

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Малюги Володимира Сергійовича

**“Нестационарні задачі обтікання з урахуванням ефектів
випромінювання звуку”,**

яку представлено на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

Аналіз сучасної наукової літератури дозволяє зробити висновок про те, що останнім часом в наукових дослідженнях в області гідродинаміки стали інтенсивно впроваджуватися сучасні інноваційні технології, пов'язані зі стрімким розвитком обчислювальної техніки. Така тенденція дозволила сформуванню за останні два-три десятиліття новий науковий розділ, який отримав назву обчислювальна гідродинаміка. Мова йде не про проведення практичних обчислень, пов'язаних з постановкою модельних задач, а про нові технології обчислень на сучасній обчислювальній техніці, які пов'язані з законами збереження в природі, записаними в диференційній формі. Ці технології в сучасній науковій літературі отримали назву Direct Numerical Simulation (Пряме чисельне моделювання) і часто їм присвоюється статус лабораторного експерименту.

Однак технології DNS не є простими і вимагають не тільки значних обчислювальних ресурсів, але і величезного інтелектуального внеску, старанності і акуратності для того, щоб технології комп'ютерних розрахунків були стійкими, контрольованими, і забезпечували дослідникам надійні та адекватні результати. У гідродинаміці технології DNS застосовуються сьогодні для складних комплексних течій в областях зі складною геометрією обмежуючих поверхонь.

Дану дисертаційну роботу присвячено виявленню кількісних закономірностей звукових полів, що генеруються при автоколивальному режимі взаємодії гідродинамічної течії з твердими тілами різної геометрії.

Відомо, що нестационарний рух локалізованих вихрових структур та їх взаємодія з твердими поверхнями генерує звукові поля. Рух вихрових структур різного масштабу і їх взаємодія між собою і з твердими тілами є суперпозицією складних обертальних і поступальних рухів, які характеризуються надзвичайно нерегулярною зміною поля швидкості. Це призводить до змін поля щільності, що в кінцевому підсумку є причиною виникнення звуку гідродинамічної природи. Незважаючи на ясність фізичних явищ, що відбуваються в таких течіях, математичний опис звукового поля, випромінюваного реальними когерентними вихровими структурами при взаємодії з твердими поверхнями, являє собою складну наукову задачу і точний її розв'язок в теперішній час відсутній.

Практична значимість та актуальність розв'язку проблеми випромінювання звуку при взаємодії потоку з твердими тілами різної геометрії не викликає сумнівів. Зниження рівнів шумів літальних апаратів і космічної техніки, морських суден різного призначення і геометрії на водній поверхні і на глибині, автомобілів різного типу і призначення, пристроїв вітрової енергетики, різних

турбін, компресорів, вентилів в енергетиці – неповний перелік пристроїв та проблем при їх застосуванні та експлуатації, що потребують модернізації вже сьогодні.

З цих позицій, вирішення проблеми генерації звукових полів у внутрішніх і зовнішніх течіях з урахуванням різних механізмів взаємодії гідродинамічної течії з твердими поверхнями відкриває не тільки нові можливості і перспективи розуміння фундаментальної проблеми генерації звуку в суцільному середовищі, а й представляє певний практичний інтерес.

Актуальність теми досліджень обумовлена широким проявом процесів випромінювання звуку гідродинамічними течіями при взаємодії з твердими поверхнями в природі і техніці. Вивчення, аналіз, встановлення і уточнення важливих кількісних закономірностей процесу випромінювання звуку гідродинамічної природи вимагають сьогодні звернення до нових інноваційних технологій, пов'язаних з проведенням чисельного експерименту на сучасних багатоядерних обчислювальних системах. З цієї причини розробка нових методів і алгоритмів, що описують фізичні процеси в рідинах, представляє сьогодні один із пріоритетних напрямків обчислювальної гідромеханіки. Вирішення цієї проблеми надасть безсумнівну стимулюючу дію при формуванні більш глибокого розуміння особливостей протікання фізичних процесів в складних гідродинамічних системах різного призначення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації були виконані в інституті гідромеханіки Національної академії наук України в рамках держбюджетних тем і фундаментальних досліджень (держ. регист. N0114U000070), проектів (N P519), договорів (N198-16, N124-17, N570-17 с ДП “КБ “Південне” ім. М.Я.Янгеля”).

Метою дисертаційної роботи є виявлення основних закономірностей виникнення стійких автоколивань і процесів випромінювання звуку при взаємодії потоку з твердими тілами різної геометрії.

Об'єктом дослідження є процеси виникнення автоколивань в суцільному середовищі і звукового поля при обтіканні рідиною твердого тіла.

Предметом дослідження є умови та основні закономірності виникнення автоколивань в потоці рідини і загальні характеристики звукових полів при взаємодії потоку рідини з твердими поверхнями складної геометрії.

Методи дослідження. При виконанні дисертаційної роботи використовувалися загальноприйняті моделі суцільного середовища, надійні і коректні чисельні і аналітичні методи розв'язання задач математичної фізики, апробовані сучасні чисельні технології розпаралелювання багатовимірних початково-крайових задач, коректні аналітичні методи математичного аналізу.

Наукова новизна результатів роботи визначається:

- Розробкою і обґрунтуванням алгоритму чисельного моделювання випромінювання звуку гідродинамічними течіями на кластерних суперкомп'ютерах з використанням техніки DNS і LES;
- Уточненням кількісних закономірностей появи процесу автоколивань в течіях при взаємодії з твердими поверхнями різної геометрії;
- Встановленням визначальної ролі зворотніх зв'язків вихрової природи в гідродинамічних каналах при формуванні домінуючих частотних складових звукового поля в течіях з твердими межами;

• Практичними чисельними розрахунками рівнів звукових полів і їх спектральними характеристиками при обтіканні тіл і перешкод різної геометрії потоком в'язкої нестисливої рідини при помірних числах Рейнольдса.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості застосування розроблених в роботі математичних і чисельних моделей процесу взаємодії потоку в'язкої нестисливої рідини при взаємодії з твердими поверхнями складної геометрії, виявлених особливостей звукових полів гідродинамічної природи при формуванні автоколивальних процесів, наведених когерентними вихровими структурами різного масштабу. Графічний матеріал і наведений аналіз фізичних закономірностей генерації звукових полів при взаємодії потоку в'язкої нестисливої рідини з твердими поверхнями при помірних числах Рейнольдса можуть надати певну допомогу в інженерній діяльності при проектуванні пристроїв різного призначення. Результати дисертаційної роботи становлять безсумнівний інтерес для дослідників в області гідромеханіки, акустики, медицини та інших зацікавлених фахівців в різних областях науки і техніки.

Достовірність наукових результатів дисертації забезпечується використанням загальноприйнятих моделей суцільного середовища, коректністю математичної постановки задач і застосуванням надійних чисельних методів для їх розв'язку, контрольованою точністю інтегрування рівнянь руху суцільного середовища та несуперечливістю отриманих результатів відповідним відомим результатам інших авторів, роботи яких опубліковано в національній та світовій науковій літературі.

Структура дисертації. Робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаної літератури та додатку. Робота містить 266 сторінок основного тексту, 93 рисунки і 20 таблиць. Список літературних джерел містить 310 найменувань. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 323 сторінки.

Дисертація розпочинається з анотації, виконаної українською та англійською мовами. Тут автор додатково наводить основні терміни сучасної обчислювальної гідромеханіки і деяку іншу інформацію, яка виявляється досить корисною для потенційного читача при ознайомленні зі вступною частиною дисертаційної роботи. Такий незначний відступ від порядку викладу положень дисертаційної роботи я вважаю в даному випадку виправданим.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету, об'єкт і предмет дослідження, вказані основні методи досліджень, визначено наукову новизну і практичне значення роботи, вказано особистий внесок здобувача, сформульовано перелік міжнародних наукових конференцій і симпозіумів, на яких проведено апробацію основних положень дисертації. Виклад матеріалу і формулювання, наведені в розділі, відповідають вимогам ДАК України до кваліфікаційних робіт.

У першому розділі дисертації автор проводить огляд літературних джерел, формуючи послідовність виконання задачі випромінювання звуку при взаємодії гідродинамічних течій з твердими поверхнями. Наведені в роботі

допущення, пов'язані з течіями при малих числах Маха, дозволили автору для розв'язання задач сформувані два етапи. Перший етап пов'язаний з рішенням гідродинамічної задачі течії в'язкої нестисливої рідини близько твердих поверхонь, результати якої стали вихідними даними для другого етапу, пов'язаного з розв'язанням акустичної задачі генерації хвильових полів гідродинамічної природи.

Основна увага в дисертаційній роботі приділяється методам розв'язання гідродинамічної задачі взаємодії в'язкої нестисливої рідини з твердими поверхнями різної геометрії. При розв'язанні двовимірних задач автор застосовує методи прямого чисельного моделювання (DNS) для розв'язання нестационарної системи рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними початковими і граничними умовами. Для чисельного розв'язку задачі використовувався метод кінцевих об'ємів з використанням схеми другого порядку проти потоку, яка заснована на обчисленні потоку середовища через границі контрольного об'єму, і може бути застосована для неортогональних сіток, включаючи триангулярні системи сіток. Для підвищення точності вкладу конвективних доданків в роботі застосовується один з різновидів чисельних схем класу Total Variation Diminishment (TVD), в якій схема дискретизації залежить від локальної форми розв'язку. При проведенні практичних розрахунків TVD схема було імплементовано в тулбокс з відкритим кодом OpenFOAM (LimitedLinear). При розв'язанні рівняння Пуассона для тиску в дисертації застосовано ітераційну процедуру Pressure Implicit with splitting of Operators (PISO), яку було адаптовано для нестационарних задач гідромеханіки.

При помірних числах Рейнольдса ($Re > 1000$) тривимірною гідродинамічною задачею розв'язувалася з використанням технології LES, яка дозволяє адекватно описати дрібномасштабні вихрові структури одночасно з великомасштабними вихорами, які містять велику частину кінетичної енергії потоку. У розділі обговорюється процедура фільтрації рівнянь руху, яка використовується для виділення когерентних вихрових структур різного масштабу.

У цьому розділі автор обговорює проблеми моделювання пристінкових течій близько твердої поверхні при використанні технології Large Eddy Simulation (LES), проблеми ідентифікації локалізованих вихрових структур, докладно описується методика визначення інваріанта Q тензора ∇U , який дозволяє виділяти області, в яких локальне обертання домінує над розтягуванням.

У заключній частині розділу автор розглядає проблеми і деякі особливості ідентифікації матеріальної поверхні, яка рухається і деформується в процесі складного руху суцільного середовища: Surface Tracking Method для опису двовимірних процесів виділеної рідини і Volume Tracking Method для опису аналогічних тривимірних процесів.

Другий розділ дисертації присвячений вивченню звукового поля еолових тонів, які виникають при обтіканні подовжених тіл потоком суцільного середовища. Автором уточнено значення діапазонів чисел Рейнольдса для безвідривної течії, стаціонарної течії, стаціонарної відривної течії і періодичної відривної течії. Для кожного із зазначених режимів уточнені значення чисел Струхаля. Показано, що коефіцієнти лобового опору і підйомної сили мають

періодичну складову, яка визначається частотою зриву вихрової доріжки Кармана в течії за нескінченим циліндром.

У другій частині розділу дані чисельного розв'язку гідродинамічної задачі використовувалися в акустичній задачі про випромінювання звуку потоком, що обтікає нескінчений циліндр в поперечному напрямку. Показано, що повна акустична потужність еолового тону на вісім порядків менше потужності потоку, що набігає на тіло. Отримано діаграму спрямованості випромінювання звуку гідродинамічної природи. Зокрема, вісь діаграми спрямованості еолового тону, збудженого коливанням підйомної сили, розташовано перпендикулярно до напрямку незбудженого потоку. Вісь діаграми спрямованості еолового тону, збудженого силами лобового опору, збігається з напрямком потоку.

У **третьому розділі** розглядається задача генерації звуку струменем, що набігає на гострий клин. В роботі проведено аналіз динаміки полів завихореності та тиску в перехідному режимі течії, який призводить до появи стійких автоколивань струменя. Зокрема показано, що визначальну роль у автоколивальному процесі струменя грає зворотній зв'язок, який формують когерентні вихрові структури, які виникають близько гострої кромки клину і в процесі самоіндукованого руху здатні рухатися проти течії. При цьому формується різниця тисків на поверхнях клина, що і призводить до появи коливального процесу.

Аналіз даних акустичної задачі підтвердив встановлену раніше загальну закономірність, пов'язану з діаграмою спрямованості еолових тонів, збуджених коливанням підйомної сили і сили лобового опору для досить широкого діапазону значень чисел Рейнольдса. Показано, що результати чисельного моделювання знаходяться в хорошій відповідності до даних лабораторних вимірювань, опублікованих у світовій науковій літературі.

У **четвертому розділі** автор розглядає задачу випромінювання звуку при поперечному обтіканні нескінченного циліндра з плоским спліттером. Автор докладно розглядає особливості динаміки полів завихреності і ліній току течії при формуванні і відриві локалізованих вихрових структур з твердої поверхні. Встановлено, що в даному випадку канал зворотнього зв'язку формується за рахунок різниці тисків на протилежних границях циліндру і спліттеру за рахунок періодичного відриву вихрових структур в течії за циліндром.

В роботі наводяться кількісні залежності основних параметрів течії для спліттерів різної довжини і спліттерів, розташованих під кутом до основного потоку. Показано, що спліттер, розташований уздовж потоку, значно зменшує лобовий опір циліндра і амплітуду поперечних коливань. Встановлено, що збільшення кута атаки спліттера по відношенню до осі течії, порушує періодичність зриву когерентних вихрових структур в течії за циліндром.

П'ятий розділ дисертації присвячено аналізу процесу випромінювання звуку течією в'язкої нестисливої рідини біля сфери. Автор реалізував тривимірний алгоритм чисельного розв'язку тривимірної задачі в досить широкому діапазоні значень чисел Рейнольдса. При малих значеннях чисел Рейнольдса, відповідних ламінарному режиму течії, в роботі застосована технологія DNS, а при великих значеннях чисел Рейнольдса, які відповідають перехідному і турбулентному режимам течії, автор використовував технологію LES.

Аналіз чисельних результатів дозволив автору визначити критичні значення чисел Рейнольдса, при яких відбувається перехід з одного режиму обтікання сфери на інший режим. Встановлено діапазон значень чисел Рейнольдса, при яких в течії виникають режими одночастотних і багаточастотних автоколивань. Показано, що максимум діаграми спрямованості при обтіканні сфери з помірними числами Рейнольдса, спрямований не перпендикулярно до напрямку потоку, а під деяким кутом, близьким до прямого кута. Це призводить до формування антисиметричної вихрової системи. Акустична енергія випромінюється в цьому випадку як в поперечному, так і в поздовжньому напрямках.

Шостий розділ присвячено аналізу особливостей гідродинамічної течії в'язкої нестисливої рідини в плоскому каналі з двома стенозами – вставками, що розташовані поперек каналу, з малим отвором (в порівнянні з шириною каналу) на осі симетрії. Аналіз чисельних результатів показав, що при малих числах Рейнольдса в області між стенозами формується тонкий струмінь, який протікає через отвори в стенозах. При цьому в проміжній області формується система циркуляційних течій, кількість яких і форма займаної області залежать від співвідношення відстаней між вставками і шириною каналу.

Зі збільшенням швидкості течії стійкість струменя порушується, з'являється система локалізованих вихорів, наведене поле швидкості яких призводить до появи автоколивань струменя як на виході другого отвору, так і в проміжній області. Встановлено кількісні співвідношення і профілі швидкості в отворі другого стенозу в залежності від значень чисел Рейнольдса. Окремо проведено аналіз особливостей руху рідини (в проміжній зоні течії) в залежності від ширини каналу в досить широкому діапазоні швидкостей рідини.

У **сьомому розділі** дисертації проведено аналіз звукового поля, що генерується нестационарним потоком рідини за результатами чисельного моделювання, проведеного в шостому розділі дисертаційної роботи. Розв'язок задачі проведено як для однорідного каналу, який знаходиться вниз за течією від другої вставки, так і для області з геометричними неоднорідностями, розташованими вгору за течією відносно другого стенозу.

Показано, що звукове поле, що генерується струменем при малих числах Рейнольдса, має домінуючу частоту, основний внесок в яку вносить третя власна частота першої моди. Якщо швидкість течії перевищує встановлене критичне значення, основний внесок в далеке звукове поле вносить перша мода на першій власній частоті. Встановлено, що в області з малим об'ємом між вставками може наступити режим, в якому домінуючий внесок в звукове поле вносить плоска хвиля на першій власній частоті. Зі збільшенням швидкості течії структура звукового поля істотно ускладнюється. У роботі виявлено випадок, в якому далеке звукове поле визначається п'ятою модою на дев'ятій власній частоті.

Встановлено, що акустична ефективність випромінювання звуку у випадку з дрібними нішами між вставками на три порядки вище в порівнянні з випадком з глибокими нішами при однакових гідродинамічних параметрах течії в'язкої нестисливої рідини.

У восьмому розділі дисертації розглядаються особливості випромінювання звуку потоком рідини в нерегулярному каналі з двома вставками різної геометрії. Зокрема, встановлено загальну закономірність: для зменшення звукової енергії, випромінюваної гідродинамічною течією в каналі зі стенозами, необхідно збільшувати об'єм каналу між вставками і порушувати симетрію отворів в стенозах.

У висновках відображено основні результати дисертаційної роботи.

Текст дисертації написаний досить грамотно і акуратно, цілком логічно. Автореферат написаний цілком докладно, добре проілюстрований і повністю відображає зміст дисертації. Всі основні положення і висновки дисертаційної роботи викладено в авторефераті.

В якості зауважень по роботі необхідно зазначити наступне:

1. Назва дисертаційної роботи “Нестационарні задачі обтікання з урахуванням ефектів випромінювання звуку”, на мій погляд, є невдалою. Словосполучення “... з урахуванням ...” може привести до висновку, що в роботі розглядаються течії зі швидкостями, близькими (або більше) швидкості звуку в суцільному середовищі. У таких задачах на гідродинаміку течій впливають хвильові явища і нестационарні задачі обтікання необхідно розглядати з урахуванням ефектів випромінювання звуку. У даній дисертаційній роботі така проблема не розглядається. Мені здається, назва дисертації, наприклад, в редакції “Нестационарні гідродинамічні і акустичні ефекти при обтіканні гідродинамічними потоками твердих тіл різної геометрії” була б більш вдалою і правильно відображала б змістовну частину дисертаційної роботи.

2. У дисертації розглядаються особливості акустичних полів, що сформовані потоком в'язкої нестисливої рідини при автоколивальному режимі взаємодії рідини з твердими поверхнями. Слід зазначити, що це – не єдине джерело гідродинамічної природи в даній проблемі. Звукові поля випромінюють також локалізовані вихрові структури в безмежному середовищі, а близько границь цей процес протікає більш інтенсивно. Зрозуміло, що звук, що випромінюється вихровими структурами, за інтенсивністю значно менше звуку, що генерується течіями при взаємодії з твердими поверхнями. Більш того, вихровий звук формує широкосмугові звукові поля. Однак в роботі не проводиться якісний аналіз рівнів звукових полів різної природи. Робота виглядала б значно краще, якби такий аналіз був би проведений. Справедливості заради зазначу тільки згадку цієї широкосмугової складової звукового поля в розділі 3.4 на сторінці 136.

3. З тексту дисертації не зрозуміло, який чисельний метод застосовувався при розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса. З яким кроком дискретизації проводилося інтегрування рівнянь за часом? Чи має цей метод стійкість на даній сітці в зазначеному діапазоні значень чисел Рейнольдса? Непрямі оцінки дозволяють зробити висновок про те, що чисельна схема, швидше за все, була стійкою до чисельних збуджень. Проте, умови і параметри чисельного інтегрування нелінійних рівнянь в дисертаційній роботі не наводяться.

4. У сьомому розділі дисертації розглядається задача випромінювання звуку потоком при проходженні двох послідовних стенозов, в якій джерелом звуку є неоднорідності в полі швидкості в другому стенозі (щодо направлення потоку рідини) для правого півпростору (нескінченний канал) і лівого півпростору (камера між стенозами і нескінченний канал). Немає сумнівів в тому, що аналогічним джерелом звукового поля є неоднорідності поля швидкості в лівому стенозі. З якої причини в дисертації не розглядався другий випадок і не приведено суперпозицію акустичних полів цих задач?

5. У третьому розділі дисертації автор розглядає задачу взаємодії гідродинамічної течії з клином, який має розкрив 9.4° . Мені здається, цей розділ роботи слід було б почати з простішого випадку – взаємодії потоку з плоскою пластиною. В цьому випадку можна було б простежити особливості в течії і кількісні залежності звукових полів при збільшенні кута розкриву клиноподібної поверхні. Зауважу, що в інженерній діяльності ці дані мають важливе прикладне значення.

6. Акустичні задачі в дисертаційній роботі розв'язувалися методом часткових областей. При цьому звукове поле в кожній з областей записувалося у вигляді нескінченного ряду за власними функціями. Нажаль, в роботі не коментується процедура редукції нескінченної системи рівнянь. Скільки доданків використовувалося при проведенні практичних обчислень і чи вистачало їх кількості для адекватного опису звукових полів в кутових точках течії?

7. Робота не позбавлена термінологічних неточностей українською мовою. Зокрема, терміни “линія тока”, “функція тока” (російською мовою) в науковій літературі українською мовою застосовуються терміни “лінії току”, “функція току” а не “лінії струму” і “функція струму”, як це використовує автор в дисертації. Такий поділ є правильним, тим самим підкреслюється відмінність між електричним струмом – спрямованим рухом електричних зарядів, від функції току – математична функція, операція ротора від якої визначає векторну функцію (наприклад, поле швидкості нестисливої течії).

8. Деякі рисунки скалярної функції в роботі виконані у вигляді сімейства ізолій (наприклад, рис.2.1, 4.13-4.16, 5.3, 6.2,а, 6.3,а та інші). Однак на рисунках не вказано крок дискретизації ізолій. З цієї причини рисунки, які мають важливі кількісні дані, перетворюються на рисунки якісні. Аналогічно, кольорові рисунки в дисертації (рис.2.2-2.5, 3.3-3.9, 4.2-4.4, 4.6-4.12) повинні мати колірну шкалу так, як, наприклад, показано, на рис.6.2, б, 6.3, б, 6.9-6.11 та інші. Мені здається, потенційну можливість кількісного аналізу даних, наведених на цих малюнках, в даній дисертаційній роботі загублено.

9. Гідродинамічні частини задач в роботі розв'язувалися в безрозмірному вигляді. Однак, при розв'язанні акустичних задач автор проводив процедуру денормування і результати акустичних задач представлені в розмірному вигляді. З якою метою проводилось денормування акустичних задач? Мені здається, цим автор істотно звузив діапазон потенційних читачів, які можуть проявити до цієї роботи професійний інтерес.

Вважаю за необхідне сказати, що висловлені зауваження істотно не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи і не зменшують цінності отриманих в ній результатів.

Основні результати дисертаційної роботи повністю відображені в 31 наукових статтях, з них 11 статей (англійською мовою) опубліковані в провідних міжнародних наукових виданнях, які входять в наукометричну базу даних SCOPUS. Частина результатів роботи обговорювалася на міжнародних наукових фахових конференціях та симпозиумах.

Все вище сказане дозволяє кваліфікувати розглянуту дисертаційну роботу як закінчену наукову роботу, яка в повній мірі задовольняє вимогам п.п. 9, 10 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013р. Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми, має незаперечне наукове і прикладне значення, оскільки містить нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності роблять суттєвий внесок у вирішення важливої науково-прикладної проблеми управління та контролю процесів випромінювання звуку при взаємодії гідродинамічного потоку з твердими поверхнями складної геометрії.

Вважаю, що автор дисертації, **Малюга Володимир Сергійович** заслуговує присудження йому шуканого наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
професор кафедри
Автоматизації проектування енергетичних процесів і систем
Теплоенергетичний факультет,
Київський політехнічний інститут
ім. Ігоря Сікорського

О.А. Гуржій

18 лютого 2018 р.
Київ, Україна

Підпис Гуржія О.А. підтверджую
Учений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



А.А. Мельниченко