності експериментальних висновків. Це також підтвердило що V-подібні ребра, спрямовані вниз за течією, ефективніше переносять тепло посилення.

Однак для загального застосування ЛЕС у моделюванні теплопередачі існують інші труднощі:

1. Відновлення пристінної турбулентності: Пристінна турбулентність є дуже турбулентною і малий масштаб (і в часі, і в просторі), і грає надто суттєву роль у прогнозах передачі тепла, яку слід нехтувати. Ці маленькі ваги в нормі не можуть бути захоплені симуляціями, орієнтованими на великі масштаби. Тому тут мають життєво важливе значення підрешітки. Отже, моделі SGS були б дуже важливими для проблем з передачею тепла. Тут може зіграти певну чисельну помилку, але може мати лише обмежений успіх. Деякі моделі SGS здаються перспективними як ПАМВ (пристінкова адаптація місцевої вихровості) та динамічну модель (DSM).

2. Обчислювальні витрати - потрібен тривалий час, щоб отримати достатньо статистичних зразків LES, що накладає велике навантаження на обчислювальну швидкість та потужність. Деякі розрахунки RANS можуть бути закінчені за лічені хвилини, але це може зайняти кілька днів порівняльний розрахунок LES.

Загалом, ми можемо передбачити просування обчислювальної потужності і, як наслідок, модель SGS стане менш важливою, оскільки сітка може бути точніша та часові кроки можуть бути меншими, і поступово наближаються до рівня DNS, хоча краще розуміння турбулентності біля стіни прискорить цю процедуру.

Сьогоднішні паралельні комп'ютерні кластери, побудовані з товарних компонентів, реалістичні проблеми теплопередачі можуть бути вирішені за допомогою ВМ на прийнятному рівні вартості та пристойної точності при одночасному просуванні обчислювальних технологій зроби́ть рішення швидшим і точнішим.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Wesseling, P. Principles of Computational Fluid Dynamics, Springer-Verlag, New York, 2000. 254 p.
2. Patankar, S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York, 1980. 342 p.
3. Chorin, A. J. A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems, *Journal of Computational Physics*, 2(1), 1967. pp. 12–26.
4. Ferziger, J. H., and Perić, M. Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer, Berlin, 1996. 345p.
5. Hirsch, C. Numerical Computation of Internal and External Flows, 2, John Wiley, Chichester, 1990. 267p.
6. Laney, C. B. Computational Gasdynamics, Cambridge University Press, Cambridge, 1998. 324p.
7. Allgower, E. L., and Georg, K. Introduction to Numerical Continuation Methods, *SIAM*, Philadelphia, 1987. 287p.
8. Deufhard, P. Newton Methods for Nonlinear Problems, Springer-Verlag, Berlin, 2004. 256p.
9. Wilcox, D. C. Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, 2006. 276p.
10. Brezinski, C., and Zaglia, M. R. Extrapolation Methods Theory and Practice, Elsevier Science Publishing, Amsterdam, 1991. 298p.
11. Saad, Y. Iterative Methods for Sparse Linear Systems *SIAM*, Philadelphia, 2004. 243p.
12. Jameson, A., Schmidt, W., and Turkel, E. Numerical Solutions of the Euler Equations by Finite Volume Methods Using Runge-Kutta Time Stepping, *AIAA* 1981. P.1253–1259.
13. Sidi, A., and Celestina, M. L. Convergence Acceleration for Vector Sequences and Application to Computational Fluid Dynamics, *NASA Technical Memolen*, 101327 (ICOMP-88-17). 345p.

14. Washio, T., and Oosterlee, C.W. Krylov Subspace Acceleration for Nonlinear Multigrid Schemes, *Electronic Transactions on Numerical Analysis*, 6, December 1997, ISSN 1068-9613. Institute for Computational Mechanics in Propulsion, Lewis Research Center, Cleveland, OH. pp. 271–290.
15. Jaschke, L. Preconditioned Arnoldi Methods for Systems of Nonlinear Equations, PhD Thesis, *Swiss Federal Institute of Technology*, Zurich, Switzerland, 2003. 213p.
16. Andersson, C. Solving Linear Equations on Parallel Distributed Memory Architectures by Extrapolation, Technical Report, TRITA-NA-E9746, Department of Numerical Analysis and Computer Science, Royal Institute of Technology, Sweden, 1997. 325p.
17. Jemcov, A., Maruszewski, J. P., and Jasak, H. Performance Improvement of Algebraic Multigrid Solver by Vector Sequence Extrapolation, 15th Annual Conference of CFD Society of Canada, May 27–31, Toronto, 2007. 435p.
18. Briggs, W., Henson, V. E., and McCormick, S. A Multigrid Tutorial, SIAM, Philadelphia, 2000. 354p.
19. Fluent Inc., *Fluent Users Manual*, Fluent Inc., 2006. 276p.
20. Pope, S. B. *Turbulent Flows*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000. 365p.
21. Morawska, L., Hofmann, W., Hitchins-Loveday, J., Swanson, C., Mengersen, K. Experimental study of the deposition of combustion aerosols in the human respiratory tract, *Journal of Aerosol Science*, 36, 2005. pp. 939–957.
22. Kittelson, D. B. Engines and nanoparticles: A review, *Journal of Aerosol Science*, 29(5–6), 1998. pp. 575–588.
23. Bernstein, G. M. A review of the influence of particle size, puff volume, and inhalation pattern on the deposition of cigarette smoke particles in the respiratory tract, *Inhalation Toxicology*, 16, 2004. pp. 675–689.
24. Mandell, G. L., Bennett, J. E., Bolin, R. D. *Principles and Practices of Infectious Diseases*, 6th ed., Churchill Livingstone, New York, 2004. 343p.

25. ICRP, *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*, Elsevier Science Ltd., New York, 1994. 143p.
26. Chan, T. L., Lippmann, M. Experimental measurements and empirical modeling of the regional deposition of inhaled particles in humans, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 41, 1980. pp. 399–409.
27. Heyder, J., Gebhart, J., Rudolf, G., Schiller, C. F., Stahlhofen, W. Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range of 0,005–15 microns, *Journal of Aerosol Science*, 17(5), 1986. pp. 811–825.
28. Stahlhofen, W., Rudolf, G., James, A. C. Intercomparison of experimental regional aerosol deposition data, *Journal of Aerosol Medicine*, 2(3), 1989. pp. 285–308.
29. Binkova, B., Giguere, Y., Rossner, P., Dostal, M., Sram, R. J. The effect of dibenzo[a,l]pyrene and benzo[a]pyrene on human diploid lung fibroblasts: The induction of DNA adducts, expression of p53 and p21 WAF1 proteins and cell cycle distribution, *Mutation Research*, 471, 2000. pp. 57–70.
30. Pandya, R. J., Solomon, G., Kinner, A., Balmes, J. R. Diesel exhaust and asthma: Hypotheses and molecular mechanisms of action, *Environmental Health Perspectives*, 110, 2002. pp. 103–112.
31. Balashazy, I., Hofmann, W., Heistracher, T. Computation of local enhancement factors for the quantification of particle deposition patterns in airway bifurcations, *Journal of Aerosol Science*, 30, 1999. pp. 185–203.
32. Bell, K. A., Friedlander, S. K. Aerosol deposition in models of a human lung bifurcation, *Staub-Reinhaltung der Luft*, 33, 1973. pp. 183–187.
33. Longest, P. W., Vinchurkar, S., Martonen, T. B. Transport and deposition of respiratory aerosols in models of childhood asthma, *Journal of Aerosol Science*, 37, 2006. pp. 1234–1257.
34. Martonen, T. B., Rosati, J. A., Isaacs, K. K. Modeling deposition of inhaled particles, in *Aerosols Handbook*, L. S. Ruzer & N. H. Harley, eds., CRC Press, New York, 2005. pp. 113–155.

35. Oldham, M. J., Phalen, R. F., Heistracher, T. Computational fluid dynamic predictions and experimental results for particle deposition in an airway model, *Aerosol Science and Technology*, 32(1), 2000. pp. 61–71.
36. Schlesinger, R. B., Lippmann, M. Particle deposition in casts of the human upper tracheobronchial tree, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 33, 1972. pp. 237–251.
37. Zhang, Z., Kleinstreuer, C., Donohue, J. F., Kim, C. S. Comparison of microand nano-size particle depositions in a human upper airway model, *Journal of Aerosol Science*, 36(2), 2005. pp. 211–233.
38. Balashazy, I., Hofmann, W., Heistracher, T. Local particle deposition patterns may play a key role in the development of lung cancer, *Journal of Applied Physiology*, 94, 2003. pp. 1719–1725.
39. Kimbell, J. S., Subramaniam, R. P., Gross, E. A., Schlosser, P. M., Morgan, K. T. Dosimetry modeling of inhaled formaldehyde: Comparisons of local flux predictions in the rat, monkey, and human nasal passages, *Toxicological Sciences*, 64(1), 2001. pp. 100–110.
40. Longest, P. W., Xi, J. Computational investigation of particle inertia effects on submicron aerosol deposition in the respiratory tract, *Journal of Aerosol Science*, 38(1), 2007. pp. 111–130.
41. Shi, H., Kleinstreuer, C., Zhang, Z., Kim, C. S. Nanoparticle transport and deposition in bifurcating tubes with different inlet conditions, *Physics of Fluids*, 16(7), 2004. pp. 2199–2213.
42. Phalen, R. F., Oldham, M. J., Nel, A. E. Tracheobronchial particle dose considerations for in vitro toxicology studies, *Toxicological Sciences*, 92(1), 2006. pp. 126–132.
43. Longest, P.W., Oldham, M. J. Mutual enhancements of CFD modeling and experimental data: A case study of one micrometer particle deposition in a branching airway model, *Inhalation Toxicology*, 18(10), 2006. pp. 761–772.
44. Robinson, R. J., Oldham, M. J., Clinkenbeard, R. E., Rai, P. Experimental and numerical smoke carcinogen deposition in a multi-generation human replica

- tracheobronchial model, *Annals of Biomedical Engineering*, 34(3), 2006. pp. 373–383.
45. Longest, P. W., Oldham, M. J. Numerical and experimental deposition of fine respiratory aerosols: Development of a two-phase drift flux model with near-wall velocity corrections, *Journal of Aerosol Science*, 39, 2008. pp. 48–70.
46. Hofmann, W., Golser, R., Balashazy, I. Inspiratory deposition efficiency of ultrafine particles in a human airway bifurcation model, *Aerosol Science and Technology*, 37(12), 2003. pp. 988–994.
47. Ingham, D. B. Diffusion of aerosols in the entrance region of a smooth cylindrical pipe, *Journal of Aerosol Science*, 22(3), 1991. pp. 253–257.
48. Martonen, T. B., Zhang, Z., Yang, Y. Particle diffusion with entrance effects in a smooth-walled cylinder, *Journal of Aerosol Science*, 27(1), 1996, pp. 139–150.
49. Longest, P.W., Kleinstreuer, C., Buchanan, J. R. Efficient computation of microparticle dynamics including wall effects, *Computers & Fluids*, 33(4), 2004. pp. 577–601.
50. Longest, P.W., Xi, J. Effectiveness of direct Lagrangian tracking models for simulating nanoparticle deposition in the upper airways, *Aerosol Science and Technology*, 41, 2007. pp. 380–397.
51. Fernandez de la Mora, J., Rosner, D. E. Effects of inertia on the diffusional deposition of small particles to spheres and cylinders at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 125, 1982. pp. 379–395/
52. Friedlander, S. K. *Smoke, Dust and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics*, 2 ed., Oxford University Press, New York, 2000. 365p.
53. Manninen, M., Taivassalo, V., Kallio, S. On the mixture model for multiphase flow, *VTT Publications 288, Technical Research Center of Finland*, 1996. 234p.
54. Wang, J. B., Lai, A. C. K. A new drift-flux model for particle transport and deposition in human airways, *Journal of Biomechanical Engineering*, 128, 2006. pp. 97–105.
55. Xi, J., Longest, P. W., Martonen, T. B. Effects of the laryngeal jet on nanoand microparticle transport and deposition in an approximate model of the upper

tracheobronchial airways, *Journal of Applied Physiology*, 104, 2008. pp. 1761–1777.

56. Ghalichi, F., Deng, X., Champlain, A. D., Douville, Y., King, M., Guidoin, R. Low Reynolds number turbulence modeling of blood flow in arterial stenoses, *Biorheology*, 35(4–5), 1998. pp. 281–294.

57. Wilcox, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd ed., DCW Industries, Inc., CA, 1998. 428p.

58. Xi, J., Longest, P. W. Transport and deposition of micro-aerosols in realistic and simplified models of the oral airway, *Annals of Biomedical Engineering*, 35(4), 2007. pp. 560–581.

59. Xi, J., Longest, P. W. Effects of oral airway geometry characteristics on the diffusional deposition of inhaled nanoparticles, *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, 130, , 2008. p. 11008

60. Xi, J., Longest, P.W. Numerical predictions of submicrometer aerosol deposition in the nasal cavity using a novel drift flux approach, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, 2008. pp. 5562–5577.

61. Longest, P. W., Vinchurkar, S. Validating CFD predictions of respiratory aerosol deposition: effects of upstream transition and turbulence, *Journal of Biomechanics*, 40, 2007. pp. 305–316.

62. Xi, J., Longest, P.W. Evaluation of a drift flux model for simulating submicrometer aerosol dynamics in human upper tracheobronchial airways, *Annals of Biomedical Engineering*, 36(10), 2008. pp. 1714–1734.

63. Crowe, C.T., Troutt, T. R., Chung, J. N. Numerical models for two-phase turbulent flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28, pp. 11–43, 1996.

64. Allen, M. D., Raabe, O. G. Slip correction measurements of spherical solid aerosol particles in an improved Millikan apparatus, *Aerosol Science and Technology*, 4, 1985. pp. 269–286.

65. Hinds, W. C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, Wiley, New York, 1999. 426p.

66. Li, A., Ahmadi, G. Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow, *Aerosol Science and Technology*, 16, 1992. pp. 209–226.
67. Matida, E. A., Finlay, W. H., Grgic, L. B. Improved numerical simulation of aerosol deposition in an idealized mouth-throat, *Journal of Aerosol Science*, 35, 2004. pp. 1–19.
68. Lumb, A.B. *Nunn's Applied Respiratory Physiology*, Butterworth Heinemann, Oxford, 2000. 425p.
69. Xi, J., Longest, P. W. Effects of improved near-wall modeling on microparticle deposition in oral airway geometries, *Proceedings of the 2007ASME Summer Bioengineering Conference*, Paper No. SBC2007–176227, Keystone, CO, 2007. 435p.
70. Cohen, B. S., Asgharian, B. Deposition of ultrafine particles in the upper airways: An empirical analysis, *Journal of Aerosol Science*, 21, 1990. pp. 789–797.
71. Oldham, M. J., Mannix, R. C., Phalen, R. F. Deposition of monodisperse particles in hollow models representing adult and child-size tracheobronchial airways, *Health Physics*, 72(6), 1997. pp. 827–833.
72. Broday, D. M. Deposition of ultrafine particles at carinal ridges of the upper bronchial airways, *Aerosol Science and Technology*, 38, 2004. pp. 991–1000.
73. Zhang, Z., Kleinstreuer, C. Airflow structures and nano-particle deposition in a human upper airway model, *Journal of Computational Physics*, 198(1), pp. 178–210, 2004.
74. Chen, F., Lai, A. C. K. An Eulerian model for particle deposition under electrostatic and turbulent conditions, *Journal of Aerosol Science*, 35, 2004. pp. 47–62.
75. Cohen, B. S., Sussman, R. G., Lippmann, M. Ultrafine particle deposition in a human tracheobronchial cast, *Aerosol Science and Technology*, 12, 1990. pp. 1082–1093.

76. Van Ertbruggen, C., Hirsch, C., Paiva, M. Anatomically based three-dimensional model of airways to simulate flow and particle transport using computational fluid dynamics, *Journal of Applied Physiology*, 98(3), 2005. pp. 970–980.
77. Pedley, T. J. Pulmonary fluid dynamics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 9, 1977. pp. 229–274.
78. Chan, T. L., Schreck, R. M., Lippmann, M. Effect of the laryngeal jet on particle deposition in the human trachea and upper bronchial airways, *Journal of Aerosol Science*, 11, 1980. pp. 447–459.
79. Gurman, J. L., Lippmann, M., Schlesinger, R. B. Particle deposition in replicate casts of the human upper tracheobronchial tree under constant and cyclic inspiratory flow. I. Experimental, *Aerosol Science and Technology*, 3, 1984. pp. 245–252.
80. Martonen, T. B., Zhang, Z., Lessmann, R. Fluid dynamics of the human larynx and upper tracheobronchial airways, *Aerosol Science and Technology*, 19, 1993. pp. 133–144.
81. Corcoran, T. E., Chigier, N. Inertial deposition effects: A study of aerosol mechanics in the trachea using laser Doppler velocimetry and fluorescent dye, *Journal of Biomechanical Engineering*, 124, 2002. pp. 629–637.
82. Kabilan, S., Lin, C. L., Hoffman, E. A. Characteristics of airflow in a CT-based ovine lung: A numerical study, *Journal of Applied Physiology*, 102, 2007. pp. 1469–1482.
83. Li, Z., Kleinstreuer, C., Zhang, Z. Particle deposition in the human tracheobronchial airways due to transient inspiratory flow patterns, *Journal of Aerosol Science*, 38, 2007. pp. 625–644.
84. Lin, C. L., Tawhai, M. H., McLennan, G., Hoffman, E. A. Characteristics of the turbulent laryngeal jet and its effect on airflow in the human intra-thoracic airways, *Respiratory Physiology and Neurobiology*, 157, 2007. pp. 295–309.
85. Nowak, N., Kakade, P. P., Annapragada, A. V. Computational fluid dynamics simulation of airflow and aerosol deposition in human lungs, *Annals of Biomedical Engineering*, 31, 2003. pp. 374–390.

86. Zhang, Z., Kleinstreuer, C., Kim, C. S. Cyclic micron-size particle inhalation and deposition in a triple bifurcation lung airway model, *Journal of Aerosol Science*, 33(2), 2002, pp. 257–281.
87. Cheng, K. H., Cheng, Y. S., Yeh, H. C., Swift, D. L. Deposition of ultrafine aerosols in the head airways during natural breathing and during simulated breathholding using replicate human upper airway casts, *Aerosol Science and Technology*, 23(3), 1995. pp. 465–474.
88. Cheng, Y. S., Yeh, H. C., Guilmette, R. A., Simpson, S. Q., Cheng, K. H., and Swift, D. L. Nasal deposition of ultrafine particles in human volunteers and its relationship to airway geometry, *Aerosol Science and Technology*, 25(3), 1996. pp. 274–291.
89. Shi, H., Kleinstreuer, C., Zhang, Z. Laminar airflow and nanoparticle or vapor deposition in a human nasal cavity model, *Journal of Biomechanical Engineering*, 128, 2006. pp. 697–706.
90. Robert K., Gerard A. Bivalve hatchery technology: The current situation for the Pacific oyster *Crassostrea gigas* and the scallop *Pecten maximus* in France//Aquatic Living Resources. - 1999. - Vol. 12, №2. - P. 121-130.
91. Севостьянов, А. Г. Методы и средства исследований механико-технологических процессов текстильной промышленности / А. Г. Севостьянов. – Москва : «Легкая индустрия», 1980. – 285 с.
92. Виноградов, Ю. С. Математическая статистика и ее применение в текстильной и швейной промышленности / Ю. С. Виноградов. – Москва : «Легкая индустрия», 1970. – 312 с.
93. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – Москва : «Легкая индустрия», 1974. – 262 с.
94. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва : «Машиностроение», 1981. – 320 с.
95. Севостьянов, А. Г. Методы и средства исследований механико-технологических процессов текстильной промышленности. Лабораторный

- практикум / А. Г. Севостьянов [и др.]. – Москва : «Легкая промышленность и бытовое обслуживание», 1986. – 380 с.
96. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – Москва : «Финансы и статистика», 1983. – 280 с.
97. Айвазян, С. А. Прикладная статистика: Исследование зависимостей / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – Москва : «Финансы и статистика», 1985. – 310 с.
98. Григорьев, С. Г. STATGRAPHICS на персональном компьютере / С. Г. Григорьев, А. М. Перфилов, В. В. Левандовский, В. И. Юнкеров. – Санкт-Петербург : «ПО-3», 1992. – 110 с.
99. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. Наука, 1971. – 283 с.
100. Адлер Ю.П., Горский В.Г. Планирование промышленных экспериментов. М., Metallurgia, 1974 – 264с
101. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента: для вузов. М. Радио и связь, 1983. – 248с.
102. Бурлакова З. П., Холодов В. И., Кузьменко Л. В. Структура сообщества фитопланктона в районе вихревого образования в Саргассовом море // Экология моря, 1983, вып. 13. с. 3-13
103. Джонсон Н. и др. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. М. Мир, 1981. – 520 с.
104. Ладыгина Л.В., Пиркова А.В. Оптимизация биотехники культивирования личинок гигантской устрицы *Crassostrea gigas* Th. в питомнике //Экология моря. – 2002. – Вып. 60. – С. 60-64
105. Маркова Е.В. (разработчик). Руководство по применению латинских планов при планировании эксперимента с качественными факторами. Челябинск, 1971. (материал изложен в рецептурном плане).
106. Маркова Е.В., Лисенков А.Н. Планирование эксперимента в условиях неоднородностей. М. Наука, 1973. -324с.

- Мельников С.В. и др. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. М. Колос, 1980. – 168с.
107. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных. Л. Судостроение, 1980 – 384 с.
108. Налимов В.В. Теория эксперимента, М. Наука, 1971. 265с.
109. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. М. Металлургия, 1976 – 128 с.
110. Пиркова А.В., Холодов В.И., Ладыгина Л.В. Оптимизация некоторых элементов культивирования личинок мидии *Mytilus galloprovincialis* Lam. //Гидробиол. журн. – 1998. – Т. 34, №1. – С. 57-61.
111. Пиркова А.В., Ладыгина Л.В. Определение оптимальных условий роста и выживаемости личинок устрицы *Crassostrea gigas* (Th.) на разных стадиях развития //Рыбное хоз-во Украины . – 2004. – № 6. – С. 174-177.
112. Рябушко В.И., Холодов В.И. Нетрофическое взаимодействие морских звёзд и микрофлоры каменистого грунта // Биология моря. – 1985. - №5. –С. 18-26.
113. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М. Машиностроение. 1981 – 184 с.
114. Терентьев П.В. Метод корреляционных плеяд // Вести ЛГУ 1959 – 1959.- №9. Сер. Биол., вып. 2, С 137-141.
115. Холодов В.И. Исследование потоков углерода через организмы гарпактицид *Tigriopus brevicornis* методами математического планирования экспериментов // Экология моря, 1981, вып. 6, с. 29-37.
116. Холодов В.И., Киселёва М.И. Статистический анализ влияния различных грунтов на плотность поселения организмов макро- и мейобентоса. Биология моря, 1985, №2, с. 17 – 25.
117. Холодов В.И., Пиркова А.В., Ладыгина Л.В. Выращивание мидий и устриц в Чёрном море. Севастополь, 2010 – 421 с.
118. Хикс Ч.Р. Основные принципы планирования эксперимента. М. Мир, 1967.-203 с.

119. Численко Л.Л. Номограммы для определения веса водных организмов по размерам и форме тела. – Л.: Наука, 1968. – 106 с.
120. Шефе Г. Дисперсионный анализ. Перевод с английского Б.А. Севастьянова, В.П. Чистякова. М. Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 625 с.
121. Немезер В.Г., Сканави А.Н., Титов В.П.. Инженерное оборудование зданий и сооружений [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-144-inzhenernoe-oborudovanie/12.htm>.
122. Постанови Кабміну України №956 від 11.07.2002 р. «Про ідентифікацію та декларування небезпеки об'єктів підвищеної небезпеки».
123. НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила улаштування електроустановок».
124. ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення».
125. ДСТУ Б В.2.5-38; 2008 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Улаштування захисту від блискавок будівель і споруд».
126. ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека в будівництві».
127. ДБН В.1.1.7-2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва».
128. НПАОП 45.13-1.10-83 «Правила техніки безпеки під час виконання електромонтажних робіт».
129. НПАОП 40.1-1.42-86 «Правила пожежної безпеки при проведенні СМР».
130. ДБН А.3.2-2-2009 «ОХОРОНА ПРАЦІ І ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА У БУДІВНИЦТВІ».