

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ФІЗИКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ А.А. Халатов
(підпис)

“ ” _____ 2015 р.

Дипломна робота
освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»

з напрямку підготовки (спеціальності) 6.040204 Прикладна фізика

на тему: Дослідження ефективності управління турбулентними пристінними течіями шляхом неоднорідних впливів в околі обтічної поверхні

Виконав: студент IV курсу, групи ФФ-12

Стреляєв Олексій Юрійович

Керівник проф., д.т.н., проф. Шквар Є.О.

Рецензент п.н.с. відділу гідробіоніки та управління
примежовим шаром Інституту гідромеханіки
НАН України, д.т.н., с.н.с. Воскобійник В.А.

(підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2015 року

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка дипломної роботи за обсягом становить 63 сторінки, містить 2 таблиці та 13 рисунків. Використано 47 бібліографічних джерел.

Темою роботи є дослідження ефективності управління турбулентними пристінними течіями шляхом неоднорідних впливів в околі обтічної поверхні.

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

Предметом дослідження є керований турбулентний рух шляхом неоднорідного нагріву обтічної поверхні.

Метою роботи є перевірка спроможності методу керування пристінними течіями за допомогою неоднорідних впливів в околі обтічної поверхні щодо можливості його використання з метою зменшення гідродинамічного опору тертя при русі швидкісних транспортних засобів у воді.

При дослідженні використовувалися програмний модуль Fluent 15.0 пакету ANSYS із застосуванням SST моделі турбулентності.

Завданнями роботи є: вибір об'єкту дослідження; вибір адекватної моделі турбулентності; вивчення фізичної структури потоку; визначення коефіцієнту опору тертя.

В результаті дослідження були отримані наступні результати:

1. При швидкості набігаючого потоку 1 м/с, та температурі неоднорідного впливу рівній 50 °C спостерігається максимальний позитивний ефект від застосування зазначеного методу, який виражається в зменшенні коефіцієнту опору тертя на 4,5% відносно випадку, без нагріву.

2. При швидкостях набігаючого потоку 4 та 8 м/с навпаки спостерігається негативний ефект від використання неоднорідних теплових впливів в діапазоні температур від 15 °C до 70 °C.

3. Проведене порівняння ефекту від неоднорідного та однорідного теплового впливу на потік, та встановлено, що при меншій в 3 рази

енерговитраті, метод неоднорідного нагріву дає на 4% більший виграш в коефіцієнті опору тертя.

Ключові слова: *неоднорідний періодичний нагрів, числове моделювання, опір тертя, керування течіями, моделювання турбулентності.*

SUMMARY

The explanatory note of diploma work includes 63 pages, 2 tables and 13 figures. 47 references were used in it.

The research of the turbulent near-wall flow control efficiency is the main theme of the work.

The turbulent flow with a modified structure of turbulence is the object of research.

Controlled turbulent motion by the nonuniform heating of the streamlined surface is the subject of research.

Studying of the ability of near-wall flow control method using heterogeneous impacts in the vicinity of the rigid surface, directed by reducing the friction drag is the aim of this work.

In this research ANSYS Fluent 15.0 software package with SST turbulence model were used for simulating and describing the physical structure of investigated flow.

The main tasks of the work are: selection of the objects of research; selection of an appropriate turbulence model; studying of the physical structure of the stream; determination of the friction drag coefficient.

Next results were received in the result of research:

1. The maximal positive effect of 4.5% friction drag reduction respectively the case without heating was achieved for input flow velocity 1 m/sec and temperature of nonuniform influence 50 ° C

2. For velocities of input flow 4 and 8 m/sec and temperature interval of nonuniform heating influences from 15 ° C to 70 ° C the negative effect has been obtained.

3. The comparison of nonuniform and uniform heating influence on flow has been made and the 4% advantage of the former in friction drag coefficient together with 3-times smaller energy costs was established.

Keywords: *non-uniform periodic heating, numerical simulation, friction drag reduction, flow control, turbulence simulation.*

ЗМІСТ

ВСТУП	8
КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ЩОДО МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПРИСТІННИМ РУХОМ.....	12
1.1. Задачі управління примежовим шаром та класифікація методів управління пристінними турбулентними течіями.	12
1.2. Дослідження проблем, що гальмують практичне застосування методів управління пристінними течіями.....	16
1.3. Сучасний стан чисельного моделювання як перспективної методології дослідження задач керування пристінним турбулентним рухом	20
1.4. Висновки з розділу 1. Постановка мети дипломної роботи.	24
ВИСВІТЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЩОДО МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ КЕРОВАНИХ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ.....	26
2.1. Вихідні рівняння турбулентного руху	26
2.2. Класифікація методів моделювання турбулентних течій.....	28
2.3. Порівняння класів моделей турбулентності.....	37
2.4. Висновки з розділу 2.....	41
МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ОБТІКАННЯ ПЛОСКОЇ ПЛАСТИНИ ЗА УМОВ НЕОДНОРІДНОГО НАГРІВУ.....	43
3.1. Постановка задачі.....	43
3.2. Математична модель.....	46
3.3. Результати моделювання.....	47
3.4. Результати дослідження опору тертя	50
3.5. Висновки з розділу 3	54
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	57

ВСТУП

Енергозбереження - одна з найважливіших проблем без державних та часових кордонів, що у теперішній час турбують людство особливо гостро. Її прямим наслідком є як необхідність розробки альтернативних джерел енергії, так і актуальність вирішення проблеми підвищення ефективності існуючих енергетичних установок та пристроїв, що використовують енергію і, зокрема, швидкісних транспортних засобів. Задача оптимізації форми обтічних поверхонь в транспорті або в енергетиці інтенсивно вирішується людством вже більше століття і на сучасному етапі розвитку техніки подальше покращення параметрів промислових установок та транспортних засобів цим шляхом вже не вважається ефективним. Даний факт дає початок цілому напрямку оптимізаційної діяльності, пов'язаному з цілеспрямованим впливом на структурні особливості розвитку течії в конкретних умовах і, зокрема, на формування турбулентності та її подальшу еволюцію. Сучасні енергетичні установки використовують переважно рідкий або газоподібний теплоносій, що дозволяє підвищувати їх ефективність, виходячи із загальних принципів механіки рідин і газів. Зокрема першочергову увагу варто приділяти інтенсифікації конвективних теплообмінних процесів, підвищенню ефективності процесів горіння, зниженню рівнів додаткових втрат, таких як вібрації різноманітної природи, генерація шуму і т.п. Однак найбільш вагомю фундаментальною проблемою гідрогазодинаміки з широким спектром різноманітних практично важливих реалізацій є зниження опору тертя, обумовленого в'язкими властивостями рухомої рідини та втратою її стійкості в тонкій області течії, що безпосередньо межує з обтічною поверхнею - примежовому шарі. Вплив на структуру течії в примежовому шарі або вплив на контакт рідини з поверхнею - два найбільш перспективні напрямки вирішення даної проблеми. Перший напрямок оперує великим арсеналом можливостей і методів, що сприяють ламінаризації примежового

шару і зниженню рівня турбулентності, за рахунок надання енергії ззовні, наприклад, шляхом відсмоктування або вдуву газу чи рідини в примежовий шар, використання полімерних домішок, створення обертального руху обтічної поверхні, вихрогенерації чи штучного впорядкування структури потоку і т.д. До другого напрямку відносяться методи, направлені на зниження опору тертя за рахунок зміни властивостей контакту рідини з обтічної поверхнею. Це досягається шляхом застосування поверхонь, що рухаються вздовж потоку, гідрофобних покриттів, інжекції мікробульбашок газу в примежовий шар рідини, інжекції через поверхню слабких розчинів поверхнево-активних речовин, а також за допомогою повітряного або парового зазору між потоком рідини і обтічною поверхнею. Незалежно від спрямування, напрямок, який передбачає для своєї реалізації використання додаткової енергії, прийнято називати активним, а у випадку відсутності потреби в додаткових енергетичних втратах — пасивним управлінням потоком.

Основною особливістю активних методів є значно більша варіативність та гнучкість можливостей їх застосування як для зменшення опору тертя шляхом цілеспрямованого впливу на вихрову структуру турбулентності, так і для ефективного перешкодження відриву примежового шару. У той самий час роль і місце добре оптимізованих під конкретні умови використання і вдало застосованих пасивних методів важко переоцінити, але життєві реалії сучасного стану впровадження як активних, так і пасивних методів, особливо щодо зменшення тертя свідчать більше про існування значного інтересу до їх розвитку та втілення, ніж про конкретні працюючі реалізації. Це свідчить одночасно про як беззаперечну актуальність, так і значну складність процесу доведення технологій управління структурою турбулентних течій до рівня їх практичних реалізацій, що й обумовило тему й напрямок досліджень даної дипломної роботи.

Таким чином основним *об'єктом*, на який спрямовані дослідження є турбулентні течії з модифікованою структурою турбулентності, а

предметом - керований турбулентний рух шляхом неоднорідного періодичного нагріву обтічної поверхні. Головна ідея досліджуваного метода заснована на цілеспрямованому вихроутворенні з метою регуляризації вихрової структури турбулентності. Для проведення досліджень у цьому напрямку було прийняте рішення користуватись методологією обчислювальної гідродинаміки, яка передбачає використання формалізованих представлень фізичних законів та взаємозв'язків, математичних та, зокрема, числових методів для розрахунку параметрів течії, та дозволяє з заданою наперед точністю вивчати доволі складні ефекти турбулентного обтікання за умови наявності факторів управління потоком. У випадку даної проблематики досліджень цей підхід має ряд суттєвих переваг перед методами експериментальних досліджень, а часто є безальтернативним, оскільки дозволяє визначати локальні параметри турбулентних течій з необхідною для практичних потреб роздільною здатністю та на основі цього проводити цілеспрямовану оптимізацію геометричних та режимних параметрів засобів управління, що є неможливим або вкрай неефективним на основі використання експериментального підходу. Саме тому числове моделювання є сучасною, перспективною та пріоритетною методологією при дослідженні та вивченні властивостей ефектів, обумовлених турбулентністю. Базисом для вирішення будь-якої задачі при числовому моделюванні слугують основні рівняння обчислювальної гідродинаміки, а саме: рівняння нерозривності, рівняння збереження енергії, імпульсу, та рівняння стану(для газів за умови неохідності врахування стисливості). Проте для розрахунку більш складних течій, що реалізуються в елементах промислового обладнання та при обтіканні поверхонь транспортних засобів, цей базис має бути доповнений рівняннями моделі турбулентності, переносу домішок, багатофазності тощо. Усі перераховані вище рівняння формують систему нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, що мають точний аналітичний розв'язок лише за умови, що визначальне число Рейнольдса доволі мале, а

геометрія поверхні є досить простою. Однак для широкого спектру технологічних та природних процесів задачу можна розв'язати числовими методами, якщо замінити похідні в рівняннях на кінцеві різниці на малих просторових та часових підінтервалах, тобто шляхом дискретизації часу та простору та заміни диференціальних операторів вихідних диференціальних рівнянь відповідними апроксимаційними схемами. Розрахункова область покривається сіткою, побудованою згідно з особливостями досліджуваного процесу, а час протікання процесу поділяється на скінченні інтервали.

Процес дослідження на основі числового моделювання потребує розробки власного чи використання існуючого спеціалізованого програмного забезпечення (ANSYS, OpenFOAM, FlowVision та ін.), й поділяється на три основні етапи. На першому етапі (Preprocessing) будується геометрія моделі, формулюються необхідні фізичні, початкові та граничні умови, будується сітка. На другому етапі (Processing) безпосередньо проводяться числові розрахунки за заданими параметрами, отримуються та зберігаються дані числового розв'язку. На третьому етапі (Postprocessing) здійснюється аналіз отриманих результатів, їх представлення в зручній та інформативній для подальшого сприйняття графічній формі, та їх тестування й перевірка якості та несуперечливості фізиці досліджуваних процесів (валідація). На підставі отриманих результатів та проведеного критичного аналізу уточнюються та оптимізуються фізична та числова моделі та оптимізуються параметри методів управління з метою їх кращої адаптації до умов очікуваної експлуатації. Усі ці етапи будуть з тією чи іншою мірою деталізації висвітлюватися в наступних розділах дипломної роботи.

РОЗДІЛ 1

КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ, ЩОДО МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПРИСТІННИМ РУХОМ.

1.1. Задачі управління примежовим шаром та класифікація методів управління пристінними турбулентними течіями.

На сьогоднішній день один з найбільш пріоритетних та перспективних напрямків досліджень сучасної гідрогазодинаміки є напрям, пов'язаний з розробкою нових та вдосконаленням вже існуючих методів управління структурою пристінних турбулентних течій. Зазвичай класифікацію методів керування пристінними течіями проводять за їх призначенням і необхідністю затрат енергії для забезпечення роботи. Класифікація методів за призначенням містить в собі чотири основні групи методів, згідно задач, які вони мають вирішувати. Головними задачами є: 1) зменшення опору тертя, 2) запобігання відриву примежового шару від обтічної поверхні; 3) інтенсифікація або гальмування теплообміну між течією та обтічною поверхнею і 4) формування течії з заданими властивостями (наприклад, зі збільшеною циркуляцією). Згідно ж енергетичних потреб, методи поділяють на активні та пасивні. Перші потребують додаткового джерела енергії для свого функціонування. Останні ж перерозподіляють у потрібному напрямку енергію самої течії шляхом модифікації структури турбулентного потоку, завдяки чому додаткової енергії не потребують. До найбільш поширених активних методів управління пристінними течіями відносяться: відсмоктування або видув примежового шару через обтічну поверхню, дотичний видув струменя в безпосередній близькості від поверхні, а також нагрівання або охолодження поверхні. Серед пасивних методів виділяють: формування рельєфу обтічної поверхні у вигляді мікроборозенок вздовж напрямку обтікання, тобто ріблет; встановлення в примежовому шарі, на деякій відстані від поверхні, тонких пластин, призначених для руйнування

властивих турбулентному руху великомасштабних вихроутворень, відомих за усталеною англомовною назвою - Large Eddy BreakUp devices(LEBU)[1-3,7]; додавання до течії малих концентрацій розчинів домішок високомолекулярних полімерів або збагачення водного примежового шару мікробульбашками.

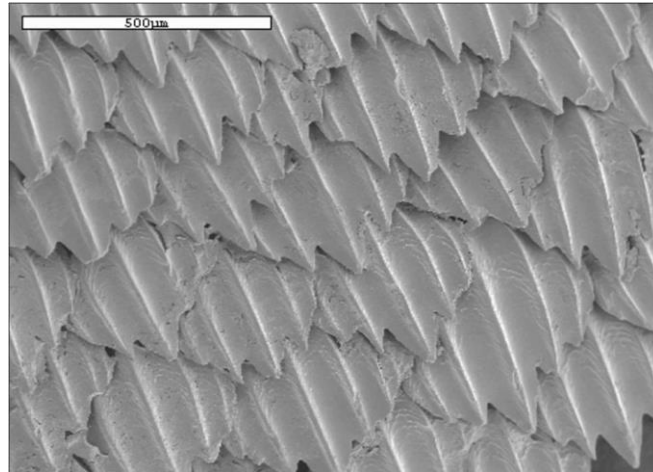


Рис. 1.1. Природні засоби впорядкування обтікання живих істот – рифлені поверхні (ріблети)

В окрему групу виділяють пасивні методи управління, при яких обтічна поверхня є чутливою до характеристик пульсаційного руху турбулентної течії. Цього ефекту можна досягти шляхом використання поверхонь з еластичним покриттям, яке завдяки своїм податним властивостям поглинає енергію турбулентних збурень. Інший метод досягає бажаного ефекту впливу на течію за допомогою утворення вимушених мікроколивань поверхні з параметрами, адаптованими до пульсаційних властивостей турбулентної течії завдяки застосуванню чутливих до властивостей турбулентного руху мікро-електромеханічних систем (MEMS). Альтернативою останньому підходу є активний метод акустичного впливу на турбулентну течію, в результаті якого інтенсифікується перенос кількості руху, зменшується координата точки переходу ламінарної течії в турбулентну [4, 5]. Підвищення стійкості потоку до відриву, за рахунок інтенсифікації пристінного руху, є можливим, також завдяки штучному

вихороутворенню, для цього застосовуються вихрогенератори у вигляді встановлених на обтічній поверхні додаткових елементів різноманітної форми, а також використання різних комбінацій областей та режимів відсмоктування – видування вздовж поверхні[4,6]. Зауважимо, що деякі з описаних вище пасивних методів все-ж потребують додаткових витрат енергії, але вони є вкрай малими у порівнянні з енергетичними затратами активних методів. Суттєвим фактором, за яким слід розділяти методи керування є складова течії, на модифікацію якої, в першу чергу, спрямована їх дія. Така класифікація налічує дві групи, методи, дія яких, в першу чергу направлена на зміну характеристик осередненої течії, та методи, які впливають на обумовлений турбулентністю пульсаційний рух[32]. Розповсюдженою є класифікація методів управління за локалізацією дії засобу, а саме: впливи на крупномасштабну турбулентність зовнішньої області (ПРВВ (LEBU), градієнт тиску) та впливи на дрібномасштабну турбулентність внутрішньої області (шорсткість, профілювання поверхні, інжекція полімерів, мікробульбашкові суспензії, тощо). Наведена класифікація ілюструється відповідною структурною схемою (Рис. 1.2.):

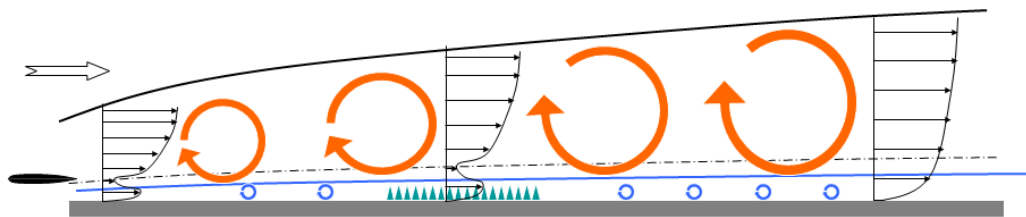


Рис. 1.2 Структурна схема локалізації дії засобів управління

Класифікація методів керування за усіма чотирма наведеними вище принципами наочно ілюструється таблицею 1.1 (літера в дужках позначає

приналежність засобу керування до групи активних – (а) або пасивних (п) методів.

Таблиця 1.1

Класифікація методів управління пристінними течіями

Задачі, які вирішуються керуванням	Складова пристінної турбулентної течії, на яку спрямований вплив	
	Осереднений рух або властивості рідини (газу)	Пульсаційний рух, зумовлений турбулентністю
Зменшення опору тертя	відсмоктування (а) [4,8, 22]; мікрovidув через обтічну поверхню [13–15] охолодження (для газу) та нагрівання (для води) поверхні (а) [4]; підвищення якості обтічної поверхні (істотна ламінарізація) (п) [20]	MEMS (а) [25]; введення полімерних домішок (а); ріблети (п); LEBU (п); податні покриття (п) [9,19]; мікровібрація (а) [16] та хвиляста структура (п) [10] обтічної поверхні
	збагачення пристінної зони мікробульбашками (а) [26];	
Запобігання відриву потоку	Дотичний видув (пристінні струмені) (а); акустичний вплив (а) [5]; охолодження (для газу) та нагрівання (для води) поверхні (а) [4]; активне (а) і пасивне від-смоктування (п) [4]	струменеві вихрогенератори (а) [11]; генератори вихорів (п) [4,5]
Керування теплообміном	Видув через поверхню (а); дотичний видув (завісне охолодження) (а) [21]	Шорсткість (п) [23]; рифлення та оребрення поверхні (п) [27]; формування лунок [12]; генератори вихорів (п) [17]
Формування течії з заданими параметрами	Струминне керування циркуляцією профілю (а) [5,24]; ламінарізовані профілі [30] (п); рухомі елементи обтічної поверхні (циліндри, що обертаються) (а) [4,18]; кінцеві крильця або шайби; пасивний видув (передкрилки, закрилки) (п) [31]; адаптивні крила (профілі) (а) [28]; напливи на передній краї крила (п) [29]	

1.2. Дослідження проблем, що гальмують практичне застосування методів управління пристінними течіями.

Результати багатьох незалежних та різноманітних досліджень однозначно стверджують про реальність можливості керованого впливу на турбулентні течії для зменшення опору тертя та витрат пального, для сприяння безвідривному обтіканню, та взагалі формування течії з необхідними параметрами, але у той же час було з'ясовано, що: 1) діапазон режимних параметрів, для яких методи управління зберігають працездатність, є достатньо вузьким; 2) наявні технологічні та експлуатаційні проблемами, пов'язані, зокрема, з необхідністю додаткових витрат енергії в випадку застосування активних методів та із забезпеченням працездатності систем управління, 3) механізм дії ряду методів управління є вузько орієнтованим на відповідні структурні особливості пристінної течії і, так само як і механізм турбулентного руху, не є вивченим остаточно.

Як свідчить досвід, прогрес в авіації стає все повільнішим і вимагає великих обсягів досліджень пов'язаних з розробкою саме методів управління течією в примежовому шарі.

До одного з можливих засобів управління потоком відноситься електрогазодинамічний (ЕГД) спосіб, заснований на генерації приповерхневих електричних розрядів, що є джерелами низькотемпературної плазми. Таким чином вплив на течію створюється за рахунок спрямованого руху іонів в розряді, які, прискорюючись в електричному полі, передають свій імпульс нейтральним молекулам газу. Принципова можливість використання ЕГД-методу керування характеристикам примежового шару була показана в теоретичних і експериментальних роботах[36], наведених ще в 60-ті роки минулого сторіччя. Проте саме в останні роки, як у нашій країні, так і за кордоном знову виник інтерес щодо використання ЕГД-методу для вирішення задачі управління ламінарно-турбулентним переходом, відривом

примежового шару та зниження опору турбулентного тертя. Причинами повторного виникнення цього інтересу є визначальні успіхи в розвитку техніки створення електричних розрядів, а також поява низки робіт, в яких, зокрема, вказується на можливість зниження опору не тільки за рахунок реактивного ефекту, створюваного наявністю «іонного вітру», а й гальмування ламінарно-турбулентного переходу. Для практичної реалізації методу, за допомогою діелектричних бар'єрних розрядів, передбачається використання в основному на висотах $\sim 10 - 12$ км, де статичний тиск становить $150 \div 200$ Тор. У той же час це означає, що в натуральних умовах зниженого тиску характеристики розрядів можуть істотно відрізнятися від тих, які реалізуються при нормальному тиску. Тобто позитивний ефект методу при одних умовах може зменшуватись, або навіть нівелюватись при інших. Або навіть, як свідчать джерела [37,38], при проведенні аналогічних досліджень з обтікання циліндра ефект використання акустичного методу управління потоком, в близьких, але не однакових умовах, в першому випадку виявився протилежним другому.

Ще один приклад засобу управління потоком, що здобув широке використання в сучасній авіаційній техніці за рахунок своєї надзвичайної ефективності при злітно-посадочних режимах - дотичний до поверхні видув пристінного струменя. Зазвичай, зазначений метод використовується для привнесення у ділянку біля обтічної поверхні додаткової кінетичної енергії, що призводить до набуття потоком більшої стійкості до виникнення відриву. Інженерно, метод реалізується шляхом організації щілин між несучою поверхнею та закрилком літака. Видув пристінного струменя є одним з активних методів, і для його функціонування можливе лише за наявності певних витрат енергії, тому є доцільним належним чином сформувати профіль швидкості, забезпечивши необхідний коефіцієнт супутності у початковому перерізі. Зазначається підвищена складність як експериментального дослідження, так і теоретичного передбачення характеристик пристінних струменів саме через немонотонність профілю

поздовжньої складової осередненої швидкості і його еволюції в умовах несприятливого (додатного) градієнту тиску. Для визначення цих характеристик, особливо в наведених умовах впливу додатного градієнту тиску, що і обумовлює настання відриву, які є типовими у випадку використання пристінних струменів, необхідно мати змогу адекватно відтворювати формування і еволюцію турбулентності з урахуванням кількох областей течії (пристінна, струменева та слідна), що є одним з пріоритетних напрямків дослідження даного класу течій. Якщо ж казати про технологічні складнощі, то у цьому важливо забезпечити дотичний видув струменя разом із мінімальним збуренням основного потоку щілинами сопел. В залежності від режиму експлуатації транспортного засобу, настає період, коли потреба у використанні даного методу керування є відсутньою, але в цей час необхідність умови мінімальності збурень є особливо важливою та актуальною. Загальноприйнятою практикою технічної реалізації цієї умови стало використання на літаках висувних одно- чи багатощілинних закрилків, які потребують додаткових конструктивних елементів, що ускладнюють несучі поверхні, одночасно збільшуючи їх вагу. Тому проводяться альтернативні дослідження та пропонуються інші конструктивні рішення, наприклад, пов'язані із використанням струменевих закрилків [11].

На відміну від розглянутих вище, існують методи, вживані лише для течій рідин, такі, як наприклад: інжекція розчинів полімерних домішок в пристінну ділянку примежового шару, чи збагачення останньої мікробульбашками. Основна технологічна проблема цих методів управління пов'язана зі складністю задачі утримання оптимальної концентрації розчину полімеру або насиченості рідини мікробульбашками у безпосередній близькості від обтічної поверхні. Логічним розв'язком даної проблеми є використання засобів, що гальмують дифузію полімерів у напрямку, перпендикулярному до обтічної поверхні, для чого було запропоновано метод багатофазної інжекції [26], за якого різні фази рухаються на різній віддалі від тіла, що обтікається, але впливають одна на одну завдяки різними

ваговим і дифузійним властивостям та гальмують у такий спосіб взаємопроникнення і взаємодією пристінного шару з рідиною основного потоку. Основною складністю цього методу є вибір оптимального складу багатофазної інжекції і їх концентрацій. В якості однієї з фаз можливо використовувати мікробульбашкову суспензію, збагачення якою пристінної області може використовуватися і як самостійний метод зменшення тертя. Ідея, на якій базується метод полягає в зменшенні ефективної в'язкості рідинно-газової суміші за рахунок наявності розподіленої газової фази. Коректне функціонування методу на пряму залежить від просторової орієнтації обтічної поверхні по відношенню до вектора прискорення вільного тяжіння, це обумовлено тим, що ефекти, виникаючі під дією архімедової сили, призводять до спливання бульбашок. Саме тому найкращого ефекту дія методу набуває за умов розташування під горизонтальними поверхнями, які рухаються у рідині і, навпаки, мінімізується над ними. У першому випадку газова фаза завдяки спливанню притискається до поверхні, у другому ж, навпаки, віддаляється від неї. За умов обтікання похило орієнтованих поверхонь, залежно від їх орієнтації ефект дії мікробульбашкової інжекції матиме деяке проміжне значення ефективності відносно названих вище граничних випадків, важливим є те, що гравітаційні фактори можуть спричиняти також формування вторинних течій.

Відомі також методи управління турбулентними течіями на основі акустичних [5] та теплових впливів [39], використання поверхнево-активних речовин [40], формування хвилястої чи криволінійної [41] форми поверхні обтікання або мікроколивальний вплив на неї [16], застосування мікроелектромеханічних систем [25], а також використання методів демпфіювання турбулентних пристінних збурень еластичними пружно-податними поверхнями [42]. Останнім часом здобувають популярність дослідження управління шляхом використання плазми. Стадії формування методології управління пристінними течіями та сьогоденний стан цієї сфери наукових досліджень вичерпно висвітлені в оглядах та монографіях

наступних авторів: Gad-el-Hak [4], Корнілов [3], Truong [2], Репик, Соседко [18], Козлов, Бабенко та ін. [9,14]. Для кожної з технологій управління пристінним турбулентним рухом існує своя область ефективного використання, а також проблеми адаптації до очікуваних умов експлуатації. Тому вкрай нагальною є задача не лише коректного вибору методу управління, а й проведення комплексу заходів для обґрунтованого забезпечення умов його ефективного використання [32].

1.3. Сучасний стан чисельного моделювання як перспективної методології дослідження задач керування пристінним турбулентним рухом

Аналіз сучасної методології спеціалізованих досліджень спрямованих на вирішення задачі зменшення опору тертя, однозначно свідчить про беззаперечне переважання експериментальних підходів порівняльно з математичним моделюванням технологій і засобів управління турбулентним рухом. Наведені вище результати оглядового аналізу методів управління і їх впливів тільки підкріплюють цей висновок. Відставання теоретичних підходів обумовлене, у першу чергу, різноманітністю та багато масштабністю турбулентної вихрової структури, її безперервною еволюцією, взаємообумовленістю динаміки різних її складових, саме через це модифікацію пульсаційного турбулентного руху далеко не завжди можливо описати як локальну. Повний теоретичний опис турбулентної течії з урахуванням та коректним відображенням усього спектру масштабів вихрових структур є надзвичайно вимогливим до обчислювальних ресурсів і на сьогоднішній день був здійснений тільки для течій простих геометричних конфігурацій з малими значеннями (до кількох десятків тисяч) числа Рейнольдса. Вирішення реальних задач потребує використання певних гіпотез щодо універсальності та фундаментальності законів, яким підпорядковане явище турбулентності в цілому, і які є результатом

узагальнення емпіричного досвіду, що суттєво спрощує розрахунок, але потребує обов'язкової перевірки коректності застосованих припущень, та визначення діапазону їх актуальності. Проте, неупинний процес розвитку комп'ютерних технологій та нарощування обчислювальної потужності стимулює розвиток різноманітних методів, дозволяє переоцінювати існуючі підходи, по-іншому формулювати і досягати розв'язку навіть більш складних задач в адекватні часові строки.

Сучасний стан розвитку математичних методів і комп'ютерних технологій можна охарактеризувати наступними положеннями.

1. Активний розвиток і багатократне збільшення продуктивності обчислювальних систем, обумовлені вдосконаленням їх архітектури, появою нових революційних технологій виробництва напівпровідникових мікросхем і, перш за все, процесорів, а також створення на цій новій технологічній базі багатопроекторних комп'ютерних систем та обчислювальних систем з розподіленою архітектурою (кластерів).

2. Розробка нового та модернізація існуючого програмного забезпечення для зручного практичного застосування включає в себе:

- Багатозадачність новітніх операційних систем, спрямована на найефективніше використання ресурсів комп'ютерів завдяки реалізації багатопоточних алгоритмів функціонування;

- Зручність сучасних середовищ ефективної розробки програмного забезпечення, завдяки використанню нових алгоритмів та принципів зокрема, засобів візуального та багатопоточного програмування, дозволяє швидко створювати інтерактивні програми зі зручним інтерфейсом і можливостями розпаралелювання обчислень;

- Універсалізація новітніх засобів програмування комп'ютерної графіки дозволяє відображати значні обсяги цифрової інформації, отримані як результат розв'язування багатовимірної задачі, у зручній для подальшого аналізу графічній формі.

3. Зменшення собівартості довготривалих обчислень за рахунок зниження витрат часу на розробку і тестування прикладних програмних засобів у поєднанні зі постійним здешевленням обчислювальної техніки та програмного забезпечення.

4. Інтенсивний розвиток високоефективних числових методів, в першу чергу таких, що орієнтовані на застосування алгоритмів розпаралелювання обчислень.

5. Можливість розв'язання задач математичного моделювання безпосередньо для реальних умов і масштабів поставленої задачі, що дозволяє уникнути проблем, притаманних фізичному моделюванню і пов'язаних з необхідністю перерахунку експериментальних результатів на натурні умови експлуатації.

6. Розвиток швидкодіючих обчислювальних систем зі значним об'ємом пам'яті сприяє появі нових і удосконаленню існуючих перспективних методів дослідження руху в'язкої рідини, таких як пряме чисельне моделювання (Direct Numerical Simulation – DNS) та моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES).

7. Поява реальної можливості використання при дослідженні певних видів течій диференціальних моделей турбулентності, що описуються відповідними диференціальними рівняннями переносу складових турбулентного руху, таких як кінетична енергія турбулентності, швидкість її дисипації, а також, в найбільш загальному випадку, компоненти тензору напружень Рейнольдса.

8. Відсутність необхідних при фізичному моделюванні експерименту матеріальних і часових затрат на виробництво моделей, розробку, створення кошовної вимірювальної апаратури та її адаптацію до конкретної експериментальної установки та умов проведення експерименту, а також відсутність витрат на проведення довготривалих експериментів в аеродинамічних трубах або гідро лотках, та інших експериментальних стендах.

9. Можливості математичного моделювання лежать в значно ширших діапазонах розрахункових умов та параметрах об'єктів моделювання.

Отже, сучасний рівень розвитку комп'ютерної обчислювальної техніки, засобів програмування та чисельних методів, в повній мірі, дає змогу проводити теоретичні дослідження та здійснювати математичну формалізацію процесів, пов'язаних зі взаємодією збуреного пульсаційного руху та осередненої течії. Проте, в той же час саме обмеженість можливостей математичного моделювання механізму турбулентного обміну гальмує теоретичні дослідження заходів управління течіями. Тому надзвичайно актуальним є проведення досліджень по пошуку ефективного симбіозу цих методів в реальних умовах їх практичного застосування, виходячи з сучасних представлень щодо теоретичних моделей і методів управління турбулентними течіями. Важливість і перспективність прикладання зусиль до математичного опису турбулентного руху висвітлюється в [43], та наглядно ілюструється наступним висловленнями, датованим 1990 роком в умовах огляду розвитку стану справ в сфері обчислювальної аеро- гідродинаміки в США: “моделювання турбулентності стає визначальним аспектом в розробці програм обчислювальної аеродинаміки для багатьох практичних задач”. В [14,15] з цього ж приводу зазначається, що “однією з найдраматичніших сфер досліджень в аеродинаміці є зменшення поверхневого тертя, особливо для турбулентних течій”. Провідні фахівці в галузі турбулентності Центру турбулентних досліджень Стенфордського університету Моін П. та Кім Дж. характеризують турбулентність як явище, що “...отримало погану репутацію, оскільки її математичний опис є однією з найважчих проблем класичної фізики” [32]. Саме тому напрямком дипломних досліджень автора слугує дослідження геометричних та фізичних особливостей турбулентних пристінних течій в околі обтічної поверхні, що формуються під впливом неоднорідності засобів управління, у тому числі і з урахуванням можливостей комбінованого впливу.

1.4. Висновки з розділу 1. Постановка мети дипломної роботи.

Представлений в розділі 1 критичний огляд літературних джерел, щодо методів управління турбулентним примежовим шаром свідчить про переважне використання експериментальних методів досліджень за цим напрямком, у той час як застосування математичних методів при розв'язуванні задач суттєво гальмується рядом причин. Проте, прогрес розвитку обчислювальних технологій стимулює появу нових досліджень, спрямованих на розв'язання задач гідроаеродинаміки, в першу чергу тих, що, стосуються проблем ресурсозбереження. Проведений аналіз дає змогу зробити наступні висновки:

1. Проведена чітка класифікація методів управління за енергетичними витратами, за задачами, на вирішення яких є кінцевою метою використаного методу, за структурними особливостями турбулентної течії на зміну яких направлена його дія;

2. Механізм дії ряду методів управління є вузько орієнтованим на відповідні структурні особливості пристінної течії і, так само як і механізм турбулентного руху, не є вивченим остаточно, в наслідок чого виникає обмеженість можливостей існуючих напівемпіричних моделей турбулентності щодо адекватного врахування досліджуваних впливів як поодиночі, так і при комбінуванні;

3. Діапазон режимних параметрів, для яких методи управління зберігають працездатність, є достатньо вузьким;

4. Сучасний стан досліджень великою мірою характеризується спробами аналізу ефективності комбінованого застосування кількох методів, які є переважно експериментальними;

5. Числове моделювання є сучасною, перспективною та пріоритетною методологією при дослідженні та вивченні властивостей ефектів, обумовлених турбулентністю;

6. Надмірна велика вимогливість до обчислювальних ресурсів сучасних методів розрахунку за технологіями прямого числового моделювання (DNS) і моделювання великих вихорів (LES), з одного боку гальмує розповсюдження їх для практичного застосування, а з іншого стимулює як розвиток спеціалізованого програмного забезпечення, так і обчислювальної техніки в цілому;

7. Є актуальним математичне відтворення модифікації течій шляхом застосування засобів управління з метою оптимізації їх геометричних особливостей та режимів функціонування.

Здійснений аналіз літературних джерел дав змогу визначити та сформулювати *мету дипломної роботи* у наступній постановці:

Провести теоретичне дослідження, та перевірити спроможність методу керування пристінними турбулентними течіями за допомогою неоднорідних впливів в околі обтічної поверхні, до розв'язання фундаментальної задачі зі зменшення гідродинамічного опору тертя.

РОЗДІЛ 2.

ВИСВІТЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЩОДО МАТЕМАТИЧНОГО ОПИСУ КЕРОВАНИХ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ

2.1. Вихідні рівняння турбулентного руху

Процес отримання сучасного математичного описання явища турбулентності розпочався ще на початку дев'ятнадцятого сторіччя у працях англійського вченого-теоретика Джорджа Стокса, який першим знайшов розв'язки рівняння руху в'язкої рідини для малих значень числа Рейнольдса, спираючись на більш ранні праці французьких вчених Л. Нав'є та С.Пуассона. Проте розділяти течії на ламінарні та турбулентні вперше запропонував саме Рейнольдс у 1883 році. По суті Стокс працював з узагальненим законом в'язкого тертя Ньютона, що і сформувало остаточну форму рівнянь руху в'язкого стисливого середовища, які згодом набули назви рівнянь Нав'є-Стокса.

Сучасний, операторно - тензорний вигляд системи рівнянь Нав'є-Стокса для стисливої в'язкої рідини чи газу, з урахуванням процесів теплообміну має вигляд[45]:

$$\begin{cases} \frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \\ \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = \frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \rho \vec{f} + \nabla \cdot \Pi_{ij}, \\ \rho \frac{D(E/\rho)}{Dt} = \left(\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot E \vec{v} \right) = \frac{\partial Q}{\partial t} - \nabla \cdot \vec{q} + \nabla \cdot (\Pi_{ij} \cdot \vec{v}) + \rho \vec{F} \cdot \vec{v}, \end{cases} \quad (2.1)$$

Де $\rho = \rho(x_1, x_2, x_3, t)$ – густина рідини; ∇ – оператор Гамільтона;

t – час; де $\vec{V} = \{u_1, u_2, u_3\}$ – вектор швидкості; C_v – питома теплоємність при сталому об'ємі; T – абсолютна температура; $\vec{q}$ – вектор густини теплового потоку, що визначається за законом Фур'є $\vec{q} = -\lambda \nabla T$;

$\vec{F} = \{F_1, F_2, F_3\}$ – вектор розподіленої масової сили, прикладеної до одиниці маси; E – повна енергія одиничного об'єму, $E = \rho(e + V^2/2 + \dots)$; e – внутрішня енергія одиниці маси, $e = C_v T$; λ – коефіцієнт теплопровідності; Q – тепловиділення зовнішніх джерел на одиницю об'єму; Π_{ij} – тензор напружень, який пов'язує напруження з тиском і компонентами швидкості.

$$\Pi_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (2.2)$$

$\mu = \mu(x_1, x_2, x_3, t)$ – коефіцієнт динамічної в'язкості; P – тиск; δ_{ij} – символ Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ за умови $i = j$, інакше, при $i \neq j$, $\delta_{ij} = 0$).

Система рівнянь Нав'є-Стокса є математичним втіленням фундаментальних законів збереження, а саме: перше рівняння системи уособлює закон збереження маси, друге – закон збереження імпульсу, третє – закон збереження енергії. З необхідності дана система замикається, наприклад, рівнянням стану Клапейрона-Менделєєва, чи рівнянням залежності коефіцієнтів в'язкості або теплопровідності від температури. Невідомими в системі виступають розподіли чотирьох величин: проекцій вектора швидкості, густини, тиску, температури в часі та просторі. Фундаментальність походження системи рівнянь дозволяє в повній мірі описати властивості рідини, чи газу, навіть за умови наявності турбулентності. Досвід показує, що система рівнянь несприятлива для практичного використання у зв'язку з тим, що точний аналітичний розв'язок можна здобути лише за умови ламінарності течії та простоти конфігурації обтічної поверхні, як наприклад течія між двома паралельними пластинами чи коаксіальними циліндричними поверхнями, одна з яких рухається відносно іншої зі сталою швидкістю (течія Куетта), а також напірна течія в круглій трубі (течія Гагена-Пуазейля)[46]. Проте, коли постає задача моделювання реальної, чи наближеної до реальної течії з урахуванням турбулентних ефектів то з'являються труднощі, пов'язані з необхідністю

відтворення різноманітних вихрових структур, що відрізняються як за часовими так і за просторовими масштабами. Вирішення такої задачі аналітичними методами вже не є можливим, а чисельні методи дають прийнятний результат лише на дуже дрібних сітках, та з дуже малим кроком в часі. Тобто для того, щоб відтворити найдрібнішу вихрову структуру з необхідною точністю треба залучити велику обчислювальну потужність, проте навіть найпродуктивніші сучасні комп'ютери не дають шуканих розв'язків за адекватний час.

2.2. Класифікація методів моделювання турбулентних течій

Станом на сьогодні, існують три основні підходи до моделювання турбулентних течій (рис. 2.1): **метод прямого числового моделювання** (Direct Numerical Simulation – DNS), **метод моделювання динаміки великих вихорів** (Large Eddy Simulation – LES) та **напівемпіричне моделювання** (Semiempirical Modeling -RANS).

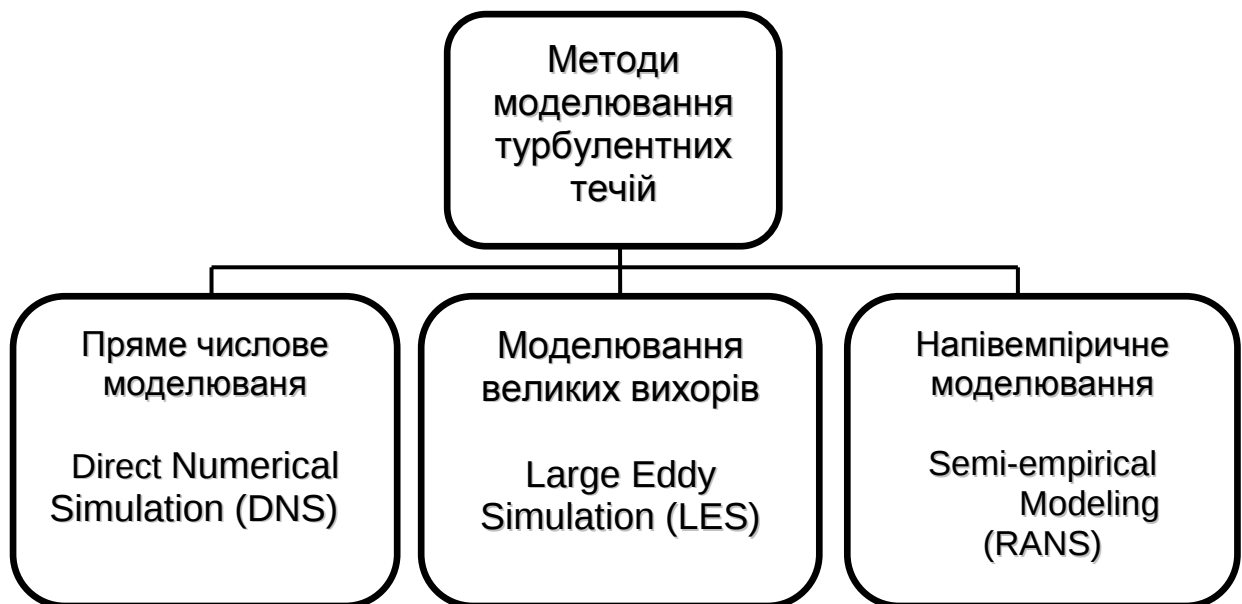


Рис. 2.1 Структурна схема методів моделювання турбулентних течій

Найперспективнішим та найпотужнішим з цих трьох підходів до математичного моделювання турбулентних течій є **метод прямого числового моделювання**. За цим методом система рівнянь Нав'є-Стокса розв'язується у нестационарній постановці з достатньо малою дискретизацією як за простором, так і у часі, при цьому метод не потребує жодних припущень щодо характеру турбулентної течії чи розкладу основних характеристик руху на осереднену та пульсаційну складові. Результатом роботи методу слугує розв'язок системи рівнянь Нав'є-Стокса, який повністю відтворює переважну більшість тонкостей турбулентної течії. Подальше опрацювання дозволить шляхом опрацювання та осереднення масивів даних отримати складові тензору напружень Рейнольдса, за допомогою яких стає можливим знаходження дифузних коефіцієнтів(турбулентної в'язкості, теплопровідності тощо). Специфіка цього методу, щодо потреби значних обчислювальних потужностей робить його вкрай дорогим інструментом для передових наукових досліджень, та майже недоступним для широкого використання по вирішенню прикладних задач, наприклад, у транспортній та енергетичній сферах. Проте результати проведених спроб використання прямого числового моделювання свідчать про його високу точність і працездатність навіть у випадку відсутності доведення єдиності розв'язку системи рівнянь Нав'є-Стокса, окрім того, порівняння цих результатів з достеменно відомими з експериментальних досліджень, підтверджують спроможність самої системи рівнянь коректно описувати властивості, притаманні турбулентному руху рідини чи газу. На сьогоднішній день проведення розрахунків з використанням суперкомп'ютерів та технології паралельних обчислень дозволяє в прийнятні часові строки розв'язати поставлені перед методом задачі для чисел Рейнольдса не перевищуючих десятків тисяч. Проте переваги цього методу не тільки роблять його найперспективнішим, а й стимулюють нарощення обчислювальних потужностей та розвиток комп'ютерних технологій. Метод дозволяє відобразити широкий спектр вихрових структур турбулентності, від

найбільших до найменших завихрень, що відповідають за дисипативний механізм явища турбулентності, це безумовно є головною перевагою методу, але водночас і суттєвим його недоліком, бо саме моделювання маленьких вихорів потребує великої роздільної здатності сітки, досяжної шляхом зменшення одиничної комірки при зростанні числа Рейнольдса, що напряду пов'язано з колосальними потребами в обчислювальній потужності. Згідно оцінкам Moir, Kim кількість вузлів сітки має зростати пропорційно до $Re^{9/4}$. Однак окрім академічного метод все ж має і прикладне застосування і сьогодні. По-перше, DNS дозволяє провести обрахунки зі значною роздільною здатністю в тих невеликих областях течії, де проведення експериментального дослідження не є можливим. По-друге, за допомогою осереднення результатів прямого чисельного моделювання можлива перевірка і уточнення наближень і гіпотез напівемпіричних моделей турбулентності.

Іншим підходом до моделювання турбулентних течій є **метод моделювання динаміки великих вихорів** (Large Eddy Simulation – LES), що є деякою спробою щодо адаптації методу DNS до сучасного стану комп'ютерних технологій з розширенням його можливостей та збереженням його основних переваг. Вперше цей підхід був застосований в 1970 році Дірдорфом (Deardorff, 1970) для моделювання турбулентної течії в каналі, а згодом для моделювання атмосферного приземного шару (Deardorff, 1973). Метод моделювання динаміки великих вихорів базується на експериментальній гіпотезі про незалежність статистичних характеристик великомасштабних турбулентних рухів від молекулярної в'язкості. Згідно цього припущення можлива побудова такої чисельної моделі, що описує нестационарну динаміку відносно крупних вихорів з масштабами, більшими за розмір комірки сітки. Такі вихори вносять основний вклад в енергію турбулентного потоку і визначають взаємодію турбулентності із середнім рухом турбулентності. На відміну від тотального осереднення рівнянь Нав'є-

Стокса методом RANS, про який буде сказано згодом, в методі LES, для позбавлення від дрібномасштабних пульсацій, на етапі постановки задачі вводиться оператор фільтрації за простором, що нівелює переважно короткохвильові складові турбулентного руху. Після застосування операторів фільтрації отримана система рівнянь виявляється незамкненою, оскільки вона містить члени, що описують нелінійні взаємодії великих вихорів з дрібномасштабною турбулентністю, що лежить за межами просторового кроку моделі. Параметризація таких взаємодій, тобто їх обчислення на основі відомої інформації про згладжені флуктуації швидкості (температури, тиску тощо) є центральною проблемою методу моделювання великих вихорів. Такий механізм параметризації прийнято називати підсітковими моделями турбулентності. Універсальний підхід до замикання системи рівнянь Нав'є-Стокса для LES методу поки не знайдений. У результаті динаміка вихрових структур турбулентного обміну з масштабами, що перевищують розмір елементарної комірки сітки, відтворюється відповідними рівняннями, тобто моделюється явно, а вплив підсіткових вихроутворень апроксимується, при цьому обчислювальні витрати необхідні для реалізації такої моделі не повинні залежати від числа Рейнольдса, оскільки немає необхідності явно і точно розраховувати всі дрібні вихори. Таке спрощення дає підстави для сподівань на більший рівень універсальності напівемпіричних моделей, що використовуються в методі LES. Не в останню чергу популяризації метода LES сприяє зростання продуктивності обчислювальної техніки, але, як і DNS, перспективи його впровадження і у теперішній час, є досить сумнівними, та обмежені як ресурсами наявної обчислювальної техніки, так і часовими проміжками, необхідними для виконання обчислень.

Враховуючи на недоліки зазначених вище методів, та значні проблеми теоретичного аналізу і безпосереднього інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса, широкого практичного застосування в сфері дослідження турбулентних течій став підхід, запропонований Рейнольдсом (Reynolds, 1895). Цей підхід

полягає в розкладанні компонент швидкості, тиску та, залежно від задачі, і інших розрахункових змінних (густини, температури, концентрації, тощо)

$\varphi = \{u_1, u_2, u_3, p, c, \dots\}$ на осереднені за часом

$\bar{\phi}_i(x_1, x_2, x_3, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \phi_i(x_1, x_2, x_3, t) d\tau$ та пульсаційні складові

$\varphi' = \{u'_1, u'_2, u'_3, p', \dots\}$, тобто $\phi = \bar{\phi} + \phi'$ з подальшими підстановкою цих

розкладань у вихідну систему рівнянь Нав'є-Стокса і осередненням кожної з отриманих складових рівнянь. Процедура осереднення проводиться на проміжку часу T , який має бути суттєво більшим за період навіть найбільших пульсацій турбулентного руху і, водночас, бути значно меншим за періоди зміни характеристик течії у випадку її нестационарності. Після виконання процедури осереднення, система рівнянь Нав'є-Стокса набуває додаткових членів – кореляцій пульсаційних складових, за рахунок нелінійності. Ці кореляції відповідають в рівняннях додатковим (рейнольдсовим) напруженням, а саме тепловим та дифузійним потокам, обумовленим пульсаціями турбулентного руху, але їх наявність робить отриману систему незамкненою. У результаті виконаних перетворень система рівнянь Нав'є-Стокса набуває вигляду

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \bar{V}) &= \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0, \\ \rho \frac{D\bar{V}}{Dt} &= \rho \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{V} + \bar{\sigma}_{ij}) + \rho \bar{F}_v, \\ C_p \rho \frac{D\bar{T}}{Dt} &= C_p \rho \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{T} \right) = \\ &= \nabla \cdot (\lambda \nabla \bar{T}) - \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \overline{u'_j T'} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho F_T, \\ \rho \frac{D\bar{C}_m}{Dt} &= \rho \left(\frac{\partial \bar{C}_m}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{C}_m \right) = \nabla \cdot (a \nabla \bar{C}_m) - \frac{\partial}{\partial x_j} \rho \overline{u'_j C'_m} + \rho F_{C_m}, \end{aligned} \right. \quad (2.3)$$

де $\bar{V} = \{U_1, U_2, U_3\} = \{U, V, W\}$ – вектор осередненої за Рейнольдсом швидкості, $\bar{T}$ – осереднена за Рейнольдсом температура рідини, $\bar{C}_i$ – осереднена за Рейнольдсом (масова) концентрація m -ї компоненти течії у наближенні скалярної субстанції, a – коефіцієнт дифузії, $\bar{\sigma}_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ ($i, j = 1..3$) – тензор додаткових напружень турбулентного руху (напружень Рейнольдса), $-\rho \overline{u'_j T'}$, $-\rho \overline{u'_j C'_m}$ ($j = 1..3$) – обумовлені турбулентністю додаткові потоки тепла та концентрації m -ї компоненти течії, $\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right] + \sigma_{ij}$ – тензор напружень у турбулентному потоці; $\bar{F}_V$, F_T , F_{C_m} – джерельні члени, що являють собою одиничні розподілені масову силу, джерела тепла та концентрації. У подальшому, з метою спрощення форм запису рівнянь, позначення осереднених температури і концентрації аналогічно введеним вище символам компонентів осередненої швидкості подаватимуться без риски зверху. Також, у подальшому (якщо не зазначено обернене) вважатимемо справедливим $\rho = \text{const}$, тобто припустимо що течія має такі параметри, за яких, стисливістю рідини можна припустимо знехтувати. Після виконання усіх зазначених перетворень та наближень система набуває у скалярно-тензорному поданні наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0, \\ \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + F_{u_i}, \\ C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \right) + F_T, \\ \frac{\partial C_m}{\partial t} + U_j \frac{\partial C_m}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{a}{\rho} \frac{\partial C_m}{\partial x_j} - \overline{u'_j C'_m} \right) + F_{C_m}. \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Дана система здобула усталену аббревіатуру – RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) equations.

Для течій, що характеризуються наявністю переважаючого напрямку розвитку $U_1 \gg U_2, U_3$, є розповсюдженим спрощення пов'язане з нехтуванням в системі рівнянь (2.4) членами, що відповідають за дифузію у домінуючому напрямку. Результатом зазначеного спрощення слугують **усічені рівняння Нав'є-Стокса** (RNS – Reduced Navier-Stokes). Залежно від постановки задачі, використаної системи координат та складових (що видаляються) в правій частині рівнянь, може змінюватись форма подання цього наближення. Серед найрозповсюдженіших представників даного підходу відмітимо наближення тонкого шару, гладкого шару, конічні рівняння, а також різні форми параболізованих систем [47]. Головною метою цих спрощень є максимальна адаптація системи рівнянь до умов конкретної задачі, що розглядається, і, як наслідок, зміна типу розв'язуваної системи, спроможна суттєво зменшити ресурсомісткість числових обчислень за рахунок використання більш ефективного розрахункового методу.

Згідно результатів піонерських досліджень Прандтля (Prandtl, 1904p.) [46] шляхом нехтування окрім членів поздовжньої дифузії ще й зміною градієнта тиску по нормалі до обтічної поверхні x_2 , отримуємо найпростіший з усіх розглянутих вище випадків – систему рівнянь примежового шару

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \\ \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_i} + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_2} - \overline{u'_i u'_2} \right) + F_{u_i}, \quad (i=1, \dots, 3), \\ C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial T}{\partial x_2} - \overline{u'_2 T'} \right) + F_T, \\ \frac{\partial C_m}{\partial t} + U_j \frac{\partial C_m}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{a}{\rho} \frac{\partial C_m}{\partial x_2} - \overline{u'_2 C'_m} \right) + F_{C_m}, \\ \frac{dp}{dx_2} = 0. \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Наведена система є справедливою в умовах задачі обтікання видовжених тіл у безпосередній близькості до обтічних поверхонь за винятком околу передніх крайок, точок відриву та областей з рециркуляційними зонами.

Кожне спрощення задачі турбулентного руху має певну кількість складових рейнольдсового тензора напружень, що обумовлює побудову та застосування їх модельних представлень у вигляді зв'язку між напруженнями Рейнольдса та характеристиками осередненого руху. Відтворити втрачену в наслідок осереднення інформацію відносно структурних особливостей досліджуваної турбулентної течії тепер можна шляхом встановлення залежностей між її геометричними, фізичними і кінематичними характеристиками та компонентами цього тензора із використанням відомої емпіричної інформації відносно властивостей конкретних типів течій. Коректне моделювання складових тензора рейнольдсових напружень $\overline{\sigma}_{ij}$, а також $\overline{u_i' T'}$ та $\overline{u_i' C_m'}$ становить найголовнішу проблему одного з вивічених часом напрямків сучасних досліджень турбулентності – напівемпіричного моделювання.

Ще один підхід до розв'язання задач по моделюванню турбулентних течій ґрунтується на висвітленому вище підході Рейнольдса і передбачає розв'язування осереднених за часом (RANS) рівнянь Нав'є-Стокса у поєднанні з методом крупних вихорів LES, називається методом від'єднаних вихорів (Detached Eddy Simulation – DES). Цей метод є досить економічним до обчислювальної потужності комп'ютерів і в той же час достатньо точно відтворює характеристики течій з масштабними рециркуляційними зонами. Його ефективність і перспективність побудови комбінованих модельних представлень і відповідних числових методів обумовлена тим фактом, що в його основі лежить використання RANS рівнянь разом із локальною реалізацією LES методу.

Представлені вище методи DNS і LES є сучасними технологіями чисельного моделювання та є значно молодшими за напівемпіричне моделювання. Перша спроба їх практичного застосування була здійснена Moin, Kim у 1980р.[33], проте активне поширення цих методів розпочалося лише з середини останнього десятиліття минулого сторіччя, що обумовлено, насамперед бурхливим розвитком комп'ютерних технологій та нарощуванням доступної обчислювальної потужності зі значно меншою собівартістю довготривалих числових обрахунків. Переважна більшість досліджень проводиться для спрощених конфігурацій течій або для примежового шару. Метод DES є наймолодшим з зазначених методів, вперше з'являється в роботах Ф.Спаларта у 1997р.[34], саме цей підхід демонструє беззаперечні переваги напівемпіричного моделювання на основі RANS рівнянь при його використанні у симбіозі з локально застосованим LES методом. Тому саме RANS моделі є не лише загальноприйнятим зараз підходом, а й перспективним напрямком розвитку.

У своїй роботі [35] Спаларт приводить таблицю, яка наявно демонструє затрати обчислювальних ресурсів, потрібних для реалізації зазначених вище методів при моделюванні турбулентного обтікання літака чи автомобіля разом із прогнозами щодо можливості такої реалізації у майбутньому.

Таблиця 2.1.

Обчислювальні ресурси і перспективи практичного застосування різних методів моделювання турбулентних течій [35].

Метод	Необхідна кількість вузлів сітки	Необхідна кількість кроків за часом	Готовність
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

^{*)} URANS - Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations (нестационарні рівняння Рейнольдса)

З таблиці 2.1 бачимо, що найближчі 40-50 років все ще активно будуть використовуватись саме RANS і DES методи, які потребують застосування напівемпіричних підходів, отже проблема удосконалення технології напівемпіричного моделювання в найближчому майбутньому не втратить своєї актуальності.

Наведене вище порівняння методів DNS, LES, DES та RANS обґрунтовує прийняття рішення у подальшому зосередитися більш детально на методології напівемпіричного моделювання, базисом якої слугують загальні відомості і фундаментальні закони щодо структурних особливостей турбулентної течії, отримані у результаті накопичення, обробки та узагальнення емпіричної інформації на основі методів теорії подібності та розмірності. Перша модель турбулентності, тобто залежність, що встановлює зв'язок між турбулентною в'язкістю та параметрами осередненого руху, належить Прандтлю (Prandtl, 1925), а подальший розвиток теорії напівемпіричного моделювання обумовили визначальні результати досліджень Кармана (von Karman, 1930), Колмогорова (1942), Прандтля (Prandtl, 1945), Ротта (Rotta, 1951) та Клаузера (Clauser, 1954).

2.3. Порівняння класів моделей турбулентності

Як зазначалося в підрозділі 2.1, однією з головних проблем коректного моделювання турбулентної течії є задача встановлення функціональних зв'язків компонентів тензора рейнольдсових напружень, теплових та дифузійних потоків з параметрами осередненої течії. При використанні градієнтного наближення згідно гіпотези Буссінеска ці зв'язки виражаються лінійною залежністю між зазначеними величинами та компонентами тензору швидкостей деформацій, градієнтів температури та концентрації, а пропорційність встановлюється через коефіцієнти турбулентного обміну μ_t , λ_t , a_t . Саме тому суть задачі побудови моделі турбулентності полягає у

визначенні цих величин у відповідності до кінематичних параметрів осередненого руху та геометричних властивостей потоку.

Проведений аналіз літературних джерел щодо різних класів моделей турбулентності дозволяє навести їх порівняльну характеристику, що включатиме в себе їх найсуттєвіші властивості, обмеження, переваги та недоліки.

1. Алгебраїчні моделі є найпростішим з класів моделей турбулентності, що і не дивно, бо водночас вони є найстаршими за віком існування, проте також вони найкращим чином адаптовані до властивостей дрібномасштабної квазіізотропної турбулентності внутрішньої області пристінних зсувних течій. Останній факт напряму пов'язаним з тим, що головний принцип, використаний при їх побудові щодо можливості визначення характеристик турбулентності локальними характеристиками осередненого руху, найкращим чином забезпечується саме в безпосереднім околі стінки. Обмеженість застосовності цього принципу у зовнішній області, де переважають великомасштабні вихрові структури є головним недоліком моделювання турбулентності на алгебраїчному рівні. Виходячи з зазначеного недоліку область застосовності цих моделей обмежується течіями, що характеризуються наявністю переважаючого напрямку розвитку, типовими прикладами яких є примежові шари та струменеві течії. Крім того, ще однією проблемою використання алгебраїчних моделей є їх двохшарова структура, яка не тільки віддзеркалює різномасштабність пристінної турбулентності, але й створює необхідність зшивання модельних представлень турбулентної в'язкості для різних областей. Тому перспективним є напрямок пов'язаний з побудовою єдиних модельних формул, з використанням асимптотичних властивостей гіперболічного тангенса, прикладами яких є моделі Мішеля і Мовчана. Проте завдяки своїй простоті та достовірності закладених в них фізичних припущень, щонайменше у внутрішній області, алгебраїчні моделі все ж мають можливість до ефективного врахування ряду ефектів управління, що мають пристінну локалізацію.

2. Напівалгебраїчні моделі долають зазначений вище недолік алгебраїчних моделей шляхом реалізації ідеї врахування передісторії турбулентних течій. Однак, напрямок напівалгебраїчного моделювання навряд чи можна вважати перспективним для подальшого розвитку, хоча б через те що навіть на теперішній час вже існують більш досконалі шляхи подолання цієї проблеми, наприклад, використання диференціальних моделей.

3. Диференціальні моделі є доволі різноманітними і можуть суттєво відрізнитись як рівнем деталізації, кількістю задіяних в них транспортних рівнянь, окрім цього деякі з цих моделей не використовують у своїй структурі нефізичний коефіцієнт турбулентної в'язкості ν_t , тобто є вільними від застосування у формули Буссінеска. Саме цей клас моделей турбулентності інтенсивно розвивається протягом останніх десятиріч, пов'язане це в першу чергу з бурхливим розвитком комп'ютерних технологій та революційному збільшенню їх обчислювальної потужності. Характеризуючи в цілому досягнутий за ці роки прогрес можна зробити висновок, що ряд моделей, зокрема, модель Спаларта-Аллмараса переносу ν_t та $k-\varepsilon$ модель досягли рівня промислових стандартів. На відміну від алгебраїчних, остання модель характеризується гарним рівнем адаптованості до властивостей великомасштабної турбулентності зовнішньої області, що робить її безпосереднім конкурентом напівалгебраїчним моделям. Проте і ця модель має свій суттєвий недолік, він полягає в низькій достовірності передбачення властивостей турбулентності поблизу обтічної поверхні, де порушується принцип локальної рівноваги, закладений при побудові модельних представлень правих частин її транспортних рівнянь. Слід зауважити, що даний недолік цілком успішно долається іншою, $k-\omega$ моделлю, але вона, на відміну від $k-\varepsilon$, є надзвичайно чутливою до межових умов на зовнішній межі, через що відтворення при її застосуванні характеристик

великомасштабної турбулентності зовнішньої області може бути далеким від реальності.

4. Диференціальні моделі переносу напружень Рейнольдса демонструють найбільший рівень точності та інформативності результатів у порівнянні з іншими моделями турбулентності але є більш вимогливими до обчислювальних ресурсів і потребують певної адаптації під кожні конкретні умови досліджуваної задачі. Зокрема, структура моделі містить рівняння переносу ізотропної дисипації ε , практичне застосування МПРН (аналогічно до $k - \varepsilon$ моделі) обумовлює у тій чи іншій мірі необхідність узгодження його структури з особливостями течії в околі стінки. Слід зауважити, що надмірна структурна складність моделі переносу напружень Рейнольдса при тому самому рівні достовірності підходів які використовуються при моделюванні за допомогою більш простих диференціальних моделей, змушує шукати певні компроміси та шляхи спрощення, такі як алгебраїчні моделі напружень Рейнольдса.

5. Перспективи подальшого розвитку диференціальних моделей охарактеризуємо, процитувавши точку зору одного з найавторитетніших вчених-гідродинаміків СРСР, а потім Росії, учня і послідовника Л.Г.Лойцяньського – Ю.В. Лапіна, яка була ним сформульована в одній з останніх його публікацій (2004р.) [44]: “...відкритим залишається, як і раніше, питання щодо перспектив моделей турбулентності, які базуються на рівняннях для компонент тензора напружень Рейнольдса. Поряд з не вирішеною проблем замикання цих рівнянь, тобто моделювання окремих їх членів, незначною, але принциповою в практичному плані, є складність реалізації цих моделей. Тим не менш, при оцінці подальших перспектив опису турбулентності в рамках рейнольдсового підходу навряд чи придатні крайні оцінки. ... У той самий час не можна не помітити, що процес моделювання окремих членів цих (модельних) рівнянь, що багато в чому заснований на тих чи інших фізичних передумовах і міркуваннях розмірності,

як правило, орієнтований не на увесь спектр масштабів, а лише на той чи інший їх інтервал”.

6. Зазначена Ю.В. Лапіним неуніверсальність диференціальних моделей турбулентності по відношенню до спектру масштабів турбулентного руху стала стимулом розробки різних підходів щодо вибору структури характеристик турбулентності, для яких будувалися відповідні рівняння переносу та кількості останніх. Надзвичайно вдалою виявилася спроба Ф. Ментера по локалізації використання двох різних за структурою диференціальних моделей в різних зонах турбулентної зсувної течії, яка отримала назву двозонної $k - \omega$ моделі. Ю.В. Лапін [44] охарактеризував цю модель як “одну з найбільш представницьких сучасних диференціальних моделей”, а причини її успіху він пояснив саме структурними особливостями її побудови: “Висока ефективність цієї, по суті, гібридної моделі, не в останню чергу, зв’язана з використанням у внутрішній (пристінній) області $k - \omega$ моделі, початково орієнтованої на опис дрібномасштабної турбулентності, а в зовнішній області - $k - \varepsilon$ моделі, спрямованої для опису великомасштабних когерентних структур. Чи стануть гібридні моделі одним з основних напрямків подальшого розвитку класичного методу Рейнольдса покаже найближче майбутнє”. Таким чином, ще в 2004р. Ю.В. Лапін передбачав перспективність гібридного принципу побудови моделей турбулентності і навіть прогнозував його можливість стати пріоритетним науковим інструментом вже теперішнього дня в широкому колі методів напівемпіричного моделювання.

2.4. Висновки з розділу 2

1. Наведено систему вихідних рівнянь руху в’язкої рідини та приведено ряд сучасних підходів до її розв’язання у випадку турбулентного режиму, а саме методи прямого числового моделювання (DNS), моделювання

динаміки великих вихорів (LES) та осереднення за Рейнольдсом (RANS). Була проведена порівняльна оцінка вимогливості цих методів до обчислювальних ресурсів та їх застосовності до задач моделювання управління примежовим шаром і доведено переваги методу RANS на даному етапі розвитку технологій числового моделювання.

2. Проведено порівняльний аналіз сучасних класів напівемпіричних моделей турбулентності, визначено можливості та обмеження, притаманні різним їх класам, показано, що алгебраїчні моделі найкращим чином адаптовані до опису внутрішньої області пристінних течій, в той час як диференціальні краще описують динаміку великомасштабної турбулентності зовнішньої області примежового шару чи вільних течій.

3. Після проведення аналізу можливості застосування різних класів напівемпіричних моделей до розв'язання задач моделювання дії засобів управління, був зроблений висновок про найбільшу адаптованість алгебраїчних моделей до врахування ефектів пристінного управління (шорсткість, регулярне мікропрофілювання, інжекція полімерних домішок) і перевагу диференціальних моделей до відтворення дії засобів управління зовнішньою областю, таких як руйнівники великих вихорів.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ОБТІКАННЯ ПЛОСКОЇ ПЛАСТИНИ ЗА УМОВ НЕОДНОРІДНОГО НАГРІВУ

3.1. Постановка задачі

Виходячи з задач дипломної роботи та обраної мети дослідження, було прийняте рішення перевірити спроможність методу неоднорідного нагріву поверхні обтікання регулярно розташованими поздовжніми тонкими нагрівальними елементами, та як наслідку його застосування, появи анізотропії та формування регулярної поздовжньої вихрової структури в пристінній області до розв'язання фундаментальної задачі гідрогазодинаміки зі зменшення опору тертя шляхом регуляризації структури пристінної турбулентності.

Для дослідження впливу неоднорідності на структуру турбулентності в пристінній області було вирішено провести числове моделювання задачі обтікання плоскої пластини за умов її поздовжнього неоднорідного нагріву(рис3.1.).

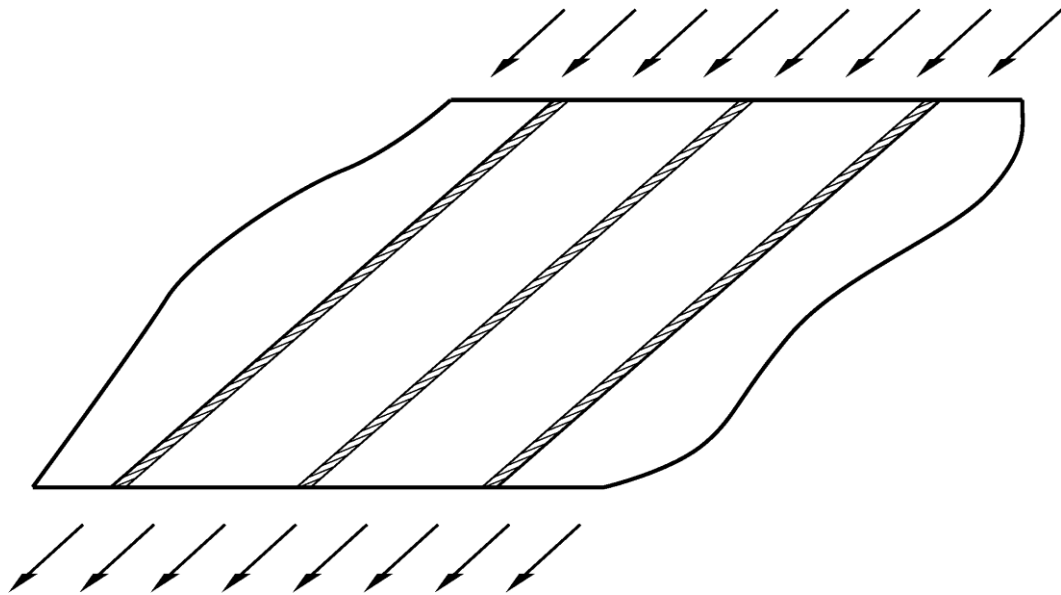


Рис. 3.2. Геометрія задачі обтікання пластини з наявним ефектом неоднорідного нагріву

В результаті аналізу сучасного програмного забезпечення, спроможного до вирішення даної задачі був обраний комерційний пакет ANSYS Fluent 15.0. Параметром, за яким перевірялась ефективність методу управління пристінним рухом був вибраний коефіцієнт опору C_f усереднений за площею поверхні обтікання.

Поставлена задача є симетричною у повздовжньому напрямку, що дозволяє зменшити розрахункову зону до зазначених нижче розмірів, тобто розглядати лише пристінну область між двома нагрівними елементами, що у свою чергу, суттєво скорочує час виконання комп'ютерних розрахунків. В ході числового моделювання задавались геометричні параметри розрахункової області, зокрема довжина пластини була прийнята рівною 1,5 м, ширина – 0,03 м, а висота розрахункової зони – 0,125 м. Для створення ефекту неоднорідного нагріву на пластині були розміщені нагрівні елементи, товщиною 0,005 м, у повздовжньому напрямку пластини протяжністю у всю її довжину, та кроком 0,02 м по її ширині (рис3.2.). В якості матеріалу пластини та нагрівних елементів був взятий алюміній, а обтічною рідиною була обрана вода.

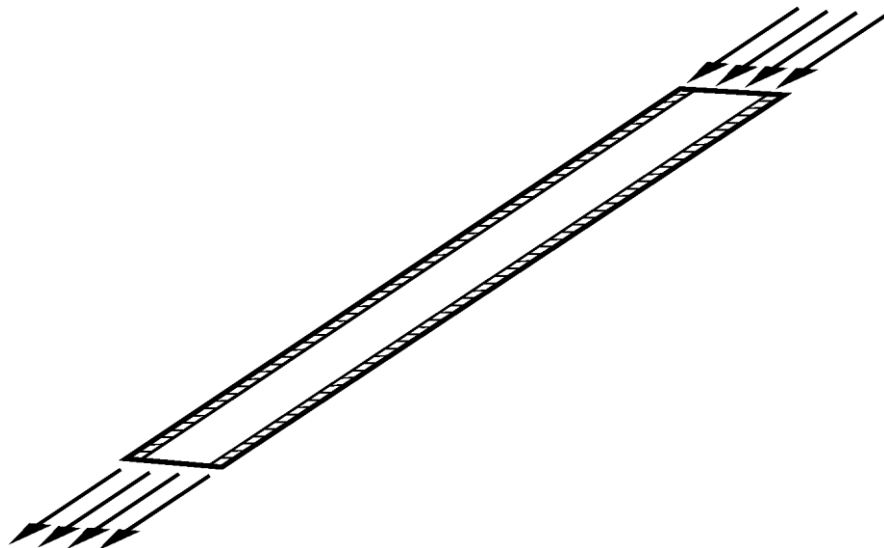


Рис. 3.2. Геометрія модельованої пластини з урахуванням симетрії задачі

Як зазначалося в розділі 1, діапазон режимних параметрів, для яких методи управління зберігають працездатність, є достатньо вузьким, тому

проводилась серія дослідів за різних граничних умов. При дослідженні саме неоднорідного нагріву швидкість набігаючого потоку приймалась рівною 1, 4, 8 м/с, в той же час температура нагрівних елементів змінювалась в діапазоні від 288,15 К до 343,15 К, а температура потоку та самої пластини приймалась рівною 288,15 К. Також для перевірки ефективності саме неоднорідності теплового впливу проводилась серія дослідів з однорідного нагріву усієї пластини до температури 323,15 К при різних значеннях швидкості набігаючого потоку.

Розрахунок модельованої задачі припинявся за умови відсутності змін в сьомому знаку основних параметрів між двома послідовними ітераціями (рис 3.3.).

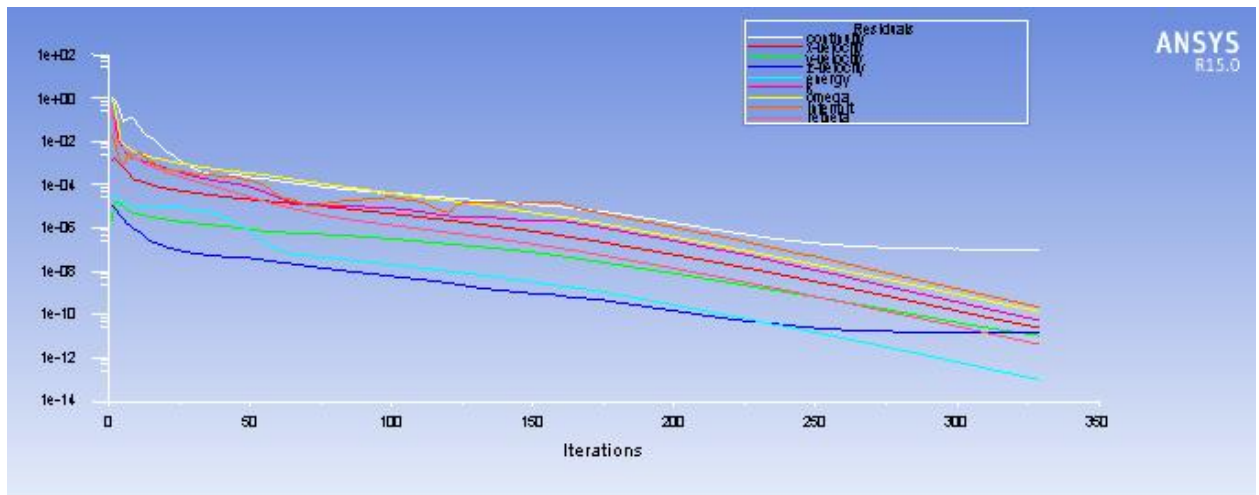


Рис. 3.3. Графік збіжності нев'язок основних параметрів

Дискретизація розрахункової області проводилась в ANSYS Meshing. Розрахункова область розбивалась на паралелепіпеди, зі зменшенням їх розмірів по мірі наближення до обтічної поверхні, що є доцільним, враховуючи на те, що основні ефекти, на які спрямоване дослідження локалізовані саме в пристінній зоні (рис 3.4). Основні параметри дискретизації розрахункової області: кількість елементів моделі обтікання плоскої пластини складала 774384, фактор приросту – 1.1, найменший крок по нормалі 0,5 мм, найбільший 5 мм.

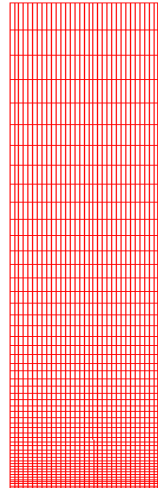


Рис. 3.4. Дискретизація розрахункової області

3.2. Математична модель

Для розрахунку поставленої задачі використовувався метод усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) з замиканням за допомогою напівемпіричних моделей турбулентності. Даний вибір обумовлений, насамперед тим, що обраний підхід дозволяє з досить високою точністю визначити осереднені характеристики турбулентної взаємодії та різноманітні гідрогазодинамічні параметри, такі як, наприклад, шуканий коефіцієнт опору, за прийнятний проміжок часу та при відносно невеликих обчислювальних витратах.

Проведений в підрозділі 2.3 критичний аналіз сучасних моделей турбулентності, зокрема напівемпіричних, дозволив визначити характерні кожному класу можливості та обмеження, що дозволяє об'єктивно оцінити їх спроможність до врахування ефектів управління у внутрішній та зовнішній областях, а також обґрунтовано виробити принципи побудови моделі турбулентності, що буде найкращим чином адаптована до досліджуваної задачі. Перш за все з проведеного аналізу можна зробити висновок про відсутність на сьогоднішній час моделі турбулентності, яка б втілювала в

собі можливість одночасного управління течією як у внутрішній, так і у зовнішній області. Причина полягає в обмежених можливостях кожного з розглянутих вище класів моделей по відношенню до відтворенню динаміки турбулентності різних масштабів. Згідно викладеної вище аргументації логічним є рішення про використання для проведення досліджень однієї з найбільш досконалих та вживаних гібридних моделей турбулентності, а саме моделі Ментера SST(Menter's Shear Stress Transport). Модель Ментера побудована на ідеї об'єднання двох диференціальних моделей з однаковою кількістю рівнянь переносу, що можливо реалізувати, переписавши $k-\varepsilon$ модель в термінах $k-\omega$ моделі, після чого розв'язанню підлягає система з двох рівнянь, коефіцієнти якої та джерельні члени по мірі віддалення від поверхні плавно перемикаються від тих, які притаманні $k-\omega$, до відповідних $k-\varepsilon$ моделі. В результаті коректне відображення вільних зсувних течій зовнішньої області відбувається за рахунок використання $k-\varepsilon$ моделі, а правильний опис особливостей пристінної турбулентності забезпечується використанням $k-\omega$ моделі. Окрім теоретичної аргументації, на користь вибору моделі Ментера свідчить велика кількість незалежних досліджень аналогічних задач моделювання проведених за допомогою саме цієї моделі турбулентності.

3.3. Результати моделювання

В результаті числового моделювання процесу обтікання плоскої пластини, при умові її неоднорідного нагріву, за допомогою програмного пакету ANSYS Fluent 15.0 з використанням моделі турбулентності transition-SST, були отримані значення фундаментальних фізичних величин, за рахунок аналізу котрих можна зробити певні висновки щодо фізичної структури потоку та спроможності неоднорідного нагріву, як методу управління пристінною турбулентністю, до розв'язання актуальної в теоретичному та

практичному аспектах задачі гідродинаміки зі зменшення опору тертя. На рисунку 3.5 зображене температурне поле модельованої задачі, яке наглядно демонструє що неоднорідність нагріву пластини вносить найбільшу модифікацію набігаючого потоку саме поблизу обтічної поверхні, та не встигає суттєво змінити температуру потоку в зовнішній області. Це в першу чергу пов'язане зі співвідношенням швидкостей процесу теплообміну та набігаючого потоку, зі значущим переважанням останньої, що є позитивним моментом при вивченні саме впливу неоднорідності, зважаючи на те, що зміна густини примежового шару не встигає досягти суттєвих значень.

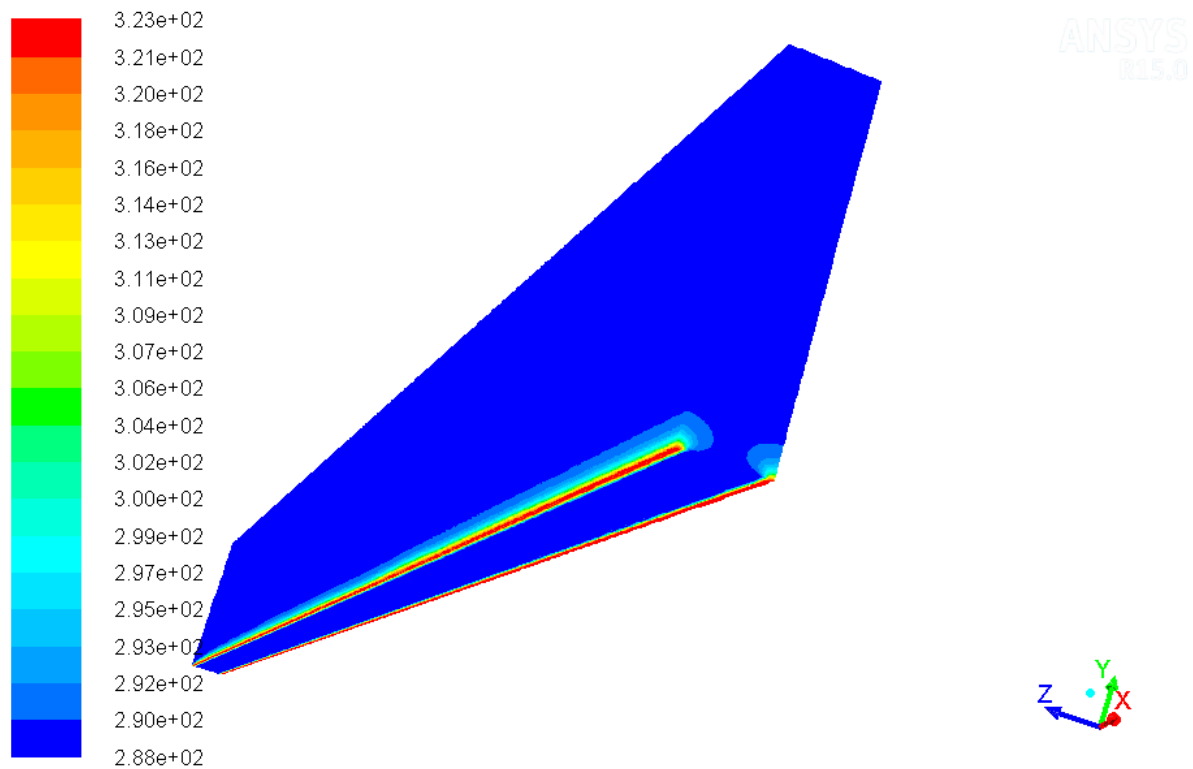


Рис. 3.5. Температурне поле

Неоднорідність, створена зазначеним способом нагріву, призводить до появи локальних змін багатьох фундаментальних фізичних величин, таких як тиск, в'язкість, густина, швидкість, кінетична енергія турбулентності та інші. Зокрема, поява регулярної періодичної неоднорідності густини потоку за напрямком, перпендикулярним його розповсюдженню, призводить до

анізотропії рухомого середовища, в результаті чого формуються регулярна повздожня вихрова структура в пристінній області. Що наглядно демонструється полем кінетичної енергії турбулентності (рис 3.6), яке й свідчить про появу повздожнього турбулентного ядра в пристінній зоні.

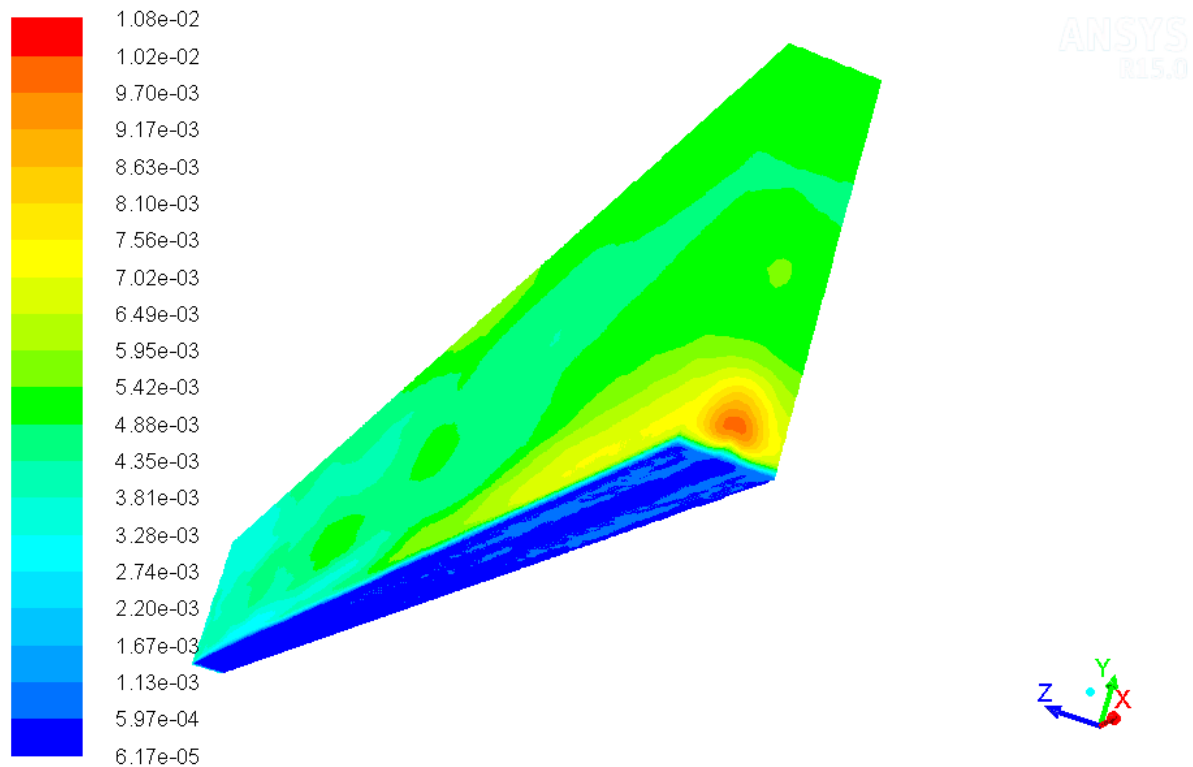


Рис. 3.6. Поле значень кінетичної енергії турбулентності

Кінетична енергія турбулентності безпосередньо пов'язана з величиною вектора швидкості, тому вплив сформованого турбулентного ядра простежується також і на полі швидкостей (рис 3.7). З ілюстрації бачимо, що модифікації подлягає саме пристінна область, течія ж в зовнішній області залишається немодифікованою. Також поле швидкості дозволяє спостерігати вплив внутрішнього тертя та в'язкості на профіль швидкості, що є характерним для Ньютонівських рідин, зокрема для води, та цілком відповідає фізиці задач обтікання тіл.

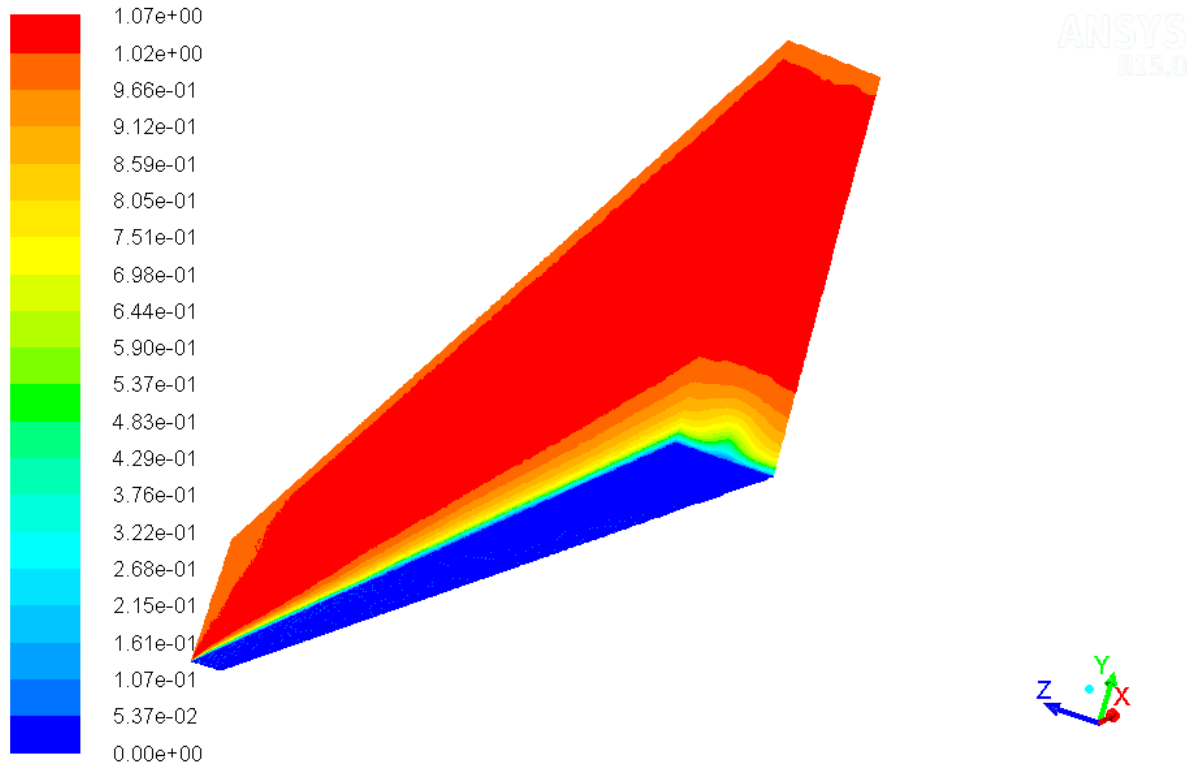


Рис. 3.6. Поле швидкостей

3.4. Результати дослідження опору тертя

Наступним кроком дослідження була перевірка спроможності описаного вище впливу, та результуючої регуляризації потоку до вирішення задачі зі зменшення опору тертя. Як зазначалося, виміри коефіцієнту опору тертя проводились за різних швидкостей потоку: 1, 4, 8 м/с що відповідає різним режимам руху середньостатистичного сучасного водного транспорту, також змінювалась температура нагрівальних елементів в діапазоні від 288,15 К до 343,15 К.

Перший етап дослідження був присвячений визначенню коефіцієнту опору тертя пластини без нагріву. Температура пластини приймалась рівною температурі набігаючого потоку 288,15 К, швидкість набігаючого потоку 1 м/с, отримане значення коефіцієнту опору рівне 0,00821662. В подальшому дослідженні шуканий коефіцієнт визначався за тієї ж швидкості обтікання, а

температура змінювалась в зазначеному діапазоні з кроком в 10 К. Мінімальне з отриманих значень коефіцієнту опору відповідало температурі в 323,15 К та було рівне 0,00790336, тому в околі цієї температури значення коефіцієнту опору були додатково визначені з більш дрібним кроком за температурою. Отримані результати представлені на рисунку 3.7 у вигляді залежності коефіцієнту опору тертя від температури.

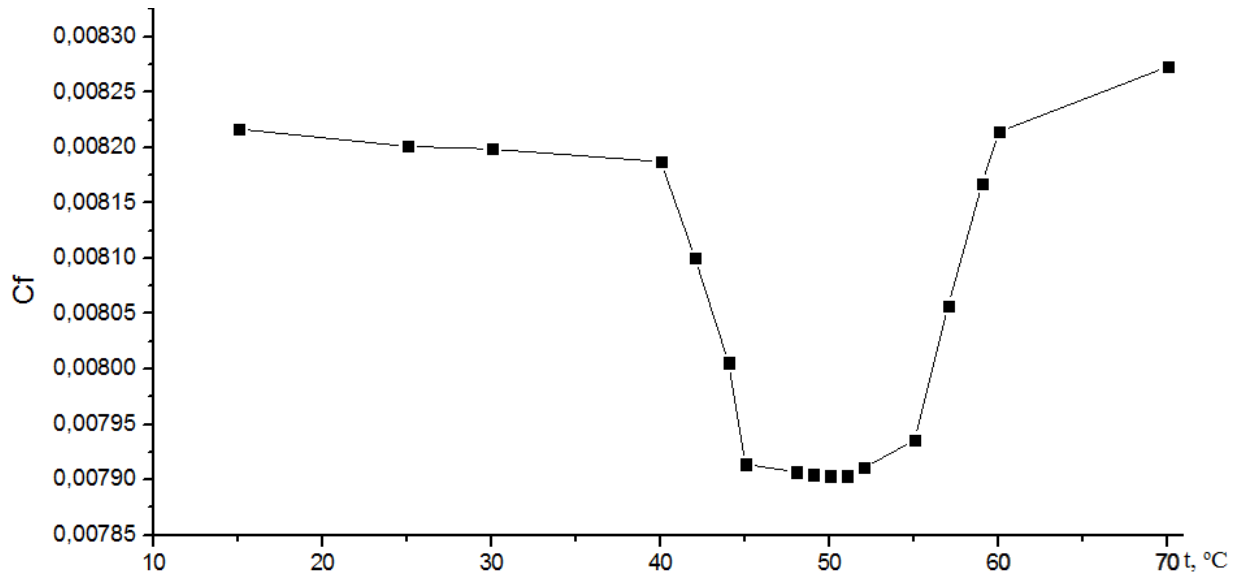


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнту опору тертя від температури при швидкості набігаючого потоку в 1 м/с

Графічна залежність 3.7. ілюструє різкий спад коефіцієнту опору тертя починається за температури 313,15 К, значення близьке до мінімального досягається при 318,15 К і залишається практично незмінним аж до 328,15 К, а потім вже за температури 333,15 К повертається до значень близьких тим, що відповідають пластині без нагріву. Як зазначалося в першому розділі, позитивний ефект від застосування методів управління пристінним рухом обмежений досить вузьким діапазоном режимних параметрів, в даному випадку доцільним є використання методу неоднорідного теплового впливу в інтервалі температур нагрівальних елементів від 318,15 К до 328,15 К, що дає вигреш в коефіцієнту опору тертя в 4,53% у порівнянні зі значенням за відсутності нагріву.

Аналогічна серія дослідів була проведена для швидкостей набігаючого потоку рівних 4, 8 м/с, але в цих випадках, на відміну від попереднього, бажаний ефект від використання неоднорідного нагріву не тільки не спостерігається, а й навпаки негативно впливає на значення коефіцієнту опору тертя, що ще раз підтверджує тези висунуті в першому розділі.

Отже, залежність коефіцієнту опору тертя від температури при швидкості набігаючого потоку в 4 м/с, зображена на рисунку 3.8., свідчить про те, що в заданому діапазоні температур, значення коефіцієнту опору спочатку дещо спадають, проте цього недостатньо для визнання використання методу в цьому випадку доцільним. В подальшому, при збільшенні температури значення шуканого коефіцієнту починає зростати, досягає максимуму при температурі в 323,15 К, та потроху спадає, проте все ж залишається більшим за значення при відсутньому нагріві.

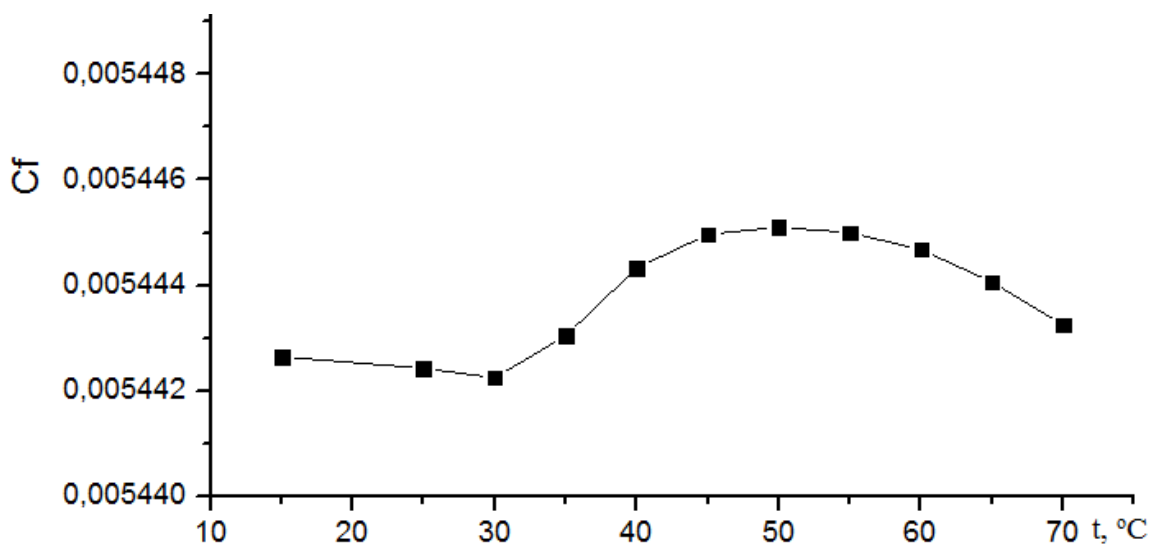


Рис. 3.8. Залежність коефіцієнту опору тертя від температури при швидкості набігаючого потоку в 4 м/с

Отримана залежність коефіцієнту опору тертя від температури при швидкості набігаючого потоку в 8 м/с (рис. 3.9.) є певною мірою подібною до тої, що була отримана при швидкості набігання 4 м/с, але має більш чітко виражений максимум в околі 318,15 К. Та, на відміну від попередніх

випадків, не має температурних параметрів за яких ефект від використання методу управління був би позитивним.

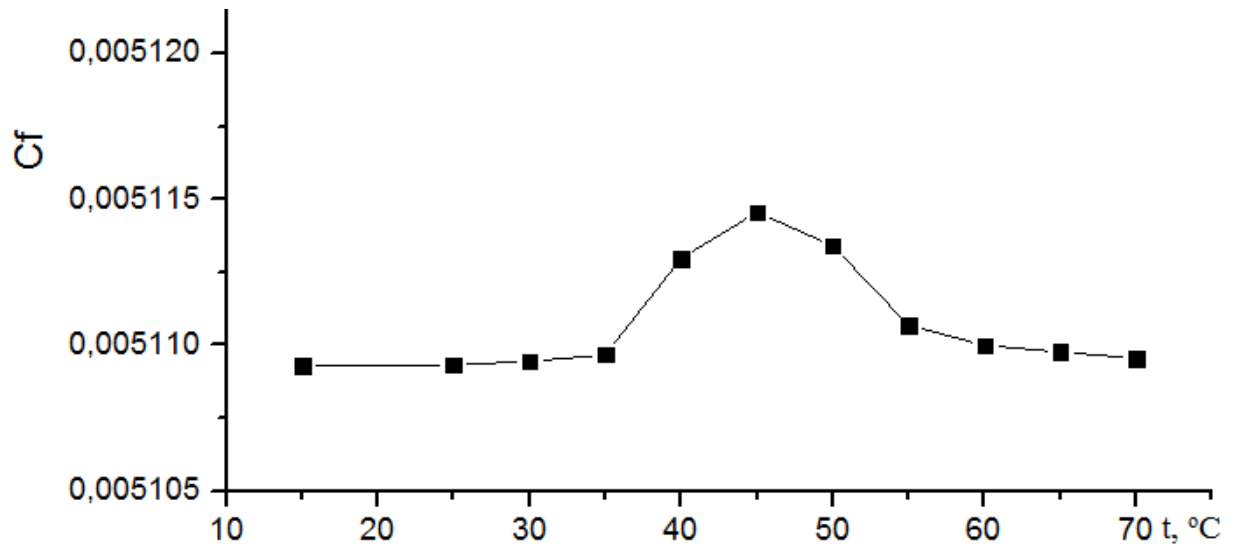


Рис. 3.9. Залежність коефіцієнту опору тертя від температури при швидкості навігаючого потоку в 8 м/с

Наступним кроком досліджень була перевірка висунутої гіпотези, про те, що позитивний ефект від застосування методу, є напряду пов'язаним саме з неоднорідністю нагріву, а не з локальною зміною густини потоку в пристінній області. Для цього проводилось моделювання однорідного нагріву усієї пластини до 323,15 K, тобто до температури, за якої, при швидкості навігання 1 м/с спостерігається найбільший позитивний ефект від неоднорідного температурного впливу. За цих умов, отримане значення коефіцієнту опору тертя було рівне 0,00817471, тобто менше за значення при відсутності нагріву(виграш в 0,5%), але більше за значення при неоднорідному нагріві до цієї ж температури. Отриманий результат не тільки підтверджує зазначену вище гіпотезу, але й є безперечно дуже важливим, з точки зору енергозбереження. Він свідчить про те, що кращий результат від застосування демонструє метод, за якого потрібно нагріти лише дві тонкі смужки, на відміну від методу який передбачає нагрівання усієї обтічної поверхні. Зрозуміло, що у такому випадку енергетичні затрати на нагрів

будуть співвідноситись пропорційно площі нагрівальних елементів, тобто у відношенні 1 до 3 на користь неоднорідного нагріву. Аналогічні досліди були проведені і для інших швидкостей обтікання, але отримані значення коефіцієнту опору тертя майже співпадають зі значеннями при відсутньому нагріві, тому використання такого впливу також не є доцільним.

3.5. Висновки з розділу 3

В процесі дослідження ефективності управління турбулентними пристінними течіями шляхом неоднорідних впливів в околі обтічної поверхні було проведене числове моделювання задачі обтікання плоскої пластини при її неоднорідному нагріві.

Результатом моделювання слугували поля основних розрахункових величин, на базі аналізу яких була здійснена спроба опису фізики модельованого процесу.

Дослідження ефективності методу теплового неоднорідного впливу проводилось в контексті спроможності зазначеного методу до вирішення актуальної задачі гідрогазодинаміки зі зменшення опору тертя. Для різних значень режимних параметрів, таких як швидкість набігання і температура нагріву, визначався коефіцієнт опору тертя. Було визначено, що до позитивного ефекту метод призводить за умов швидкості набігаючого потоку рівної 1 м/с та температури нагрівальних елементів в діапазоні від 318,15 К до 328,15 К, що дає вигоду за коефіцієнтом опору тертя в 4,53% у порівнянні зі значенням за відсутності нагріву.

Після проведення моделювання однорідного нагріву пластини була підтверджена гіпотеза про виключну важливість саме неоднорідного впливу, як з точки зору раціональності, та і з точки зору питання енергозбереження.

ВИСНОВКИ

В даній дипломній роботі було проведено дослідження ефективності управління турбулентними пристінними течіями шляхом неоднорідних впливів в околі обтічної поверхні та здійснене числове моделювання задачі обтікання плоскої пластини при її неоднорідному нагріві. В результаті дослідження були отримані наступні результати:

1. Розроблено методологію числового моделювання турбулентних течій над поверхнями з неоднорідними повздовжніми нагрівальними елементами.

2. При швидкості набігаючого потоку 1 м/с, та температурі неоднорідного впливу рівній 50 °С спостерігається максимальний позитивний ефект від застосування зазначеного методу, який виражається в зменшенні коефіцієнту опору тертя на 4,5% відносно випадку, без нагріву.

3. При швидкостях набігаючого потоку 4 та 8 м/с навпаки спостерігається негативний ефект від використання неоднорідних теплових впливів в діапазоні температур від 15 °С до 70 °С.

4. Проведене порівняння ефекту від неоднорідного та однорідного теплового впливу на потік, та встановлено, що при меншій в 3 рази енерговитраті, метод неоднорідного періодичного нагріву дає вигоду за коефіцієнтом опору тертя в 9 разів у порівнянні зі значенням за відсутності нагріву.

5. Виконане дослідження показало, що неоднорідне нагрівання поверхні обтікання модифікує саме турбулентні властивості течії, а вже через них – течію у цілому. Тому для очікуваних умов експлуатації дослідженого методу управління пристінною течією треба підбирати відповідні значення температури нагрівання та кроку між нагрівачами, що можливо ефективно здійснювати на основі розробленої методології.

6. Подальші дослідження будуть проводитися у напрямку вивчення впливу кроку розташування поздовжніх нагрівальних елементів на параметри

турбулентної течії та, зокрема, параметри турбулентного руху і коефіцієнт опору тертя з метою встановлення оптимальних співвідношень температурного та геометричного факторів, що характеризують нагрівальні елементи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Shmitt V. Réduction de la traînée de l'avion de transport subsonique. Tendances et perspectives actuelles // L'Aéronautique et l'Astronautique. 1988. Vol. 2, No. 129. P. 4–18.
2. Truong V.T. Drag Reduction Technologies // Aeronautical and maritime research lab report DSTO–GD– 0290, Australia. June 2001. 121 p.
3. Корнилов В.И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2005. Т. 12, № 2. С. 183–208
4. Гад-эль-Хак М. Управление отрывом пограничного слоя. Обзор / М. Гад-эль-Хак, Д.М. Бушнелл // Современное машиностроение: серия А. – 1991. – № 7. – С. 2–35.
5. Коллинз Ф.Г. Применение акустических методов и пилообразных выемок на передней кромке для управления пограничным слоем на поверхности крыла / Ф.Г. Коллинз // Ракетная техника и космонавтика. – 1981. – Т. 19, № 3. – С. 3–5.
6. Suter S.P. Laminar boundary layer control by combined blowing and suction in the presence of roughness: Proc. of AIAA 4th Propulsion Joint Specialist Conference (Cleveland, OHIO, June 10–14, 1968) / S.P. Suter, G.F. Anderson // AIAA Paper №68–641.
7. Корнилов В.И. Моделирование турбулентных пограничных слоев на теле вращения при наличии разрушителей крупных вихрей / В.И. Корнилов, Е.А. Шквар // Теплофизика и аэромеханика. – Изд-во ИТТФ СО РАН. – 2010. – № 3. – С. 335–348.
8. Ламинаризация пограничного слоя // Обзор ЦАГИ. – М.: ЦАГИ. – 1968. – № 246. – 119 с.
9. Бабенко В.В. Пограничный слой на эластичных пластинах / В.В. Бабенко, М.В. Канарский, В.И. Коробов. – К.: Наук. думка, 1993. – 264 с.

10. Кэри (мл.) О.М. Уменьшение сопротивления твердой поверхности с помощью волн малой амплитуды контура поверхности / О.М. Кэри (мл.), Л.М. Вайнштейн, Д.М. Бушнел, под ред. Г.Р. Хью; [пер. с англ.] // Снижение вязкостного трения: сб. докладов симпозиума (Даллас, 1979). Под ред. В.Я. Нейланда. – М.: Машиностроение. – 1984. – С. 165–188.

11. Джонстон Дж.П. Струйные вихрегенераторы – средство управления отрывным течением / Дж.П. Джонстон, М. Ниси // Аэрокосмическая техника. – 1990. – № 12. – С. 13–20.

12. Исаев С.А. Идентификация самоорганизующихся смерчеобразных структур при численном моделировании турбулентного обтекания лунки на плоскости потоком несжимаемой жидкости / С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, П.А. Баранов // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, Вып. 1. – С. 28–35.

13. Hwang D.P. A Proof of Concept Experiment for Reducing Skin Friction by Using a Micro-Blowing Technique / D.P. Hwang // AIAA Paper 97-0546 (NASA TM-107315). – 1997.

14. Hwang D.P. Experimental Evaluation of Penalty Associated With Micro-Blowing for Reducing Skin Friction / D.P. Hwang, T.J. Biesiadny // AIAA Paper 98-0677. – 1998.

15. Hwang D.P. Microblowing Technique Demonstrated to Reduce Skin Friction [Электронный ресурс] / D.P. Hwang, T.J. Biesiadny. – Режим доступа: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/RT1997/5000/5850hwang.htm>.

16. Майу Дж.Дж. Влияние частоты колебаний пластины на течение в возмущаемом турбулентном пограничном слое / Дж.Дж. Майу, М.Х. Чжень, Дж.Ч. Чжоу // Аэрокосмическая техника. – 1991. – № 9. – С. 60–68.

17. Никулин В.А. Модель пристеночной турбулентности в слабых растворах полимеров / В.А. Никулин // Физическая гидродинамика. – Киев–Донецк: Вища школа. – 1990. – С. 34–46.

18. Разработка метода управления пограничным слоем при помощи движущихся поверхностей для самолета, летающего на больших углах атаки

/ В.Дж. Моди, Дж.Л.К. Сан и др. // Ракетная техника и космонавтика. – 1983. – №1.

19. Сенгупта Т.К. Расчет двумерных турбулентных пограничных слоев на жестких и движущихся волнистых поверхностях / Т.К. Сенгупта, С.Г. Лекудис // Аэрокосмическая техника. – 1986. – № 2. – С. 135–143.

20. Холмс Б.Дж. Проблема снижения сопротивления. Естественную ламинаризацию течений уже можно применять на практике / Б.Дж. Холмс // Аэрокосмическая техника. – 1988. – № 7. – С. 146–148.

21. Себиси Т. Конвективный теплообмен. Физические основы и вычислительные методы / Т. Себиси, П. Брэдшоу; [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1987. – 590 с.

22. Уилкинсон С.П. Гибридная поверхность для отсасывания воздуха из турбулентного пограничного слоя / С.П. Уилкинсон, Р.Л. Эш, Л.М. Вайнштейн // Снижение вязкостного трения: сб. докладов симпозиума, (Даллас, 1979). Под ред. Г.Р. Хью; пер. с англ. под ред. В.Я. Нейланда. – М.: Машиностроение. – 1984. – С. 249–263.

23. Чжан С. Численный расчет турбулентного сдвигового течения в изотермической модели теплообменника / С. Чжан, А.С.М. Соуза // Современное машиностроение. Сер. А. – 1990. – № 7. – С. 25–33.

24. Шрюсбери Дж.Д. Численный расчет обтекания экспериментального профиля с управляемой циркуляцией на основе решения уравнений Навье-Стокса / Дж.Д. Шрюсбери // Аэрокосмическая техника. – 1990. – № 3. – С. 117–124.

25. Boiko A.V. Strategy of the flow MEMS control at laminar-turbulent transition in a boundary layer / A.V. Boiko, V.V. Kozlov // IUTAM Symp. on Mechanics of Passive and Active Flow Control (Goettingen, 7–11 Sept. 1998). – Proc. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. – 1998. – P. 203–208.

26. Deitsch S. Drag Reduction by Injection / S. Deitsch, A. Fontaine, M. Money, H. Petrie // 6th Symposium on Smart Control of Turbulence (March 6–9,

2005, Tokyo). – 2005. – 20 p. – Режим доступа: <http://www.nmri.go.jp/turbulence/PDF/symposium/FY2004/Deutsch.pdf>.

27. Gowen R.A. Heat and momentum transfer from smooth and rough surfaces / R.A. Gowen, J.W. Smith // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1968. – Vol. 11. – P. 1657–1673.

28. Hilbig H. Variable wing camber control for civil transport aircraft / H. Hilbig, H. Wagner // *ICAS – 84-5.2.1*. (Переклад: Адаптивное крыло для гражданских самолетов) // *Техническая информация ЦАГИ: серия Авиационная и ракетная техника*. – 1986. – № 14. – С. 9–12.

29. Lamer J.E., Frink N.T. Aerodynamic features of designed strake-wing-configuration. (Переклад: Аэродинамические характеристики проектируемых крыльев с наплывами) // *Экспресс информация: сер. Авиастроение*. – № 38. – 1982. – С. 9–19.

30. Reneaux J. Réduction de la traînée des avions de transport par laminarité étendue: 24-ème Colloque d'Aerodynamique Appliquée (Poitiers, 26–28 octobre 1987) / J. Reneaux. (Переклад: Снижение сопротивления пассажирских самолетов с помощью ламинаризации) // *Техническая информация ЦАГИ: серия Авиационная и ракетная техника*. – 1989. – № 6 (1604). – С. 1–14.

31. Webber G.W. Wing tip devices for energy conservation and other purposes – experimental and analytical work in progress at the Lockheed-Georgia company / G.W. Webber, T. Dansby // *Canadian Aeronautics and Space Journal*. – 1983. – V. 29, № 2. – P. 105–120.

32. Шквар Є.О. Математичне моделювання турбулентних вихрових структурних особливостей в пристінних течіях / Є.О. Шквар, Д.М. Зінченко, В.В. Зілінка, М.А. Саченко, В.В. Кравченко, С.О. Шевченко // *Матеріали Міжнародної інтернет-конференції ММАР-2013*. – Харків: ХНАДУ, 2013. – С. 63-66.

33. Moin P. On the numerical solution of time-dependent viscous incompressible fluid flows involving solid boundaries / P. Moin, J. Kim // *J. Comp. Phys.* 35, 381. – 1980.

34. Spalart P.R. Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid, RANS/LES approach. In Liu, C. and Liu, Z. (eds) *Advances in DNS/LES* / P.R. Spalart, W.-H. Jou, M. Strelets, S.R. Allmaras // *Proceedings of 1st AFOSR International Conference on DNS/LES* (Ruston, LA, August, 4–8, 1997). – Greyden Press: Columbus, OH. – 1997. – P. 137–147.

35. Spalart P.R. Strategies for turbulence modeling and simulations / P.R. Spalart // *4-th International Symposium on Engineering Turbulence Modeling and Measurements. FRANTOUT&CCAS, Porticcio Ajaccio, (Corsica, France, May 24-26, 1999).* – 1999.

36. Касьянов В. А. Исследование ЭГД-течений с приложением к задачам управления пограничным слоем и преобразования энергии // *Дис. докт. техн. наук.* — Киев: КИИГА. 1970, 604 с.

37. Hasio F.B., Shyu J.Y. Influence of internal acoustic excitation upon flow passing a circular cylinder // *Journal of Fluids and Structures.* 1991. V. 5. P. 427–442.

38. Bera J-C., Comite-Bellot G., Sunyach M. Controle par jet pulse du decollement d'une couche limite turbulente, *C.R .Acad. Sci.Paris, t. 326, Serie II b,* 1998. P. 859–865.

39. Авраменко А.А. Групповые методы в теплофизике / А.А. Авраменко, Б.И. Басок, А.В. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 2003. – 483 с.

40. Повх И.Л. Особенности турбулентной структуры потоков с добавками поверхностно-активных веществ и полимеров / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, П.В. Асланов // *Проблемы турбулентных течений.* – 1987. – С. 152–162.

41. Воропаев Г.А. Моделирование турбулентных сложных течений / Г.А. Воропаев, Ю.А. Птуха. – К.: Наукова думка. – 1991. – 166 с.

42. Воропаев Г.А. Турбулентный пограничный слой на эластичной поверхности / Г.А. Воропаев, В.В. Бабенко // Гидромеханика. – 1978. – № 38. – С. 71–77.
43. Kutler P. Status of computational fluid dynamics in the United States / P. Kutler, J.L. Steger, F.R. Bailly // AIAA Pap. № 87-1135. (Переклад: Развитие методов вычислительной аэродинамики в США) // Техническая информация ЦАГИ: сер. Авиационная и ракетная техника. – 1990. – № 6. – С. 1–10.
44. Лапин Ю.В. Статистическая теория турбулентности (прошлое и настоящее – краткий очерк идей) / Ю.В. Лапин // Проблемы турбулентности и вычислительная гидродинамика (к 70-летию кафедры «Гидроаэродинамика»): научно-технические ведомости. – 2004. – № 2. – С. 1–34.
45. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер; [пер. с англ.]. – М: Мир. – Т. 1. – 1990. – 384 с.
46. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Изд. иностр. лит., 1956. – 528 с.
47. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер; [пер. с англ.]. – М: Мир. – Т. 1. – 1990. – 384 с.