

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Фізико-Технічний Інститут

(повна назва інституту / факультету)

Кафедра фізики енергетичних систем

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ А.А. Халатов
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2016 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності _____ 6.040204 Прикладна фізика
(код і назва)

на тему: Покращення властивостей обтікання та теплозахисту елементів енергетичного устаткування шляхом застосування мікрovidуву

Виконав: студент _____ 4 _____ курсу, групи _____ ФФ-22
(шифр групи)

_____ Даневський Дмитро Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник: д.т.н., проф., Шквар Євген Олексійович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент: п.н.с. відділу гідробіоніки та управління примежовим шаром

Інституту гідромеханіки НАН України, д.т.н., с.н.с. Воскобійник В.А.

(посада, науковий ступінь, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2016

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи за обсягом становить 53 сторінки, містить 1 таблицю, 13 рисунків, список джерел з 24 найменувань.

Темою роботи є дослідження ефективності управління пристінними турбулентними течіями методом мікрovidуву.

Об'єктом дослідження виступають турбулентні течії з модифікованою структурою турбулентності.

Предметом дослідження є керований турбулентний рух шляхом здійснення видуву через проникну поверхню.

Метою роботи є перевірка методу керування пристінними течіями за допомогою методу мікрovidуву в околі обтічної поверхні щодо можливості його використання з метою зменшення поверхневого опору тертя та захисту від теплових потоків у елементах енергетичного обладнання, а також створення такої математичної моделі турбулентної течії, яка була в змозможна описувати пристінний рух за наявності видуву.

При дослідженні використовувалася власноруч створена програма на мові програмування C++.

Завданнями роботи є: створення математичної моделі турбулентної течії; відтворення існуючих експериментальних результатів, дослідження можливостей вибраного методу по контролю турбулентних течій.

В результаті дослідження були отримані наступні результати:

1. Створена модифікована алгебраїчна модель турбулентності, здатна відтворювати ефекти, пов'язані з наявністю мікрovidуву
2. Отримані у результаті обрахунків залежності збігаються з експериментальними і підтверджують спроможність методу мікрovidуву щодо зниження опору тертя та теплозахисту.

Ключові слова: керування течіями, турбулентність, мікрovidув

SUMMARY

The explanatory note of diploma work includes 53 pages, 1 table, 13 pictures, 24 references.

Research of the efficiency of near-wall turbulent flows control with micro-blowing technique is the main theme of the work.

Turbulent flows with modified turbulence structure is the object of the work.

Turbulent flow controlled by micro-blowing through permeable wall is the subject of the work.

Studying the ability of micro-blowing technique for controlling near-wall flows in the direction of skin drag reduction and heat protection in the elements of energetic equipment and also developing the mathematical model capable to reproduce the peculiarities of near-wall flow in the presence of blowing is the aim of the work.

For the research self-made program written in C++ programming language was used.

The main tasks of the work are: to develop a mathematical model of the turbulent flow in the presence of microblowing; reproduce existing experimental data using developed model; study current method capability for turbulent flow control.

Following results were received in the research:

1. Modified algebraic turbulence model capable of reproducing flow peculiarities in the presence of blowing was developed.
2. Sufficient correspondence level with the experimental data have been received. Results of the research showed the capability of the micro-blowing technique of skin drag reduction and heat protection.

Keywords: flow control, turbulence, microblowing

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
Розділ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТЕЧІЯМИ ЗА ДОМОГОЮ ВДУВУ ГАЗУ У ПРИМЕЖОВИЙ ШАР	11
1.1 Сучасний стан розробки методів керування течіями з використанням проникних стінок	11
1.2 Аналіз проблем, що постають при розробках методів контролю за допомогою видуву у примежовий шар	12
1.3 Концепція методу мікрovidуву	14
1.4 Висновки з розділу 1. Постанова мети дипломної роботи.....	20
Розділ 2. ОГЛЯД СПОСОБІВ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ.....	22
2.1 Опис загальних підходів щодо математичного опису течій	22
2.2 Методи моделювання турбулентних течій	24
2.3 Порівняння методів моделювання турбулентних течій	28
2.4 Висновки з розділу 2.	29
Розділ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ОБТІКАННЯ ПЛОСКОЇ ПЛАСТИНИ ЗА УМОВ НАЯВНОСТІ ДІЛЯНКИ З МІКРОВИДУВОМ	31
3.1 Постановка задачі.....	31
3.2 Модель турбулентності.....	34
3.3 Модифікація моделі турбулентності у випадках наявності видуву	36
3.4 Отримані результати	39
3.5 Моделювання обтікання у трьохвимірному випадку.....	47
3.5 Висновки з розділу 3.	48
ВИСНОВКИ	50
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	51

ВСТУП

Як відомо, однією з сучасних проблем, що гостро стоять перед людством є розвиток енергетики, в особливості в напрямку енергозбереження. Запасів традиційних корисних копалин (нафта, газ, вугілля), по різних оцінках, може вистачити ще на 50-200 років, що обумовлює необхідність пошуку альтернативних джерел енергії та розвитку економічних стратегій щодо використання наявних ресурсів. Однією з важливих сфер дослідження в цих напрямках є розвиток методів, направлених на скорочення втрат при обтіканні турбулентними потоками рідин чи газів різного роду промислових об'єктів, зокрема, транспортних засобів. Відомо, що при дозвуковому польоті, наприклад, літака, половина загального опору, що чинить повітря, приходить на опір за рахунок тиску, тоді як інша половина — на опір за рахунок сил тертя. Задачі, що пов'язані з оптимізацією форм транспортних засобів, а отже, із зменшенням опору тиску, є давно досліджуваними і, по великому рахунку, вирішеними, тоді як методи, що пов'язані зі зменшенням опору тертя є відносно новими і зараз знаходяться в фазі активного розвитку. Зменшення опору тертя можливо досягнути, спираючись на загальні закони гідрогазодинаміки і механіки, та застосування відповідних до цих законів методів управління факторами, що впливають на поверхневий опір. Загалом, виділяють два способи впливу на поверхневий опір: вплив за рахунок зміни конфігурації течії в примежовому шарі та вплив за рахунок зміни контакту течії з поверхнею. До першого типу відносяться методи, що дозволяють знизити рівень турбулентності у потоці і таким чином підвищити стійкість течії. Цього можливо досягти за рахунок додаткових затрат енергії на відсмоктування чи вдуг газу чи рідини у примежовий шар, штучну вихрогенерацію, деструкцію великих вихорів і т.п. До другого типу відносяться методи, що направлені на зміну конфігурації поверхні або її покриття: використання рухомих поверхонь, застосування гідрофобних або гідрофільних покриттів, інжекція бульбашок газу. Усі ці

методи прийнято класифікувати в залежності від необхідних додаткових затрат енергії на активні та пасивні.

Пасивні методи не потребують додаткової енергії для свого використання, але саме через це вони виявляються досить обмеженими в своїй реалізації, не є особливо гнучкими, і загалом не здатні значним чином впливати на структуру течії або суттєво знижувати рівень опору тертя. Як наслідок, основна маса досліджень у цій області сконцентрована саме на активних методах, що надають набагато більш ширший і різноманітний спектр інструментів управління рухом течій, що дозволяє суттєво впливати на параметри течії і забезпечувати необхідне зменшення поверхневого опору. Однак, треба відмітити, що попри очевидну необхідність створення конкретних працездатних технологій управління рухом і зменшення опору тертя, на сьогоднішній день прикладний аспект цих досліджень розвинений відносно слабо. Не в останню чергу це зумовлено складністю вирішення рівнянь гідрогазодинаміки в таких постановках, що могли б забезпечити негайну імплементацію розроблених технологій на практиці. Також треба відмітити, що майже усі методи управління течіями (як пасивні, так і активні) є досить обмеженими у своєму застосуванні — вони є ефективними лише у певному, як правило, невеликому, діапазоні фізичних параметрів (скажімо, швидкості зовнішнього потоку), тоді як за межами цього діапазону вони можуть взагалі не мати ніякого впливу на течію, або навіть призводити до негативних ефектів.

Отже, згідно до поданої вище інформації, є потреба в розробці і дослідженні технологій, що були б достатньо ефективними для практичних застосувань. Це і зумовило тему і напрямок досліджень цієї дипломної роботи. Ідеєю досліджуваного методу є вплив на турбулентну течію шляхом вдуву газу у примежовий шар, що потенційно може підвищити стійкість течії, а також значно зменшити опір тертя. В якості інструменту для проведення досліджень було обрано метод обчислювальної гідрогазодинаміки (англ. computational fluid dynamics), що передбачає

числовий розв'язок рівнянь руху рідини або газу, та надає необхідні засоби для розрахунку параметрів течії, тих її особливостей, що зумовлені використанням методів керування. Цей підхід має ряд переваг перед експериментальними дослідженнями, що потребують, як правило, досить коштовного експериментального обладнання, не дозволяють відтворити всі особливості досліджуваного руху, є досить обмеженими в напрямку зміни як фізичних так і геометричних параметрів течії. Числове ж моделювання позбавлене цих недоліків. Обчислювальна гідрогазодинаміка є сучасною областю знань, що швидко та бурхливо розвивається, у ній розроблена велика кількість підходів до розв'язку задач різного рівня складності. Будь-яке числове моделювання течій, зокрема турбулентних, базується на розв'язку системи диференціальних рівнянь в часткових похідних (ДРЧП), до якої входять: рівняння руху (рівняння збереження імпульсу), рівняння нерозривності (рівняння збереження маси), закон збереження енергії, рівняння стану (як правило, для врахування стисливості газів). Для розв'язку більш складних задач, що пов'язані з розрахунком течій, що виникають в складних промислових або енергетичних системах, базову систему рівнянь потрібно доповнювати моделями турбулентності, рівняннями дифузії (перенесення домішок), моделями горіння. Усі необхідні для розв'язку конкретної задачі рівняння об'єднуються в одну систему, яка і підлягає числовим розрахункам. Процес дослідження обумовлює потребу в використанні власного чи існуючого програмного забезпечення (ANSYS, FlowVision, OpenFoam тощо). Для числового дослідження розрахункова область дискретизується (ділиться на скінченну кількість вузлів) і всі величини, що визначають течію (швидкість, густина, тиск, температура), отримуються в цих вузлах. Відповідно до цього, диференціальні рівняння замінюють на їх скінченно-різницеві апроксимації, що зводить задачу розв'язку диференціальних рівнянь до більш простої задачі розв'язку системи алгебраїчних рівнянь. Аналізуючи отриманий числовий розв'язок, можна робити висновки щодо ефективності досліджуваного методи щодо

зменшення опору тертя та/або підвищення стійкості, порівнювати отримані залежності з експериментальними даними, тощо. Особливості числового розрахунку будуть висвітлюватись у відповідних розділах дипломної роботи.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТЕЧІЯМИ ЗА ДОМОГОЮ ВДУВУ ГАЗУ У ПРИМЕЖОВИЙ ШАР

1.1 Сучасний стан розробки методів керування течіями з використанням проникних стінок

Не зважаючи на досить велику кількість експериментальних даних, що наявні на сьогоднішній день, а також на численні результати в напрямку числового відтворення поведінки в'язких течій, все ще не існує єдиного загальноприйнятого методу відтворення фізичних явищ, що пов'язані з турбулентним обтіканням. В той самий час, в останні десятиріччя був досягнутий значний прогрес у розумінні механізмів утворення і поведінки таких течій, навіть у випадку розгляду задач з різного роду особливостями, що можуть так чи інакше впливати на розвиток течії. Ці особливості можуть включати в себе складну геометрію досліджуваної області, модифіковані межові умови, великі градієнти тиску, тощо. Треба відмітити, що більшість теоретичних, експериментальних та числових напрацювань у цій сфері, як правило, пов'язані з розглядом геометрій, в яких фігурують непроникні гладкі стінки, тоді як питання поведінки течій на проникних або пористих поверхнях опрацьовано набагато менш ретельно. Але, як виявляється, багато дієвих і ефективних технологій керування турбулентними течіями базуються саме на використанні проникних поверхонь, тож це питання підлягає більш глибокому дослідженню. Протягом останніх років були здійснені численні спроби щодо розробки працездатних моделей для адекватного опису пристінних течій на проникних поверхнях. Проте, наявні моделі знаходяться лише у початковій стадії розробки відносно того, якими вони мають бути для повноцінного опису пристінних течій на проникних поверхнях. Таким чином, це питання потребує більш детального розгляду, адже розробка і

дослідження реальних технологій неможлива без чіткого розуміння принципів поведінки турбулентних течій у відповідних ситуаціях.

1.2 Аналіз проблем, що постають при розробках методів контролю за допомогою вдуву у примежовий шар

Одним з активних методів управління течіями, що базується на використанні проникних поверхонь, є так званий вдув або інжекція. Суть цього методу полягає у вдуві газу у примежовий шар з незначною, по відношенню до швидкості зовнішнього потоку, швидкістю, під кутом або по нормалі до поверхні, через проникну поверхню обтічного тіла. Хоча метод важко назвати новим (перші дослідження у цьому напрямі були проведені у 50-х роках XX ст.), але за певних причин, мова про які піде нижче, інтенсивні дослідження почались лише наприкінці 90-х років.

Mickley та Davis [1], ймовірно, були першими, хто провів доволі детальні експериментальні дослідження щодо впливу інжекції на поведінку течії у примежовому шарі, причому у досить широких межах чисел Рейнольдса та інтенсивності вдуву. Хоча вони і показали, що зменшення опору тертя присутнє фактично для всього діапазону досліджуваних параметрів вдуву, проте це зменшення було досить невеликим (близько 20%) по відношенню до їх більш ранніх досліджень, що свідчить про невисоку якість цих експериментів. Через цей факт, ці дані досить важко назвати адекватними та вартими особливої уваги, хоча вони і показали, що метод інжекції дійсно є працездатним. Catherall в своїй роботі [2] представив числові та аналітичні результати аналізу впливу однорідного вдуву на рух нестисливого газу на плоскій проникній пластині. В цьому дослідженні був застосований новий підхід щодо аналізу примежового шару, що дозволило прийти до висновку, що інжекція знижує рівень опору тертя, причому це явище спостерігалось аж до моменту відриву течії. Відрив течії відбувався тим швидше, чим більшим були витрати газу на вдув. Grin [3]

продемонстрував, що вдув газу помітно знижує опір тертя лише безпосередньо на поверхні з вдувом. За цими областями, ефект зниження тертя спадає експоненційно. Таким чином, був отриманий висновок, що для забезпечення максимально ефективного зниження опору, необхідно розповсюджувати область вдуву на якомога більшу площу обтікання. Grin стверджує, що для мінімізації затрат енергії, що необхідні для вдуву, швидкість повітря, що вдувається, має сягати близько 6% від швидкості зовнішнього потоку. Це значення, з огляду на інші дослідження у цьому напрямку, виглядає несподівано високим. Simpson та інші в [4, 5] дослідили ефекти від однорідного вдуву та відсмоктування для течії з відсутнім градієнтом тиску. Проведений ними аналіз результатів показує, що вдув знижує коефіцієнт тертя, тоді як відсмоктування веде до його підвищення. На відміну від [4, 5] Julien [6] проводив дослідження, що були сфокусовані на вивченні течій з градієнтом тиску. В результаті дослідження було встановлено, що коефіцієнт тертя в течіях з градієнтом тиску був більший, ніж у випадку нульового градієнту. Andersen [7] у результаті експериментів підтвердив результати [4, 5] щодо впливу вдуву та відсмоктування на коефіцієнт тертя. Kays та Moffat [8] провели аналіз робіт [4, 5, 7] та знайшли великі відмінності між ними. Вони пояснили це тим, що автори у цих роботах користувалися зовсім різними інструментами для проведення досліджень (трубка Піто та термоанемометрична апаратура, відповідно), що призвело до похибок різної природи. Проте, так чи інакше, більшість авторів схильні вважати, що вдув газу у примежовий шар, безумовно, знижує поверхневий опір. В [9] було показано, що проникна поверхня, через яку не здійснюється вдув, призводить до невеликого збільшення опору тертя по відношенню до гладкої поверхні. Опір починає падати з ростом швидкості вдуву. Вілкінсон в [10] в ході експериментів підтвердив факт збільшення опору тертя на проникній пластині по відношенню до гідравлічно гладкої. Також було зроблено висновок, що при використанні пористих матеріалів у якості проникних поверхонь, важливою є якість створених матеріалів та

спосіб їх утворення. З розвитком технологій для синтезу матеріалів (лазери, електронні пучки, тощо) була отримана можливість створювати проникні поверхні, в яких діаметр отворів не перевищував би декілька мікрон, та які мали б високу якість поверхні. Це було поштовхом до здійснення нових експериментів у напрямку керування течіями на проникних поверхнях, зокрема, за допомогою інжекції.

Хоча потенціал вдуву щодо зменшення опору тертя і, таким чином, економії енергії, виглядає досить високим, проте при розробці відповідної технології потрібно обов'язково враховувати ще й енергетичні витрати на сам вдув (які можуть, теоретично, перевищувати виграш, отриманий за рахунок зменшення опору). Для отримання значного зниження коефіцієнту тертя майже у всіх вищезгаданих роботах використовувалися досить великі отвори, та, відповідно, відносно великі швидкості вдуву (до 6% від швидкості зовнішнього потоку у роботі [3]. Постійне забезпечення такого рівня витрати повітря є вкрай енергозатратним, що ставить під сумнів можливість розробки ефективної технології у цьому напрямі. Це, фактично, було причиною значної затримки та гальмування досліджень на ранніх етапах (50-60-ті роки) розвитку цього методу, адже більшість дослідників вважала, що технологія, що базується на концепції вдуву, буде економічно недоцільною.

1.3 Концепція методу мікровидуву

Однак, в 90-ті роки, Хванг [11] з NASA, аналізуючи роботи попередників у напрямку впливу на течію за допомогою інжекції газу у примежовий шар, прийшов до висновку, що використання матеріалів, які були застосовані для попередніх досліджень, не є надто ефективним, так як навіть у відсутності вдуву вони призводять до збільшення коефіцієнта тертя по відношенню до гладких поверхонь, що не може не відбиватись на величині необхідної витрати повітря для значного зменшення опору. Відповідно до цього, Хванг запропонував [12, 13] використання так званого

методу мікро-вдуву (англ. micro-blowing technology), що базувався на використанні сучасних на той час проникних матеріалів. Приставка «мікро» у цьому терміні означає, що розмір отворів у матеріалах, що використовуються в якості проникних стінок, має бути значно менший, ніж товщина примежового шару течії, що обтікає цю поверхню, а також те, що швидкість вдуву має бути набагато меншою за швидкість зовнішнього потоку. Метод виявився вкрай ефективним, незважаючи на відносно невелику долю інжектowanego повітря у примежовому шарі. У роботі [14] представлений узагальнені результати робіт Хванга та його співавторів. Дослідження проводились на п'яти різних пластинах, які мали різну товщину (від 0.152 до 1.020 мм), проникність (відношення площі отворів до загальної площі поверхні) від 21% до 50%, та розмір отворів від 0.06 до 0.381 мм у діаметрі. Дослідження проводились у аерогідродинамічній трубі з числами Маха від 0.3 до 0.7. Інтенсивність вдуву варіювалась від 0 до $0.205 \text{ кг/м}^2/\text{с}$. Було показано, що найкращі результати щодо зниження опору тертя досягаються при розмірі отворів у 0.17 мм, товщині стінки у 1 мм, та проникності у 17%. У роботі [15] експерименти проводились для надзвукових течій з числом Маха, що дорівнювало 1.9. При максимальній швидкості вдуву було досягнуто зниження коефіцієнту тертя у 90%. На Рис 1.1 продемонстровані результати на семи різних пластинах, в яких відрізнялись розміри отворів, товщина, матеріал, напрям вдуву і т.д. Концепція мікрОВИДУВУ була успішно використана для керування потоком на викривеній поверхні [16]. В деяких ділянках поверхні зменшення опору тертя сягало 50%, причому при відносно невеликих параметрах інжекції. Наявні також інші приклади реалізації мікрОВИДУВУ на викривлених поверхнях.

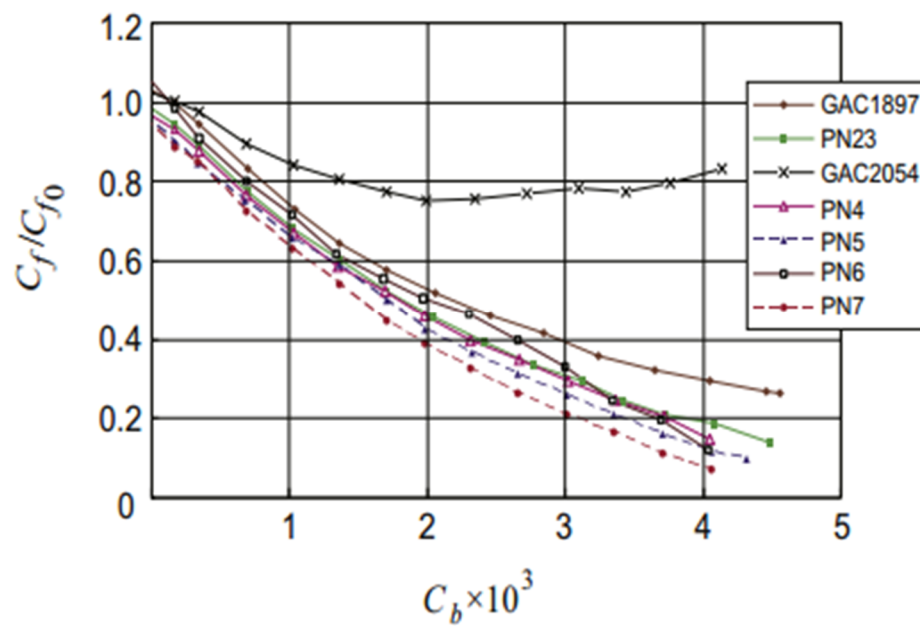


Рис 1.3.1 — Залежність відношення коефіцієнту тертя з інжекцією до початкового коефіцієнту тертя (без інжекції) від коефіцієнту вдуву C_b [15]

Ця технологія була використана у [17] для дослідження можливості зменшення опору тертя на симетричному крилі для дозвукової течії. У [18] Parkhe та іншими представлені експериментальні і числові результати дослідження щодо можливостей керування пристінним рухом за допомогою інжекції при швидкостях зовнішнього потоку, що сягали майже 100 м/с. Моделювання течії було проведено для пластини з трьома рядами отворів, що забезпечило рівень проникності в 50%. Рівень пониження опору тертя сягав 45% для випадку швидкості зовнішнього потоку в 30 м/с.

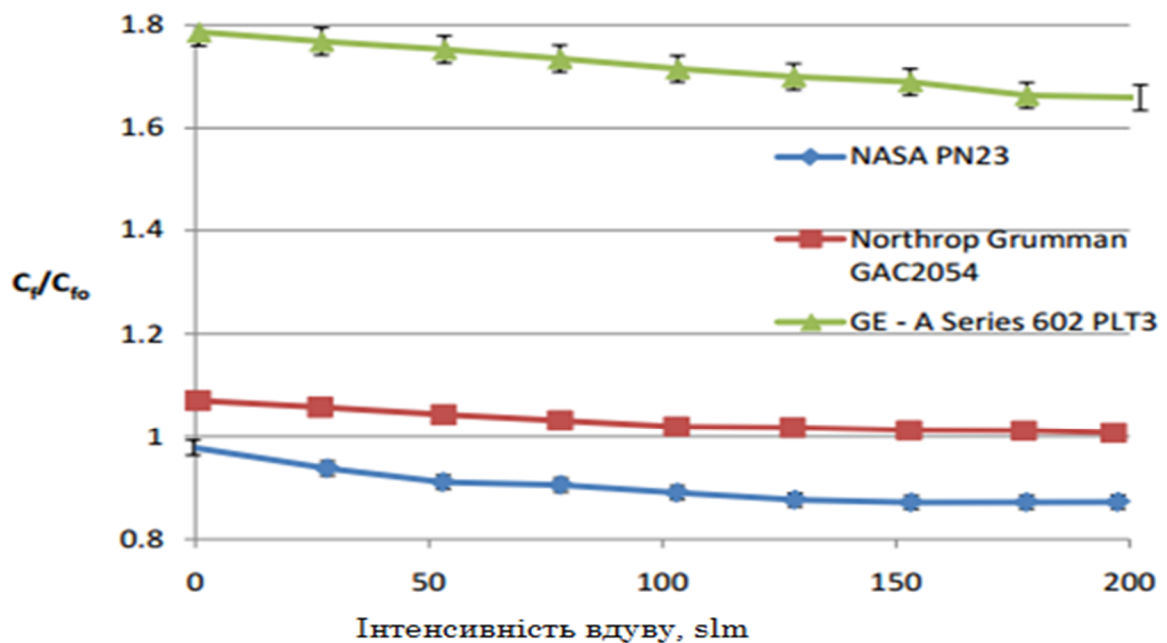


Рис 1.3.2 — Залежність відношення коефіцієнту тертя з інжекцією до початкового коефіцієнту тертя (на плоскій пластині) від інтенсивності вдуву у літрах за хвилину (slm) [17]

Як можна бачити, далеко не будь-які проникні поверхні здатні покращити властивості обтікання та зменшити опір тертя — у деяких зразків початковий коефіцієнт опору тертя (без вдуву) може майже в два рази перевищувати коефіцієнт опору на плоскій пластині. Це підтверджує ідею того, що якість і тип проникної поверхні може кардинально впливати на параметри пристінної течії. З Рис 2. чітко видно, що лише один зразок (NASA PN23) у дослідях Parkhe дав початкове значення коефіцієнту тертя (без вдуву), що було досить близьке до коефіцієнту тертя на непроникній пластині. Проте, тенденція до зниження опору тертя з ростом інтенсивності вдуву присутня для всіх типів поверхонь, що подані у роботі [18].

В своїй роботі [19] Lin та Hwang використали методи обчислювальної гідрогазодинаміки задля виявлення особливостей поведінки течії у околі отворів, через які здійснюється інжекція газу. Окремо були досліджені

випадки обтікання проникної пластини (з отворами) без вдуву ($C_b = 0$), та з поступовим нарощуванням швидкості газу, що інжектуюється ($C_b > 0$). Моделювання течії було виконане для стаціонарного випадку.

Особливості обтікання при відсутності інжекції:

- Течія на пластині заглиблюється в отвори, при цьому глибина заглиблення може сягати $2d$, де d — діаметр отвору;
- У заглибленні формуються складні вихрові структури, що можуть призвести до нестійкості течії. Моделювання течії при появі такої нестійкості неможливе у стаціонарній постановці;

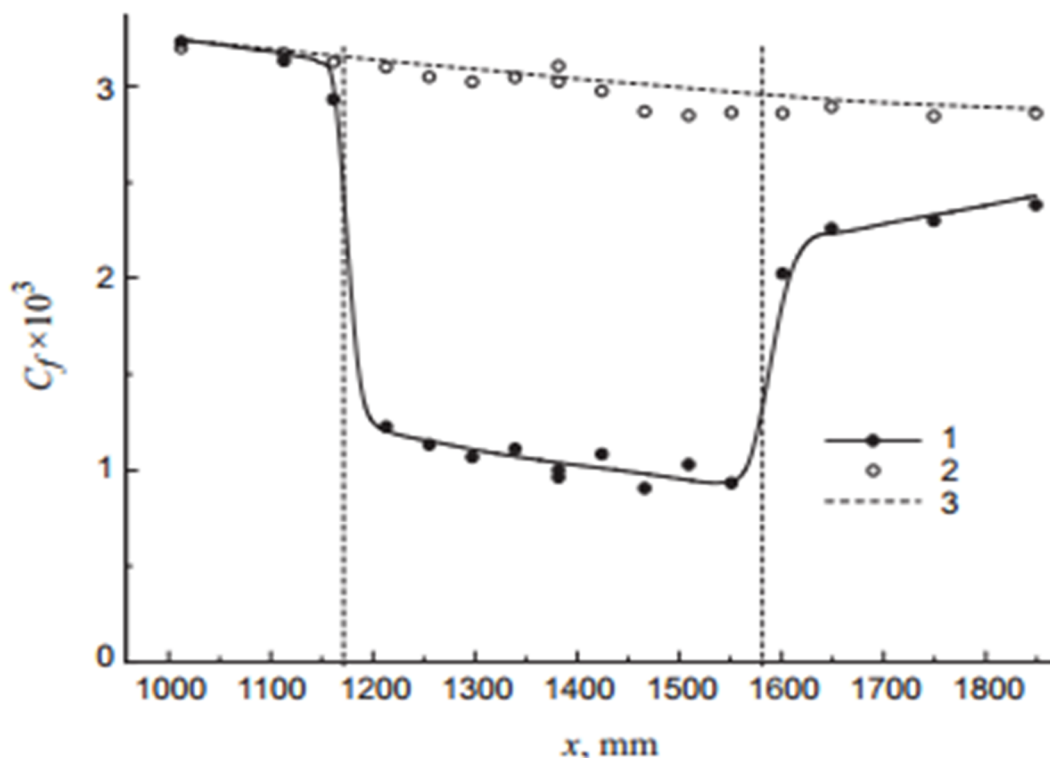
Особливості обтікання при наявності інжекції:

- При низьких коефіцієнтах вдуву C_b (наприклад, $C_b = 0.0015$), характер обтікання в цілому не відрізняється від характеру обтікання без вдуву;
- З ростом C_b глибина проникнення зовнішньої течії у отвори поступово зменшується і при певних значеннях C_b зовнішня течія зовсім перестає заглиблюватись у отвори.

Як показує це дослідження, а також деякі інші [20, 14], числове моделювання у багатьох випадках здатне надати досить важливу і детальну інформацію щодо особливостей поведінки течій в околі отворів, з яких здійснюється видув. Переваги числового моделювання особливо проявляються у можливості ґрунтовно дослідити взаємодію вихрових структур, що утворюються у утворах між собою та з примежовим шаром, детально зрозуміти механізми утворення нестійкостей та особливостей в досліджуваних течії.

В останні роки проблемами оптимізації параметрів мікровдуву займається Корнілов [21-23], в роботах якого представлені численні експериментальні результати щодо впливу інжекції на примежовий шар при досить широкому діапазоні параметрів вдуву та течії. Одним з найбільш

показових результатів є експериментальне зображення дієвості методу мікровдуву (Рис 3). Даний експеримент проводився на пластині, у якої частина поверхні (на графіку відповідна ділянка виділена пунктирною лінією) була зроблена проникною. Значення C_b для цієї ділянки становило 0.00276, тоді як швидкість зовнішнього потоку становила 21 м/с. Тим не менш, незважаючи на досить невисоку, по відношенню до швидкості зовнішнього потоку, швидкість інжекції, було досягнуто значне зменшення коефіцієнта тертя на відповідній ділянці. Також, відповідно до [3], можна чітко бачити майже помню відсутність ефекту зменшення опору тертя до початку області з проникною поверхнею, а також різке зниження ефекту після закінчення цієї області. Цей результат, по великому рахунку, не є новим, проте він отриманий на досить сучасному експериментальному обладнанні, що дає підставу орієнтуватись саме на це дослідження при числовому моделюванні.



Експеримент: $C_b = 0.00276$ (1), $C_b = 0$ (2), та результат числового моделювання (3).

Рис 1.3.3 — Залежність коефіцієнту тертя вздовж пластини [21].

Хоча метод впливу на течію за допомогою вдуву, зокрема, мікровдуву — давно досліджувана і відома проблема, є чітке розуміння загальних особливостей впливу інжекції на течію, деякі питання щодо особливостей використання цієї технології ще не отримали остаточної відповіді.

1.4 Висновки з розділу 1. Постанова мети дипломної роботи.

1. Висвітлені основні проблеми, що постають у задачах керування турбулентним рухом, наведені основні методи щодо керування пристінними течіями.

2. Описані основні результати попередників у напрямку дослідження методу мікровидуву, якому присвячена дана дипломна робота.

3. Зроблені висновки щодо невирішених питань щодо використання цього методу керування, а саме:

1.Немає чіткого розуміння впливу розміру отворів, їх розташування, глибини на параметри течії.

2.Більшість досліджень (як експериментальних, так і числових) проводилася для усталених течій, тоді як ефекти, що пов'язані з зміною параметрів течії з вдувом у часі, досліджені досить слабо.

3.Не вирішена проблема практичного застосування методу інжекції. Хоча потенціал цієї технології важко переоцінити (в окремих випадках падіння опору тертя сягає 90%), все ж практичні задачі потребують принципово інших підходів щодо аналізу можливостей мікровдуву. Зокрема, слабо дослідженою є

проблема взаємодії інжектованого повітря з
великомасштабними вихровими структурами.

Постановка мети дипломної роботи:

1. Відтворення методами обчислювальної гідрогазодинаміки особливостей течій при використанні інжекції, досягнення точності розрахунків, яка б забезпечувала близький до експериментальних даних результат.
2. Розробка моделі турбулентності, яка могла б відтворювати особливості течій з вдувом у широкому діапазоні параметрів.
3. Дослідження можливостей впливу на охолодження енергетичного устаткування методами інжекції у примежовий шар.

РОЗДІЛ 2

ОГЛЯД СПОСОБІВ МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ

2.1 Опис загальних підходів щодо математичного опису течій

Окремі математичні результати, що описують ті чи інші властивості рідин та газів були отримані ще за часів Архімеда, тоді як спроби математично сформулювати загальні закони руху течій були здійснені тільки у 17-18 ст., що було пов'язано з розвитком математичного аналізу та теорії диференціальних рівнянь. Зокрема, можна відмітити прізвища Бернуллі, Ейлера, Лагранжа, Коші, Нав'є, Стокса. Завдяки роботам цих вчених, а також багатьох інших, що не згадуються тут через численну їх кількість, у 18-19 ст. були розроблені підходи щодо математичного опису стисливих в'язких течій. Результатом стала система диференціальних рівнянь у часткових похідних, що були отримані з умов збереження певних фізичних величин (імпульса, маси, енергії). Отримана система рівнянь виявилась спроможною описувати навіть доволі складні течії, однак, швидко стало зрозуміло, що аналітичний розв'язок цієї системи не є можливим у більшості випадків окрім деяких ідеалізованих (ламінальний рух з простою геометрією області). Цей факт обумовив ряд досліджень щодо спрощення вихідної системи рівнянь, де визначальну роль зіграли роботи Людвіга Прандтля, що ввів поняття примежового шару та довів працездатність своєї моделі.

Сучасна форма рівнянь, що описують рух в'язкої рідини, не сильно змінилася з кінця 19-го ст., та в одному з загальних представлень має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} = -\vec{\nabla}p + \vec{\nabla} \cdot (\rho v \vec{\nabla} \vec{v}) + \rho \vec{f}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = f_\rho, \\ \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})T = \vec{\nabla} \cdot (\rho D \vec{\nabla} T) + f_T, \end{cases} \quad (2.1.1)$$

де $\vec{v}$ — швидкість течії, p — її тиск, ρ — густина, T — температура, v — в'язкість рідини чи газу, D — коефіцієнт теплопровідності, $\vec{f}$, f_ρ , f_T — джерельні члени, що є вектором зовнішніх масових сил з розрахунку на одиницю маси, джерелом маси та джерелом теплової енергії, відповідно. $\vec{\nabla}$ — оператор “набла”, t — час.

Така система може бути отримана з більш загальної системи рівнянь, де присутній тензор напружень, припускаючи лінійність тензора напружень та тензора швидкості деформації (закон Ньютона). Вона називається системою рівнянь в'язкої стисливої рідини або системою рівнянь Нав'є-Стокса (від прізвищ вчених, якими вона була вперше отримана). У такій системі рівнянь припускається фізичних параметрів течії (густини, в'язкості, теплопровідності) від просторових координат, що відображається тим, що ці параметри знаходяться під знаком диференціальних операторів. Ці рівняння являють собою закони збереження імпульсу, маси та енергії, відповідно. Відповідно до формулювання, така система спроможна описувати рух рідині та теплообмін у ній. Для врахування інших фізичних процесів (хімічні реакції, дифузія, магнітні явища, тощо) потрібно доповнювати систему відповідними рівняннями. Система спрощується до системи двох рівнянь (рівняння збереження імпульсу та рівняння збереження маси, тобто рівняння нерозривності) у випадку сталої температури у всій досліджуваній області:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \vec{\nabla})\vec{v} = -\vec{\nabla}p + \vec{\nabla} \cdot (\rho \nu \vec{\nabla} \vec{v}) + \rho \vec{f} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = f_\rho \end{cases} \quad (2.1.2)$$

Якщо густина рідини не приймається сталою, то систему (2.1.1) або (2.1.2) доповнюють рівнянням стану $\rho = \rho(p, T)$ або $\rho = \rho(p)$, наприклад, рівнянням стану ідеального газу, або рівнянням Ван дер Ваальса. Рідини рідко вважаються стисливими, тож при описі руху рідин, зазвичай, рівняння стану не є необхідним. Надалі, якщо окремо не вказується інакшого, густина приймається сталою величиною, тобто використовується наближення нестисливої рідини.

2.2 Методи моделювання турбулентних течій

Як вже відмічалось вище, точний розв'язок цієї системи може бути отриманий лише у найбільш простих варіаціях, тож не дивно, що на сьогоднішній день розроблені чисельні методики розв'язку, що використовують числове моделювання.

Окремо потрібно вказати, що така система здатна описувати як ламінарний, так і турбулентний режими рухів, проте для відтворення особливостей турбулентної течії має бути використана дуже дрібна розрахункова сітка, що створює проблеми з використанням системи в вихідному варіанті для вирішення промислових та дослідницьких задач, через обмеженість обчислювальних ресурсів. Відповідно до цього були розроблені підходи які дозволяють знизити вимоги до розрахункової сітки, при цьому лише частково знижуючи точність відтворення особливостей течії.

Загалом виділяють три групи методів, що дозволяють відтворювати особливості турбулентних течій: **пряме числове моделювання** (direct

numerical simulation — DNS), **метод осереднення за Рейнольдсом** (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations — RANS) та **метод моделювання великих вихорів** (Large eddy simulation — LES).

Найбільш широковживаним на сьогоднішній день є метод RANS, основи якого були закладені ще у кінці 19-го сторіччя Рейнольдсом. Відомо, що турбулентний рух суттєво відрізняється від ламінарного наявністю пульсацій — складових фізичних полів, що мають стохастичний характер. Гіпотеза Рейнольдса полягала в тому, що усі шукані фізичні поля (швидкість, тиск, температуру) можна подати у вигляді суми регулярної та пульсаційної компонент, наприклад, для поля тиску $p = \bar{p} + p'$. Середнє значення пульсаційної компоненти p' взятє по періоду пульсацій, вважається рівним нулю. Після підстановки, наприклад, у систему (2.1.2), та проведення осереднення за періодом пульсацій, отримується наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\vec{\nabla} \bar{p} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v} \vec{v} + \sigma) + \rho \vec{f}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = f_\rho, \end{cases} \quad (2.2.3)$$

де σ являє собою матрицю коваріацій пульсаційних компонент швидкості: $\sigma_{ij} = -\rho \overline{v'_i v'_j}$, яка виникає через нелінійність рівняння збереження імпульсу внаслідок усереднення. Похідна за часом від регулярної компоненти швидкості залишається, тому що усереднення проводилось за часом, що є характерним для пульсаційних компонент. Питання щодо того, як правильно враховувати наявність матриці коваріацій при числовому моделюванні, залишається відкритим питанням на сьогоднішній день. Проте, доволі широковживаною є гіпотеза Бусінеска про лінійну залежність компонент цієї матриці від тензора напружень. Для нестислової рідини математичне формулювання цієї гіпотези приймає вигляд:

$$\frac{\partial \overline{v'_i v'_j}}{\partial x_j} = \nu_t \frac{\partial^2 \bar{v}_i}{\partial x_i^2} \quad (2.2.4)$$

Це дозволяє вирішувати систему рівнянь (2.2.3), не роблячи яких-небудь додаткових припущень про особливості турбулентного руху, за рахунок введення так званої *турбулентної в'язкості* ν_t . В'язкість тепер представляє собою суму молекулярної в'язкості ν та турбулентної в'язкості ν_t . Залишається відкритим питання про те, що представляє собою турбулентна в'язкість ν_t . Численні експериментальні дані показують, що вона не є сталою величиною, а може змінюватись як в просторі, так і в часі. Залежності, що представляють собою залежності ν_t від координат та часу отримали назву *моделей турбулентності*. На сьогоднішній день створена величезна кількість моделей, що є результатом аналізу експериментальних даних та певних аналітичних міркувань. Ці моделі різняться за своєю структурою і складністю від алгебраїчних, які задають турбулентну в'язкість одним алгебраїчним рівнянням, до диференціальних, які по складності можуть бути однаковими, а іноді навіть більш складними за систему вихідних рівнянь руху рідини чи газу. Оптимальними вважаються моделі, що дають можливість відтворювати особливості турбулентних течій у досить широких діапазонах фізичних та геометричних параметрів течії, при цьому не призводячи до надмірного ускладнення системи рівнянь. Такими моделями часто є алгебраїчні, які, при невисокій їх складності, здатні адекватно відтворювати турбулентні ефекти.

Метод прямого числового моделювання не передбачає ніяких перетворень вихідних рівнянь та вважається найбільш перспективним методом моделювання турбулентних течій. Вихідні рівняння розв'язуються у первинному вигляді, що дозволяє відтворити особливості турбулентних ефектів у повному обсязі. Єдиною причиною, чому цей метод не є широкоживаним на сьогоднішній день є обмеженість обчислювальних

потужностей. За оцінками, для коректного використання DNS потрібна кількість комірок сітки має зростати як $Re^{9/4}$, що робить цей метод дуже затратним з точки зору використання потужностей обчислювальної техніки. Однак, вже сьогодні DNS може бути використаний у випадках, коли точність обрахунків є критичною (наприклад, коли немає можливості здійснити експеримент) або лише в тих областях розрахункової області, де потрібна високий рівень точності відтворення особливостей течії. Інший напрямок використання прямого числового моделювання — перевірка та уточнення обрахунків, що були отримані за допомогою методів RANS та LES. Цей метод стає більш доступним з кожним роком, адже обчислювальні потужності постійно ростуть. Також, в останні роки відбуваються активні розробки у напрямку паралельних обчислень, що зумовлені потребою корпорацій та державних установ в аналізі величезних масивів даних. Ці технології можуть бути успішно використані і для DNS.

Метод моделювання великих вихорів є компромісним по відношенню до методів RANS та DNS. LES є одночасно більш економічним у порівнянні з DNS та більш точним у порівнянні з RANS. Якщо для DNS кількість необхідних комірок сітки зростає як $Re^{9/4}$, то для LES це вже $Re^{9/8}$. Попри більш грубу сітку, LES спроможний відтворювати і досить дрібні особливості турбулентного руху, на що не спроможний метод RANS. Метод моделювання великих вихорів базується на гіпотезі, що великі вихори при утворенні турбулентності значним чином залежать від геометрії, тоді як дрібномасштабні мають зазвичай доволі дрібномасштабну структуру, що дозволяє враховувати їх вклад окремо, не прив'язуючись до особливостей досліджуваної течії. Відповідно до ідеології LES, над полями досліджуваних фізичних величин необхідно провести операцію низькочастотної просторової фільтрації, що дозволить прибрати з розгляду дрібномасштабні вихори:

$$\bar{\varphi}(x, y, z, t) = \int_{\Delta V} G(x - \xi, y - \eta, z - \zeta) \varphi(\xi, \eta, \zeta, t) dV. \quad (2.2.5)$$

де $\bar{\varphi}$ — відфільтроване поле, φ — вихідне поле, G — функція фільтра. Фільтрація проводиться по об'єму досліджуваної області. Після проведення такої фільтрації можна вирішувати вихідну систему рівнянь у первинному вигляді, окремо враховуючи вплив дрібних вихорів, моделювання яких є значно простішою задачею, ніж у методі RANS, де моделювати доводиться одразу весь спектр вихорів.

Існують також інші методи, що являють собою комбінації згаданих вище методів, або просто усічені версії окремих методів. До методів, що представляють собою синтез двох методів, можна віднести метод від'єднання вихорів (Detached eddy simulation — DES). У цьому методі крупномасштабні вихорі моделюються з використанням LES, тоді як дрібномасштабні — за допомогою метода RANS.

2.3 Порівняння методів моделювання турбулентних течій

На сьогодні, найшироковживанішим є метод RANS, але все більше досліджень проводяться за допомогою метода LES. Для широкого використання прямого числового моделювання потрібні значно більші обчислювальні потужності і відповідні технології паралелізації обчислювальних процесів.

Спаларт [24] приводить таблицю, що демонструє можливості щодо практичного застосування різних методів моделювання турбулентних течій, а також приводить певні прогнози щодо можливості використання окремих технологій у майбутньому:

Таблиця 2.3.1

Перспективи практичного застосування різних методів числового моделювання турбулентних течій [24].

Метод	Необхідна кількість вузлів сітки	Необхідна кількість кроків за часом	Рік, в якому можливе практичне застосування методу
2D URANS	10^5	$10^{3.5}$	1980
3D RANS	10^7	10^3	1985
3D URANS	10^7	$10^{3.5}$	1995
DES	10^8	10^4	2000
LES	$10^{11.5}$	$10^{6.7}$	2045
DNS	10^{16}	$10^{7.7}$	2080

Таблиця 2.3.1 демонструє той факт, що методи LES та DNS ще будуть недоцільними для використання в найближчі 30-60 років, тож на сьогоднішній день все ще є потреба у розробці моделей для RANS та DES.

2.4 Висновки з розділу 2.

1. Наведено систему рівнянь, що описує рух стисливої в'язкої рідини або газу. Висвітлені основні проблеми, які виникають при розв'язку цих рівнянь.

2. Наведені основні підходи щодо числового моделювання турбулентних течій. А саме, представлені методи RANS, DNS та LES. Зроблений висновок, що для методу RANS часто є сенс використовувати алгебраїчні моделі, що не є надто складними по своїй

структурі, але при цьому здатні коректно відображувати особливості турбулентного руху.

3. Приведена таблиця, яка демонструє, що масове використання методів LES та DNS ще не буде можливим близько 30-60 років, що робить розробку моделей для методу RANS актуальною проблемою.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ОБТІКАННЯ ПЛОСКОЇ ПЛАСТИНИ ЗА УМОВ НАЯВНОСТІ ДІЛЯНКИ З МІКРОВИДУВОМ

3.1 Постановка задачі

Виходячи з задач дипломної роботи було прийнято рішення перевірити спроможність методу мікрОВИДУВУ щодо зниження локального опору тертя при обтіканні пластини потоком повітря. Вибір досліджуваної області та параметрів течії здебільшого надиктований наявними експериментами з використанням технології мікрОВИДУВУ [21]. Існуючі експериментальні дані дозволяють перевірити спроможність використаної математичної моделі відтворювати реальний характер фізичних процесів.

Для числового дослідження було вирішено використати метод RANS з алгебраїчною моделлю турбулентності. Для реалізації було прийнято рішення відмовитись від існуючих програмних пакетів на користь створення власного програмного забезпечення на мові програмування C++.

У експериментах [21] пластина, на якій наявна ділянка з мікрОВИДУВОМ, обтікається зовнішнім потоком повітря. У експериментах досліджуються залежності коефіцієнту поверхневого опору тертя від поздовжньої координати x , а також залежність коефіцієнту опору тертя від швидкості, з якою здійснюється видув. Ці залежності є найбільш цікавими з точки зору практичного застосування методу, тож їх потрібно намагатись відтворити у першу чергу. Оскільки геометрія області є такою, що ніякої зміни параметрів видуву у одному з напрямків немає, то задачу можна розглядати у двовимірній постановці. А саме, геометрія області задається наступним чином: довжина пластини приймається рівною 2.0 м, висота області — 0.1 м, ділянка з видувом міститься у проміжку від 1.17 до 1.58 м. Оскільки щільність отворів, через які здійснюється видув, є доволі високою, то можна

замінити процедуру моделювання окремих отворів на межову умову, де нормальна компонента швидкості приймається рівною швидкості здійснюваного видуву. Як виявляється, таке припущення є доволі справедливим і не призводить до значних похибок, тоді як задача спрощується досить суттєво. Швидкість зовнішнього потоку V_∞ приймається рівною 21 м/с згідно з [21]. Той факт, що течія в основному розвивається тільки вздовж повздовжньої координати, дозволяє використати наближення примежового шару, що також сприяє спрощенню задачі. Система рівнянь (2.3), що підлягає розв'язанню, зводиться до наступної:

$$\begin{cases} V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial V_x}{\partial y} \right), \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \end{cases}, \quad (3.1.1)$$

де V_x та V_y — повздовжна та поперечна компоненти швидкості відповідно, $D_{eff} = \nu + \nu_t$, ν — молекулярна в'язкість, що при моделюванні приймалася рівною $1.56 \cdot 10^{-5}$ м²/с, ν_t — турбулентна в'язкість, про моделювання якої мова піде нижче. Доданок з градієнтом тиску відсутній через те, що при обтіканні пластини наявні градієнти тиску нехтовно малі.

Граничні умови задаються наступним чином: для вхідної межі $V_x = V_\infty$ та $V_y = 0$, для верхньої межі $V_x = V_\infty$ та $V_y = 0$, для нижньої межі $V_x = 0$ та $V_y = 0$ для непроникних ділянок і $V_x = 0$ та $V_y = V_{blow}$ для проникних ділянок.

Оскільки було вирішено скористатися числовими методами, то для розв'язку рівнянь (3.1.1) необхідно було дискретизувати розрахункову область, а потім, використавши кінцево-різницеві апроксимації присутніх у рівняннях похідних, записати систему рівнянь у вигляді апроксимаційної схеми. Дискретизація області вздовж координати x була прийнята однорідною з кроком $\Delta x = 0.0011$ м, тобто всього було використано 1800

точок, вздовж координати y дискретизація відбувалася зі згущенням при наближенні до обтічної поверхні. Найменший крок Δy (найближший до поверхні) брався рівним $1.66 \cdot 10^{-11}$ м, а кожен наступний брався більшим за попередній у 1.01 разів (геометрична прогресія). Саме таке розбиття у напрямку координати y було обумовлено різкою зміною характеру повздовжньої компоненти швидкості коло обтічною поверхні, і, відповідно, потребою у високій точності обрахунків саме у цій області. У якості апроксимаційної схеми для першого рівняння з системи (3.1.1) була вибрана наступна:

$$F_{x_j} \frac{V_{x_{i,j}} - V_{x_{i-1,j}}}{\Delta x} + F_{y_j} \frac{V_{x_{i,j+1}} - V_{x_{i,j-1}}}{2\Delta y} =$$

$$= \left(D_{eff_{i,j+\frac{1}{2}}} \frac{V_{x_{i,j+1}} - V_{x_{i,j}}}{\Delta y^2} - D_{eff_{i,j+\frac{1}{2}}} \frac{V_{x_{i,j}} - V_{x_{i,j-1}}}{\Delta y^2} \right) \quad (3.1.2)$$

Для другого:

$$\frac{V_{x_{i,j}} - V_{x_{i-1,j}}}{\Delta x} + \frac{V_{y_{i,j}} - V_{y_{i,j-1}}}{\Delta y} = 0 \quad (3.1.3)$$

Індекс i у цих рівняннях відповідає повздовжній координаті, індекс j — поперечній. Напівцілі індекси типу $j + \frac{1}{2}$ означають значення величини, взятої як середнє значення між j -м та $j+1$ -м вузлами. F_{x_j} означає тут $V_{x_{i-1,j}}$, F_{y_j} — $V_{y_{i-1,j}}$.

Для розв'язку цієї, вже алгебраїчної, системи рівнянь, було вирішено скористатись методом Томпсона (англ. термін Thomas algorithm). Використання цього алгоритму можливо через те, що матриця, що утворює систему рівнянь, має тридіагональний вигляд, тобто такий, що ненульовими елементами в ній є тільки діагональні, та ті, що знаходяться під діагоналлю

та над нею. Цей алгоритм має значну перевагу над більш загальними методами розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Для тридіагональних систем його алгоритмічна складність є $O(n)$, тоді як, наприклад, метод Гауса має алгоритмічну складність $O(n^3)$. Відповідно до цього методу, рівняння (3.2) треба подати у вигляді $A_j V_{x_{i,j-1}} + B_j V_{x_{i,j}} + C_j V_{x_{i,j+1}} = D_j$, де коефіцієнти A_j , B_j , C_j та D_j відшукуються з рівняння (3.2) приведенням подібних доданків. Наступним кроком є представлення $V_{x_{i,j}}$ у вигляді $P_j V_{x_{i,j+1}} + Q_j$, що дозволяє поступово знаходити поле швидкості, рухаючись вздовж поперечної координати спочатку в прямому, а потім у зворотньому напрямку. Таким чином, рухаючись вздовж повздовжньої координати x , знаходячи розподіл швидкості у кожному перерізі, знаходиться поле швидкості у всьому просторі. Поле поперечної швидкості V_y знаходиться з дискретизованого рівняння неперервності (3.1.3).

3.2 Модель турбулентності

Як вже було вказано вище, було вирішено використати алгебраїчну модель турбулентності. Алгебраїчні моделі є значно більш простими по відношенню до диференціальних, але водночас є досить універсальними для опису течій з не дуже складними формами обтічних поверхонь, зокрема у двовимірних варіантах. Модель, яку було вирішено застосувати, є двошаровою, тобто існує дві ділянки у пристінній області, у кожній з яких вираз для v_t має свою структуру. Математичне формулювання цієї моделі подається наступним чином:

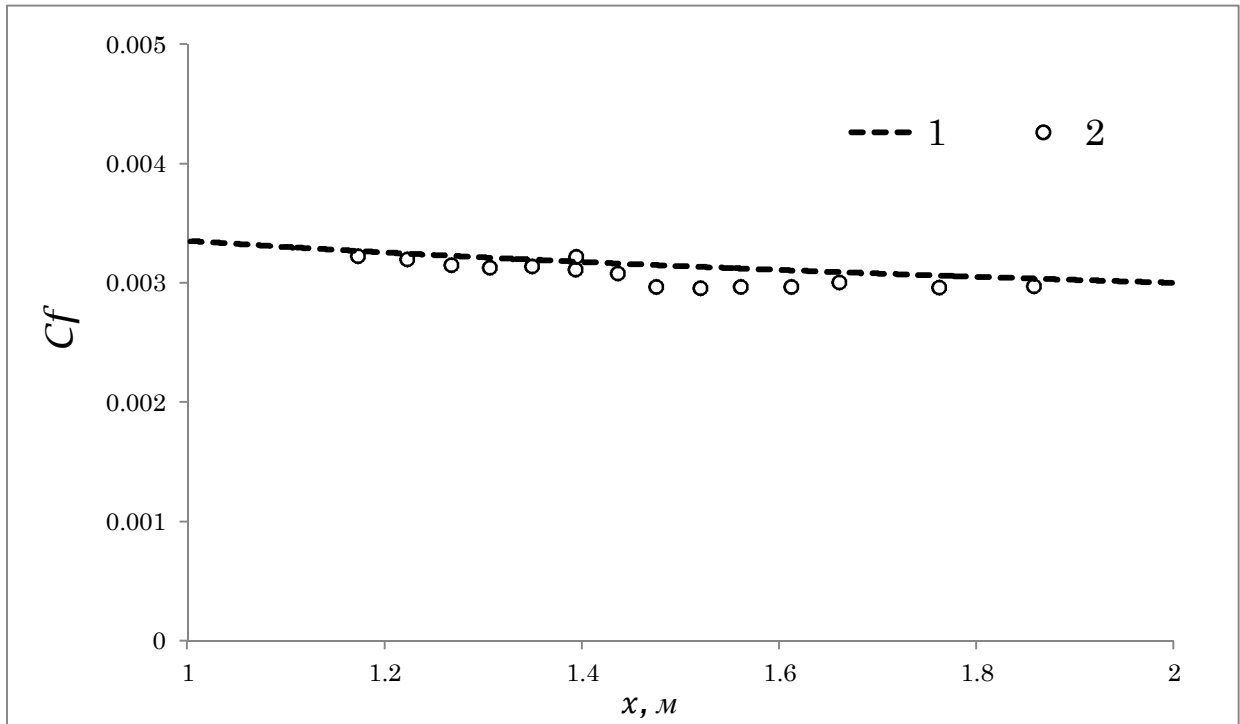
$$v_t = \begin{cases} v_{t \text{ inner}}, & y < y^* \\ v_{t \text{ outer}}, & y > y^* \end{cases}, \quad (3.2.4)$$

$$v_{turb \text{ inner}} = \ell^2 \frac{\partial v_x}{\partial y}, \quad (3.2.5)$$

$$v_{turb\ outer} = \alpha \gamma \delta^* V_\infty, \quad (3.2.6)$$

де $v_{t\ inner}$ — турбулентна в'язкість для внутрішньої області, $v_{t\ outer}$ — для зовнішньої, $y^* = \min(y) : v_{turb\ inner} = v_{turb\ outer}$, $\ell = \kappa y \left(1 - e^{-\frac{y^+}{A^+}}\right)$ — довжина шляху перемішування, $\kappa = 0.4$ — стала Кармана, $A^+ = 26.0$, $y^+ = yV^*/\nu$ — безрозмірна координата закону стінки, $V^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ — зсувна швидкість, $\tau_w = \rho\mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \Big|_{y=0}$ — напруження зсуву, $\alpha = 0.168$, V_∞ — швидкість зовнішнього потоку, $\gamma = \left[1 + 5.5 \left(\frac{y}{\delta}\right)^6\right]^{-1}$, δ — товщина примежового шару, δ^* — товщина витіснення. Відомо, що δ^* та δ для турбулентного примежового шару пропорційні між собою з коефіцієнтом, близьким до вісімки, тож було вирішено використовувати товщину витіснення замість товщини примежового шару через її однозначне визначення.

Використання такої моделі дає досить непоганий збіг (Рис. 3.2.1) з результатами експерименту у випадку відсутності видуву [21]. А саме, досліджувалась залежність локального коефіцієнту опору $C_f = \frac{2\tau_w}{\rho V_\infty^2}$ по довжині пластини. Отриманий свідчить про спроможність такої моделі описувати течію на пластині без наявності видуву.



Порівняння результатів числового моделювання (1). з використанням моделі (3.4) – (3.6) з результатами експерименту [21] (2).

Рис 3.2.1 — Залежність коефіцієнту локального тертя C_f по довжині пластини.

3.3 Модифікація моделі турбулентності у випадках наявності видуву

Використання цієї ж моделі у первинному вигляді у випадках наявності видуву не дає бажаного відтворення результатів експерименту. Залежність C_f як функція коефіцієнту видуву $C_b = V_{blow}/V_\infty$ швидко спадає до нуля вже при $C_b = 0.004 - 0.005$, що суперечить як експериментальним даним, так і загальним фізичним міркуванням. Таким чином, виникає потреба у певній модифікації моделі на випадок наявності видуву. Аналіз показав, що це можна зробити, представляючи A^+ з (3.2.5) як функцію параметрів видуву. А саме, оскільки у тому наближенні, у якому

розв'язувалась задача, єдиним параметром була швидкість видуву V_{blow} (або коефіцієнт видуву C_b), то було вирішено дослідити залежність локального коефіцієнту тертя C_f саме від цього параметру. Таку залежність можливо знайти, використовуючи залежність $C_f(C_b)$ з роботи [21]. У цій роботі надана залежність $C_f(C_b)$ для різних коефіцієнтів видуву. Значення C_f бралось у кінці ділянки з видувом. А саме C_f брався у точці $x = 1.44$ м. Залежність $C_f(C_b)$ має неуніверсальний характер, а є придатною тільки для використання в умовах, в яких був виконаний [21], тому більш доцільно знаходити залежність A^+ не від C_b , а від безрозмірної швидкості закону стінки $V_y^+ = V_y^+ / V^*$. V_y^+ , як і коефіцієнт видуву C_b , відмінна від нуля тільки на тій ділянці поверхні, де наявний видув. V_y^+ надасть моделі більшої універсальності, так як V_y^+ , на відміну від C_b “реагує” на зміни в характері обтікання, наприклад, на появу градієнтів тиску. Отримана в результаті апроксимації залежність $A^+(V_y^+)$ (Рис 3.3.2) має немонотонний характер. Проте, така немонотонність спостерігається лише при маленьких значеннях V_y^+ (малих значення швидкості видуву), що в наближенні лише відносно великих швидкостей видуву дозволяє апроксимувати залежність поліномом другого степеня. Така апроксимація призводить до наступного результату:

$$A^+ = 30.0 - 102.0V^+ + 110.0V^{+2} \quad (3.3.7)$$

Така залежність, як вже було зазначено, не може претендувати на те, щоб відтворювати ефекти, що пов'язані з присутністю мікрovidуву у всьому діапазоні швидкостей видуву (Рис 3.3.3). Проте, на практиці застосування настільки малих швидкостей видуву є недоцільним, тому така залежність буде дозволяти досить точно відображувати ефекти, пов'язані з видувом у більшості практичних зажаєч.

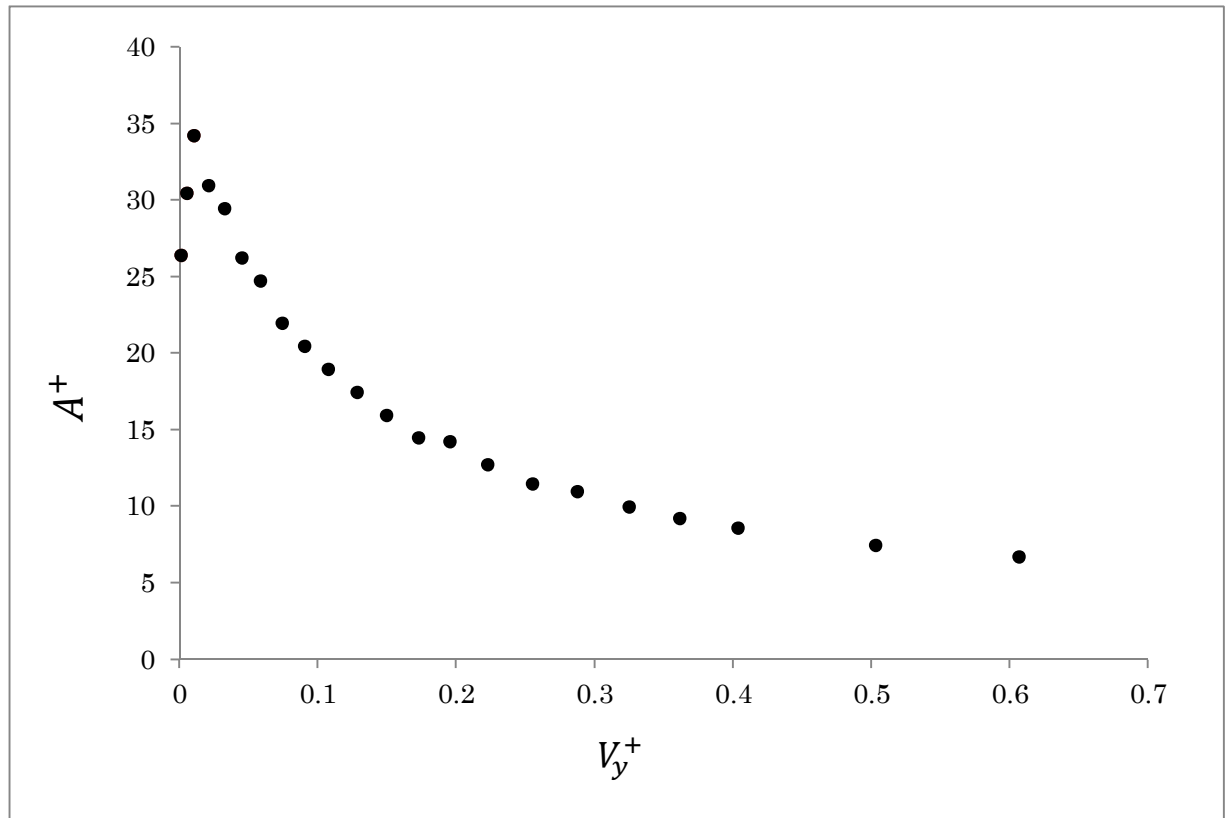
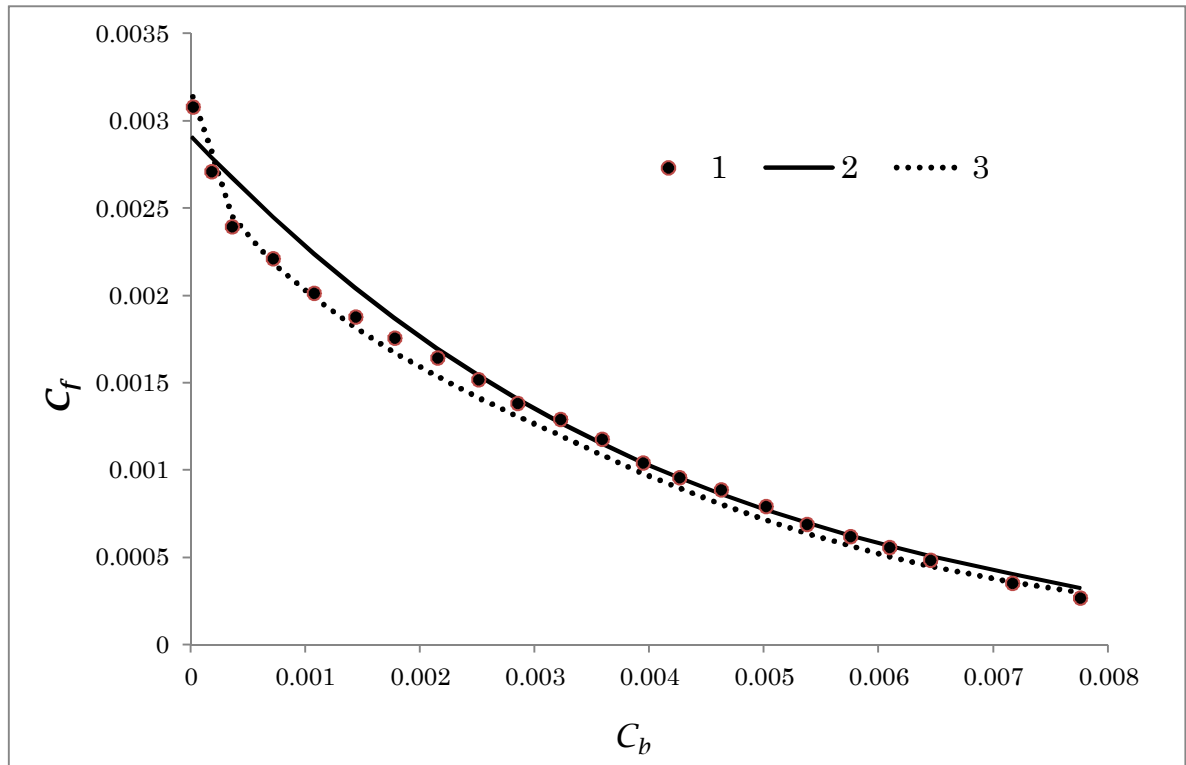


Рис 3.3.2 — Отримана залежність A^+ від безрозмірної швидкості закону стінки V_y^+ як результат врахування експериментальних даних [21].

Для того, щоб мати можливість враховувати і відносно невеликі швидкості видуву, було вирішено, враховуючи немонотонність залежності $A^+(V_y^+)$, спробувати апроксимацію у вигляді шматочно заданої функції. Це призвело до наступного результату:

$$A^+ = \begin{cases} 838.0V^+ + 26.0, & V^+ \leq 0.011 \\ -7.44 \ln(V^+) + 2.13, & V^+ > 0.011 \end{cases} \quad (3.3.8)$$

Така залежність вже немає обмежень, і може коректно відображувати (Рис 3.3.3) ефекти, що спричинює мікровидув у всьому діапазоні досліджуваних швидкостей видуву.



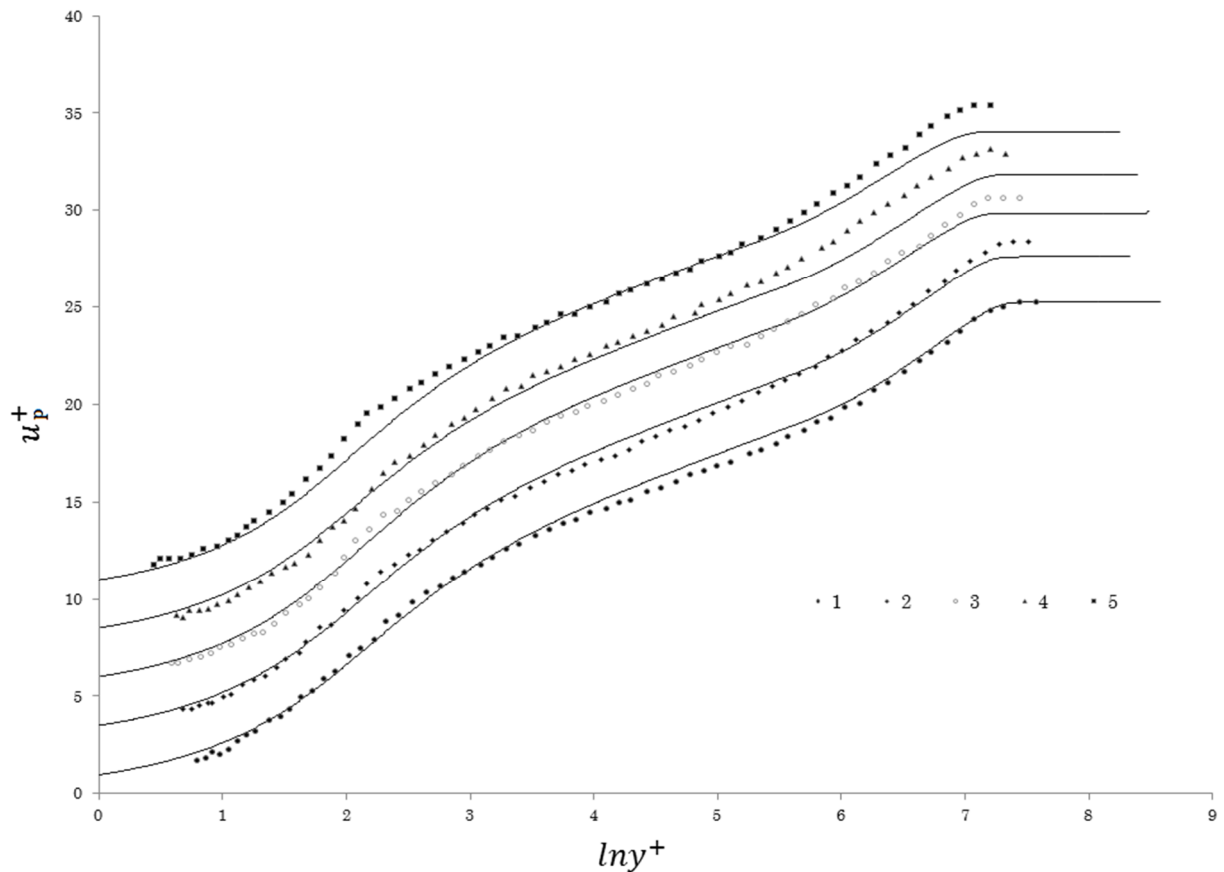
Крапки: експеримент [21], суцільна лінія: розрахунок за моделлю (3.7),
переривчаста лінія: розрахунок за моделлю (3.8)

Рис 3.3.3 — Результати відтворення залежностей коефіцієнту
локального тертя C_f від коефіцієнту видуву та порівняння з
експериментальною залежністю

3.4 Отримані результати

З використанням такої моделі були отримані профілі швидкості у напівлогаріфмічних координатах (закон стінки). Графіки приведено на Рис 3.4.4. Замість звичної безрозмірної швидкості закону стінки $V_x^+ = V_x/V_*$ використовується модифікована безрозмірна швидкість $V_{x_p}^+ = \frac{2((1+V_x^+V_y^+)^{1/2}-1)}{V_y^+}$. Як можна бачити, вона переходить у V_x^+ при взятті границі

$V_y^+ \rightarrow 0$. Як можна бачити, при збільшенні швидкості видуву похибка зростає, проте загальний характер залежності відтворюється досить якісно.



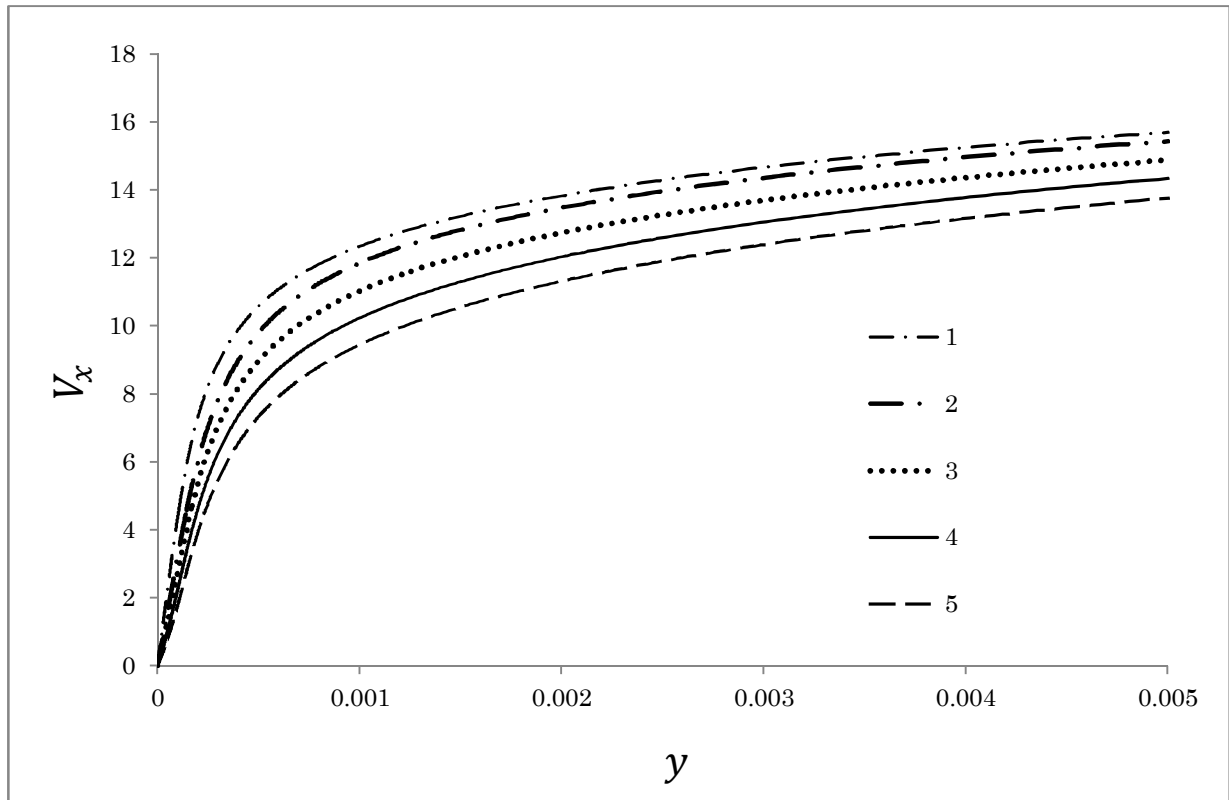
1...5 — $C_f = 0; 0.001; 0.0023; 0.003; 0.004$

Крапки: експеримент [21], суцільні лінії: розрахунок за моделлю (3.8)

Рис. 3.4.4 — Профілі швидкості у змінних закону стінки. Для зручності порівняння профілі посунуті на значення 2.5 по осі ординат відносно один одного.

Також були отримані профілі швидкості у розмірних координатах (Рис. 3.4.5). Як можна бачити, при підвищенні швидкості видуву, профілі швидкості змінюються з нормальною координатою у більш плавно порівняно

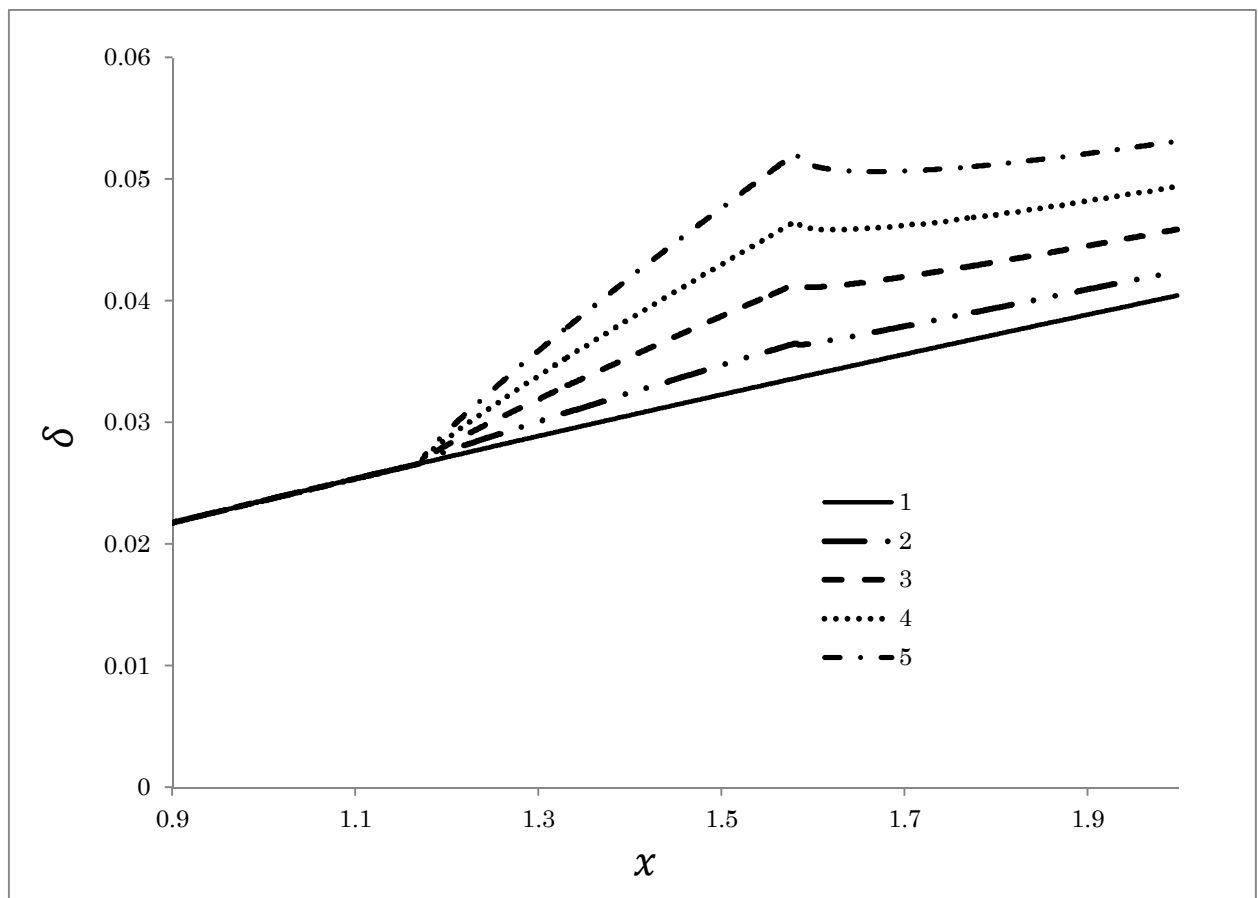
з випадком відсутності видуву. Це зумовлено потовщенням примежового шару при наявності видуву. Це якраз той ефект, завдяки якому відбувається зниження поверхневого тертя внаслідок застосування видуву.



1...5 — $C_f = 0; 0.001; 0.0023; 0.003; 0.004$

Рис 3.4.5 — Профілі повздовжньої компоненти швидкості як результат числового моделювання.

Збільшення товщини примежового шару зі зростанням швидкості видуву можна чітко бачити на рис 3.6. Товщина примежового шару залишається незмінною до початку ділянки з видувом і починає різко рости при $x = 1.17$ м, де починається видув. Як можна бачити з Рис. 3.6., після закінчення ділянки з видувом ($x = 1.58$ м) товщина примежового шару не одразу спадає до того рівня, яким би вона була без присутності видуву, а лише асимптотично прямує до неї.



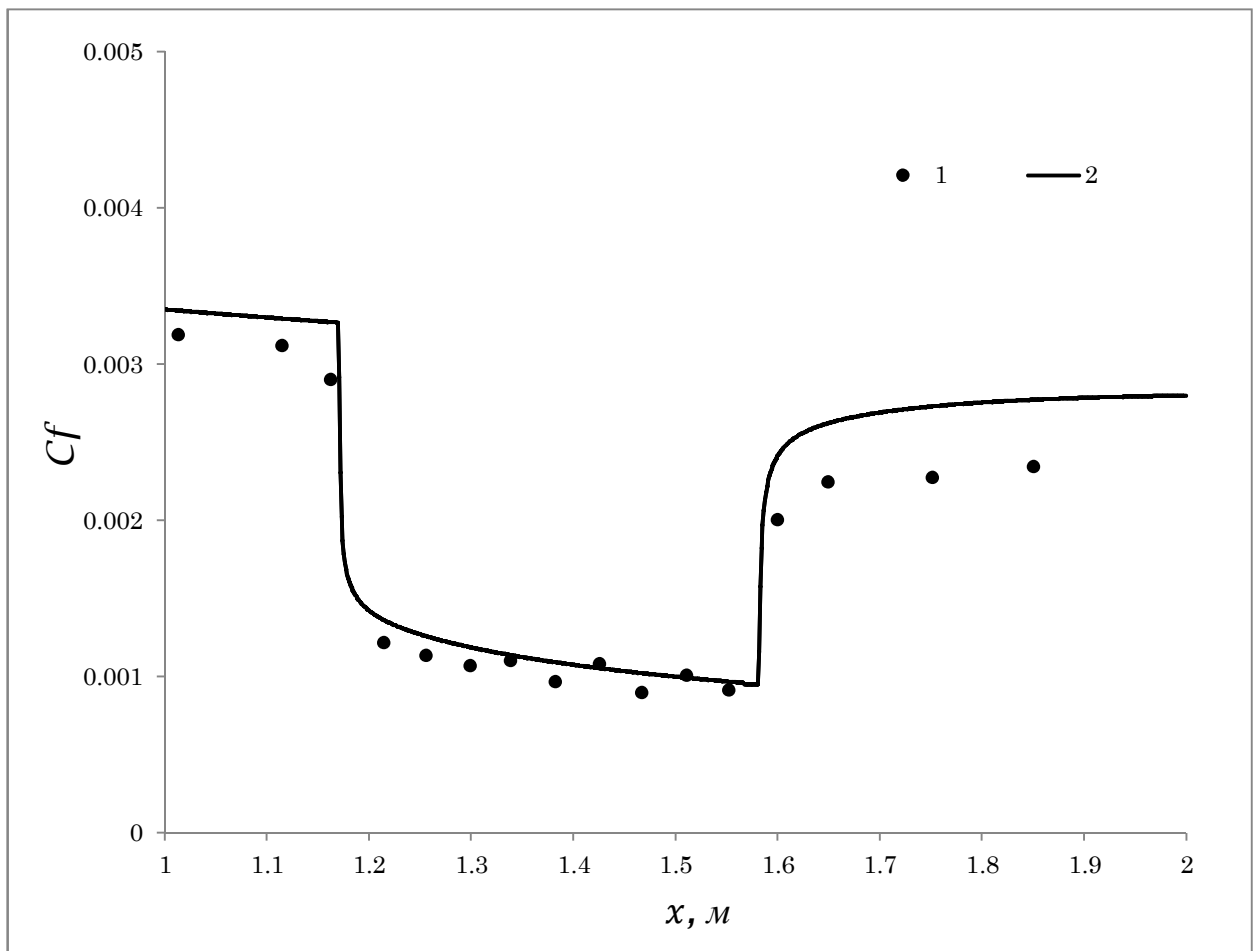
1...5 — $C_f = 0; 0.001; 0.0023; 0.003; 0.004$

Рис 3.4.6 — Залежність товщини примежового шару як функція
повздовжньої координати x .

Також були отримані залежності для коефіцієнту тертя C_f від повздовжньої координати x вже при наявності видуву. Як можна бачити, отримані залежності досить якісно відтворюють експериментальні дані. Проте, наявні ділянки, де якість відтворення результатів експерименту може бути недостатньою. Це пов'язано, в першу чергу, з допущенням, що дискретний набір отворів, через які здійснюється видув, можна замінити на суцільну межу умов. Також, треба враховувати, що розрахунки велися у наближенні примежового шару, що також не може не впливати на якість відтворення. Проте, незважаючи на ряд допущень, отриманий рівень

збіжності числових розрахунків з експериментальними даними дозволяє говорити про працездатність розробленої моделі.

На графіку Рис 3.4.7 чітко видно, що видув спричинює не тільки локальний вплив на течію, а має певну післядію: коефіцієнт тертя після закінчення ділянки з мікрovidувам підвищується до того рівня, яким він би був без наявності видуву, не миттєво, а досить плавно. Як можна бачити,



Порівняння результатів експерименту [21] (1). з числовими обрахунками з використанням моделі (3.4) – (3.6) (2).

Рис 3.4.7 — Залежність коефіцієнту локального тертя C_f по довжині пластины при наявності видуву

розроблена модель не досить гарно відтворює залежність у області після ділянки з видувом, тож це питання має бути досліджено більш ретельно.

Виявляється, що зниження опору тертя — не єдиний ефект, який можна досягти, використовуючи метод мікрovidу. Іншим ефектом, що пов'язаний з використанням цього методу керування течіями, є зниження інтенсивності потоку тепла від зовнішньої течії до поверхні, через яку здійснюється мікрovidу. Для моделювання явищ, що пов'язані з наявністю градієнтів температури до системи рівнянь (3.1.1) має ще увійти рівняння, що описувало б просторову зміну температури, тобто рівняння перенесення енергії. З додаванням цього рівняння, система (3.1.1) набуває наступного вигляду:

$$\begin{cases} V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{eff} \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \\ V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(C_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \end{cases} \quad (3.4.10)$$

Тут T — температура, C_{eff} — ефективний коефіцієнт температуропровідності. Для цього рівняння було також використано осереднення за Рейнольдсом, тому $C_{eff} = a + a_t$. Звичайно, оскільки у якості газу використовується повітря, при розрахунках потрібно враховувати ефекти, пов'язані зі стисливістю. Але, оскільки метою є отримання лише якісних залежностей та демонстрація працездатності методу у напрямку зниження інтенсивності потоків тепла, було вирішено розв'язувати незв'язану задачу, тобто таку, де температурне поле не впливає на поле швидкостей. Відповідно, всі фізичні параметри газу (в'язкість, температуропровідність) також вважалися незалежними від температури. Дискретизація рівняння перенесення температури в цілому аналогічна тому,

як це було зроблено для рівняння збереження імпульсу і має наступний вигляд:

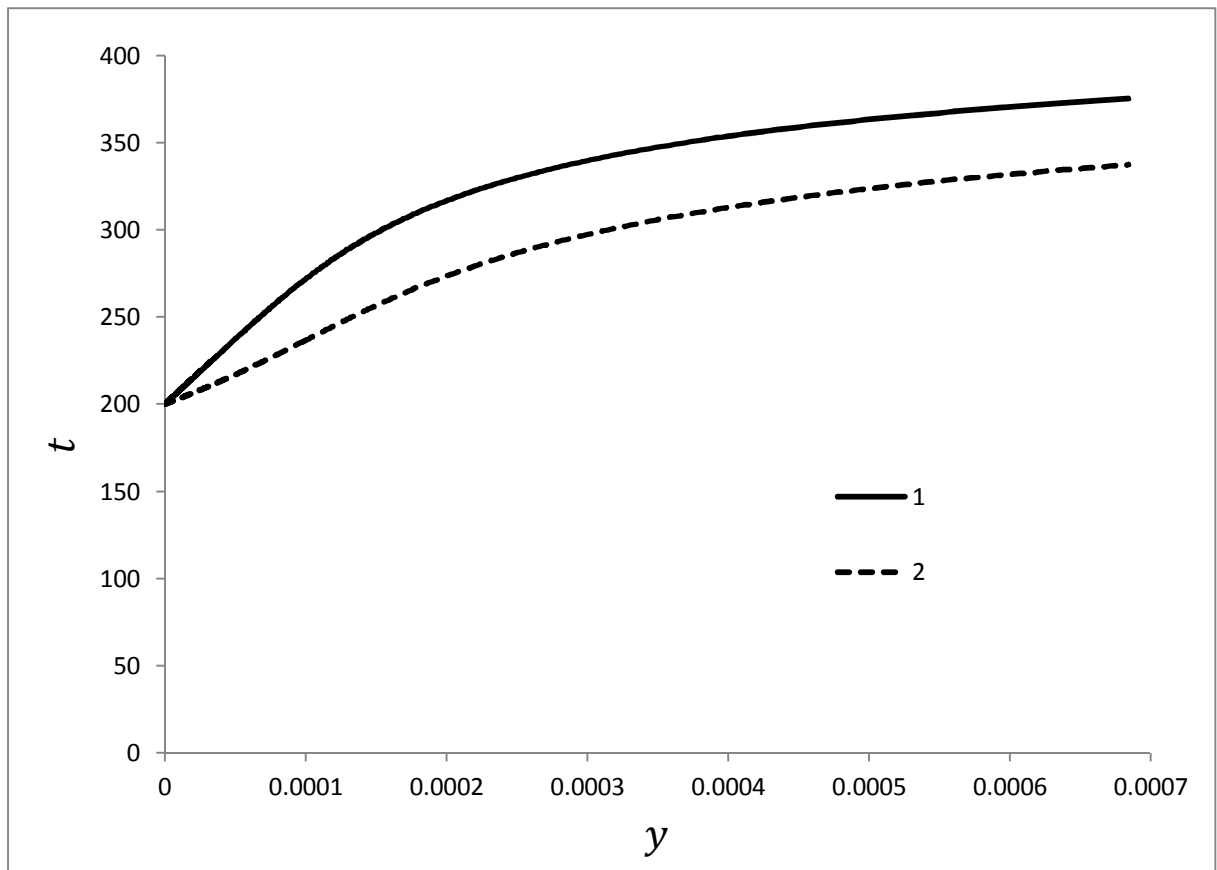
$$F_{x_j} \frac{T_{x_{i,j}} - T_{x_{i-1,j}}}{\Delta x} + F_{y_j} \frac{T_{x_{i,j+1}} - T_{x_{i,j-1}}}{2\Delta y} =$$

$$= \left(C_{eff_{i,j+\frac{1}{2}}} \frac{T_{x_{i,j+1}} - T_{x_{i,j}}}{\Delta y^2} - C_{eff_{i,j+\frac{1}{2}}} \frac{T_{x_{i,j}} - T_{x_{i,j-1}}}{\Delta y^2} \right) \quad (3.4.11)$$

Використовуючи алгоритм Томаса, можна отримувати розподіл температури по вже відомому полю швидкості. Питання полягає лише в тому, як саме моделювати турбулентний коефіцієнт теплопровідності. Для цього було вирішено використати теорію подібності. Відомо, що процеси перенесення імпульсу та перенесення тепла є подібними. Це, зокрема, чітко видно з відповідних рівнянь — вони є фактично аналогічними. Критерієм подібності для таких процесів є число Прандтля $Pr = \frac{\nu}{a}$. Аналогічне співвідношення діє і між турбулентними величинами: $Pr_t = \frac{\nu_t}{a_t}$. Таким чином, знаючи число Прандтля і в'язкість, можливо відшукувати коефіцієнт теплопровідності. Для повітря $Pr \approx 1$, $Pr_t \approx 0.9$. Таким чином, ефективний коефіцієнт теплопровідності C_{eff} тепер представляється наступним чином: $C_{eff} = a + a_t = \nu/Pr + \nu_t/Pr_t$. Аналогія між цими явищами позбавляє необхідності окремо моделювати коефіцієнт теплопровідності, що значно спрощує задачу.

Отримані результати (Рис 3.4.8) показують, що за наявності видуву температура повітря коло стінки зростає не так швидко, як без нього, що свідчить про те, що метод мікрovidува дійсно може виступати як засіб теплового захисту.

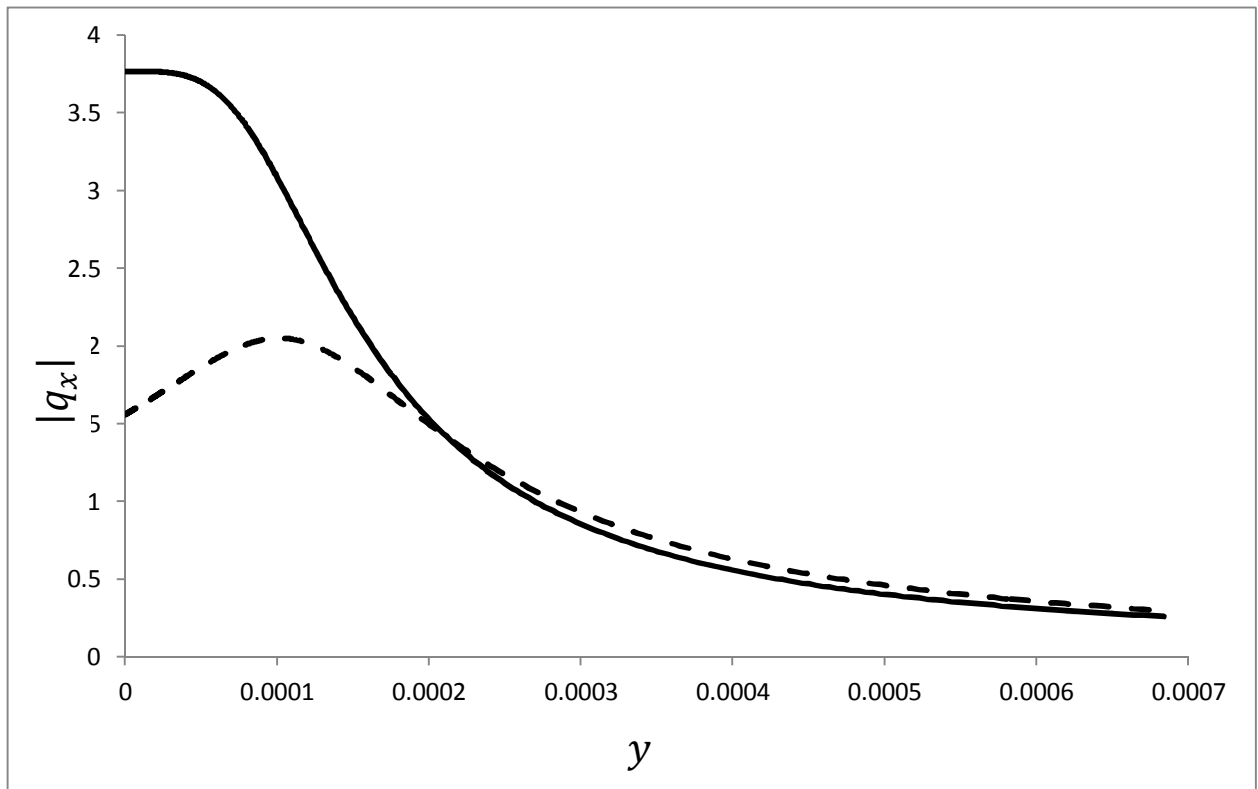
Для більш наочної демонстрації були побудовані залежності модуля нормальної компоненти теплового потоку від координати y у перерізі $x = 1.44$ м для випадку наявності та відсутності видуву.



1: $C_b = 0$, 2: $C_b = 0.0027$

Рис 3.4.8 — Залежність температури від нормальної координати y у перерізі $x = 1.44$ м.

Нормальна компонента теплового потоку знаходиться за законом Фур'є як $q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}$, де λ — коефіцієнт теплопровідності. Нормальна компонента теплового потоку знаходиться за законом Фур'є як $q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}$, де λ — коефіцієнт теплопровідності. З графіку на Рис 3.4.9 чітко видно, що у пристінній області видув спричиняє досить значний ефект та приблизно в два рази знижує щільність потоку тепла на стінці. Таким чином, розрахунки показують, що метод мікрovidуву може виступати ефективним засобом зниження інтенсивності потоків тепла у околі поверхонь, через які здійснюється видув.



1: $C_b = 0$, 2: $C_b = 0.0027$

Рис 3.4.9 — Залежність модуля нормальної складової теплового потоку від нормальної координати y у перерізі $x = 1.44$ м.

З графіку на Рис 3.4.9 чітко видно, що у пристінній області видув спричиняє досить значний ефект та приблизно в два рази знижує щільність потоку тепла на стінці. Таким чином, розрахунки показують, що метод мікрОВИДУВУ може виступати ефективним засобом зниження інтенсивності потоків тепла у околі поверхонь, через які здійснюється видув.

3.5 Моделювання обтікання у трьохвимірному випадку

Для більш детального дослідження можливостей методу мікрОВИДУВУ було також проведено дослідження обтікання пластини з неоднорідним видувом у трьохвимірному випадку з використанням програмного пакета OpenFOAM. Досліджувана поверхня представляє собою пластину, на якій

наявні повздовжні полоси з мікровидувом. Товщина кожної полоси становить 50 мм. Швидкість зовнішнього потоку становить 50 М/с , швидкість видуву становить 0.1 М/с , тобто $C_b = 0.002$. У якості моделі турбулентності була використана модель SST. Отримані залежності для напруження тертя у перерізі випадку з наявністю видуву та без нього (Рис. 3.5.9).

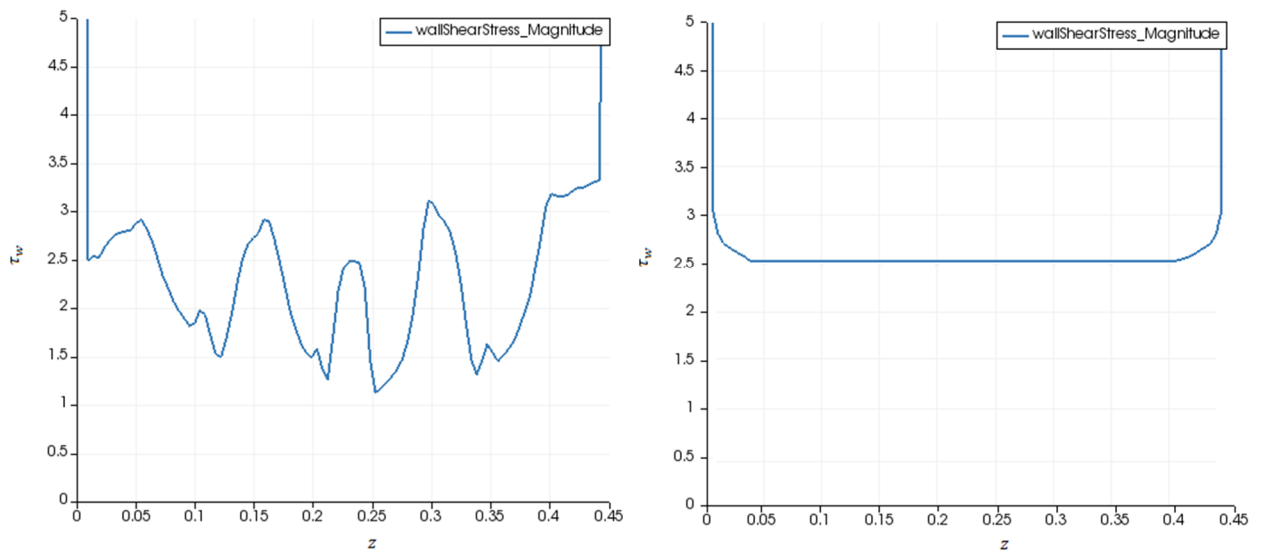


Рис. 3.5.9 Порівняння залежності напруження зсуву від координати z у випадку з мікровидувом та без нього.

Як можна бачити, і цьому випадку мікровидув дає відчутне зниження опору тертя, але випадок неоднорідного видуву потребує значно більш досконалого дослідження.

3.5 Висновки з розділу 3.

1. Розроблена алгебраїчна модель турбулентної течії коло проникної поверхні з мікровидувом через неї.
2. Використання моделі дозволило відтворити існуючі експериментальні дані за допомогою використання числового моделювання

3. Було показано, що метод мікрovidу, попри невеликі витрати інжектваного повітря, здатен забезпечувати суттєве зниження поверхневого опору тертя.

4. Було продемонстровано можливість методу мікрovidу щодо зниження інтенсивності теплового потоку в околі обтічної поверхні, що свідчить про можливість використання методу мікрovidу як засобу теплового захисту.

5. Було продемонстрована працездатність методу мікрovidу з використанням трьохвимірної моделі.

6. Невирішеним залишається питання впливу мікрovidу на виникнення просторових вихрових структур а також впливу щільності розташування ділянок з мікрovidом на зовнішню течію. Дослідження цих питань потребує моделювання трьовимірних областей та використання більш складних моделей турбулентності.

ВИСНОВКИ

1. Зроблений огляд щодо сучасного стану досліджень у напрямку методів активного контролю турбулентних пристінних течій.
2. Було зроблено висновок про необхідність подальшого аналізу методу мікрovidу, який може потенційно суттєво знижувати опір тертя при невеликих енергозатратах, що робить його енергетично вигідним.
3. Проведена порівняльна характеристика методів моделювання течій. Зроблено висновок про необхідність подальшої розробки моделей турбулентності для методу RANS.
4. Створена модифікована алгебраїчна модель турбулентності що здатна описувати пристінні течія при наявності мікрovidу через обтічну поверхню.
5. Отриманий бажаний рівень точності відтворення експериментальних залежностей з використанням розробленої моделі.
6. Підтверджена можливість методу мікрovidу щодо зниження поверхневого опору тертя та зниження інтенсивностей теплових потоків.
7. У подальшому потрібно зосередитись на вивченні просторових ефектів, пов'язаних з мікрovidом, зокрема, потрібно детально дослідити вплив неоднорідного розташування ділянок з мікрovidом на особливості пристінної течії.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Mickley, H.S. Momentum transfer for flow over a flat plate with blowing [Text] / H.S. Mickley, R.S. Davis // NACA TN 4017 – 1957.
2. Catherall, D. Viscous flow past a flat plate with uniform injection [Text] / D. Catherall, K. Stewartson, P.G. Williams // Proc. R. Soc. London. Ser. A: Math. Phys. Sci. 284 – 1965. – P. 370–396.
3. Grin, V.T. Experimental study of boundary-layer control by blowing on a flat plate at $M = 2.5$ [Text] / V.T. Grin // Fluid Dyn. 2 – 1967. – P. 79–80.
4. Simpson, R.L. The turbulent boundary layer on a porous plate: experimental skin friction with variable injection and suction [Text] / R.L. Simpson, R.J. Moffat, W.M. Kays // Int. J. Heat Mass Transf. – 1969. – 12. – P. 771–789.
5. Simpson, R.L. Characteristics of turbulent boundary layers at low Reynolds numbers with and without transpiration [Text] / R.L. Simpson // J. Fluid Mech. – 1970. – 42 (4) – P. 769–802.
6. Julien, H.L. The Turbulent Boundary Layer on a Porous Plate: Experimental Study of the Effects of a Favorable Pressure Gradient. [Text] / H.L. Julien, W.M. Kays, R.J. Moffat // – 1969.
7. Andersen, P.S. The Turbulent Boundary Layer on a Porous plate: An Experimental Study of the Fluid Mechanics for Adverse Free-stream Pressure Gradients. [Text] / P.S. Andersen, W.M. Kays, R.J. Moffat // – 1972.
8. Kays, W.M. The behavior of transpired turbulent boundary layers [Text] / W.M. Kays, R.J. Moffat // NASA Report HTM-20. – 1975.
9. Schetz, J.A. Turbulent boundary layer with injection and surface roughness [Text] / J.A. Schetz, B. Nerney // AIAA J. – 1977. – 15 (9). – P. 1288–1294.
10. Wilkinson, S.P. Influence of wall permeability on turbulent boundary-layer properties [Text] / S.P. Wilkinson // AIAA Paper – 1983. – 83-0294.

11. Hwang, D.P. A proof of concept experiment for reducing skin friction by using a micro-blowing technique [Text] / D.P. Hwang // NASA TM. – 1996. – 107315.
12. Hwang, D.P. A proof of concept experiment [Text] / D.P. Hwang // NASA Lewis Research Center, Cleveland, OH. – 1996.
13. US Patent 5,803,410 D.P. Hwang, Skin friction reduction by micro-blowing technique. D.P. Hwang. – 1998.
14. Hwang, D.P. Experimental study of characteristics of micro-hole porous skins for turbulent skin friction reduction [Text] / Proceedings of the 23rd Congress of International Council of the Aeronautical Sciences // 813 September, Toronto, Canada. – 2002.
15. Hwang, D.P. An experimental study of turbulent skin friction reduction in supersonic flow using a microblowing technique [Text] / D.P. Hwang. // AIAA. – 2002. – Paper 0545.
16. Tillman, T.G. Drag reduction on a large-scale nacelle using a microblowing technique [Text] / T.G. Tillman, D.P. Hwang // AIAA. – 1999. – Paper 99-0130.
17. Choi, N.-S. A study of micro-blowing technique. [Text] / N.-S. Choi. // 1999. – Institute for Aerospace Studies University of Toronto.
18. Parkhe, V. A Parametric Study on Flow Over a Flat Plate with Microblowing. [Text] / V. Parkhe. // 2009. – Univ. of Akron.
19. Lin, Y.-L. Skin-friction reduction through micro blowing [Text] / Y.-L. Lin, M.K. Chyu, TI-P. Shih, B.P. Willis, D.P. Hwang // AIAA. – 1998. – Paper 98-0359.
20. Hwang, D.P. Experimental Evaluation of the Penalty Associated with Micro-blowing for Reducing Skin Friction [Text] / D.P. Hwang, T.J. Biesiadny // –1997. – NASA Lewis Research Center, Cleveland.
21. Kornilov, V.I. Current state and prospects of researches on the control of turbulent boundary layer by air blowing [Text] / V.I. Kornilov // Progress in Aerospace Sciences. – 2015. – Volume 76. P. 1–23.

22. Kornilov, V.I. Application of air microblowing through a porous wall for skin friction reduction on a flat plate [Text] / V.I. Kornilov, A.V. Boiko // Vestnik NGU. – 2010. – Series Phys. P. 38–44
23. Kornilov, V.I. Distribution of mean velocity in turbulent boundary layer over permeable surface with air blowing [Text] / V.I. Kornilov // Thermophys. Aeromechan. – 2012. – 19 (1). – P. 9–17.
24. Spalart, P.R. Strategies for turbulence modeling and simulations [Text] / P.R. Spalart // 4-th International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements. FRANTOUT&CCAS, Porticcio Ajaccio, (Corsica, France, May 24-26, 1999). – 1999.