

П'ята міжнародна науково-практична конференція

КОМП'ЮТЕРНА ГІДРОМЕХАНІКА

Інститут гідромеханіки

Національної академії наук України

29-30 вересня 2016р.

Київ 2016

Комп'ютерна гідромеханіка: П'ята міжнародна науково-практична конференція; 29-30 вересня 2016 р., Київ: ІГМ НАНУ, 2016. – 78 с.

Голова організаційного комітету:

акад. НАНУ В.Т.Грінченко (ІГМ НАНУ)

Заступник Голови організаційного комітету

чл.-кор. НАНУ Г.О.Воропаєв (ІГМ НАНУ)

Члени програмного комітету:

чл.-кор. НАНУ В.І.Нікішов (ІГМ НАНУ)

чл.-кор. НАНУ В.І.Тимошенко (ІГМ НАНУ)

чл.-кор. НАНУ О.М.Тимоха (ІГМ НАНУ)

проф. О.А.Приходько (ДНУ)

д.т.н. Є.О.Шквар (НТУУ КПІ)

д.ф.-м.н. О.А.Гуржій (НТУУ КПІ)

к.ф.-м.н. Н.Ф.Димитрієва (РМВ відд.мех. НАНУ)

Вчений секретар:

к.ф.-м.н. Н.В.Розумнюк (ІГМ НАНУ)

ЗМІСТ

Алексеев С. В., Приходько А. А. (ДНУ им.О.Гончара, Днепропетровск) ОБЛЕДЕНЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ: ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОФИЛЯ.....	6
Баскова О. О., Воропаев Г. О. (НТУУ “КПИ”, Київ,) ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБОПРОВОДУ З ГОФРОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ.....	8
Буланчук О. Н., Буланчук Г. Г. (ДонГУУ, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь) ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В ПАРКОВЫХ ЗОНАХ.....	10
Воропаев Г. А., Загуменный Я. В. (ИГМ НАНУ, Киев) ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СЕТОК.....	12
Воропаев Г. А., Розумнюк Н. В., Загуменный Я. В., Сирош Е. А. (ИГМ НАНУ, Киев) ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ВНУТРЕННЕГО ТЕЧЕНИЯ.....	15
Воскобійник В. А., Воскобойник О. А., Степанович В. М., Воскобійник А. В., Романенко П. Ю. (ИГМ НАНУ, Київ) ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТЕЧІЇ НАД НАХИЛЕНОЮ ОВАЛЬНОЮ ЛУНКОЮ.....	16
Воскобойник В., Редаелли А., Чертов О., Фиоре Б., Воскобойник А., Терещенко Л., Сирик С., Лукерини Ф. (ИГМ НАНУ, Киев, Миланский технический университет “Politecnico di Milano”, Милан, Италия, , НТУУ “КПИ”, Киев) ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ШУМ ОТКРЫТОГО И ПОЛУЗАКРЫТОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ДВУХСТВОРЧАТОГО КЛАПАНА СЕРДЦА.....	18
Горбань І.М. (ИГМ НАНУ, Київ) ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕВОЛЮЦІЇ ДОННОЇ ПОВЕРХНІ В РУСЛОВИХ ПОТОКАХ.....	20
Городецька Н. С., Щербак Т. М., Нікішов В. І. (ИГМ НАНУ, НТУ, Київ) ТРАНСФОРМАЦІЯ ПОВЕРХНЕВИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ НА НЕОДНОРІДНОСТІ ДОННОЇ ПОВЕРХНІ.....	22
Гринченко В. Т. (ИГМ НАНУ, Киев) КОМПЬЮТЕР И НАУКА.....	24
Гуржий А. А., Никифорович Е. И., Кордас О. И., Черний Д. И. (НТУУ “КПИ”, ИГМ НАНУ, Киев, Королевский технологический институт КТН, Стокгольм, Швеция, КНУ им.Т.Г.Шевченко, Киев) МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	25
Дешко А. Е. (ИГМ НАНУ и ГКАУ, Днепропетровск) ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ.....	27
Димитрієва Н. Ф. (ИГМ НАНУ, Київ) МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВИХРОВОЇ ТЕЧІЇ БІЛЯ ЛУНКИ У ВІДКРИТОМУ ПАКЕТІ OPENFOAM	29

Дубик Я. Р., Антонченко В. О. (ІПП ім.Г.С.Писаренко НАНУ, Київ) ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ СРЕДЫ.....	31
Зибольд А. Ф. (Донецк) ВЛИЯНИЕ СИММЕТРИИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ: ВИХРИ ТЕЙЛОРА И ВОЛНИСТЫЕ ВИХРИ.....	33
Краснопольська Т. С., Печук Є. Д., Спектор В. М. (ІГМ НАНУ, Київ) ХАОТИЧНІ ХРЕСТОПОДІБНІ ХВИЛІ НА ВІЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ РІДИНИ У ПРЯМОКУТНОМУ БАСЕЙНІ.....	35
Мадерич В., Ковалець І., Терлецька К., Бровченко І. (ІПММС НАНУ, Київ) МОДЕЛЮВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН СИСТЕМИ ЧОРНОГО І АЗОВСЬКОГО МОРІВ ТА ТУРЕЦЬКИХ ПРОТОК.....	37
Малюга В. С., Вовк І. В. (ІГМ НАНУ, Київ) ГЕНЕРАЦІЯ ЗВУКА ПРИ НАТЕКАННІ ЗАТОПЛЕНОЇ СТРУИ НА КЛИН.....	38
Малюга В. С., Голиченко А. Л. (ІГМ НАНУ, КНУ ім.Т.Г.Шевченко, Київ) ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ. ПРИМЕРЫ ТЕЧЕНИЙ В КОНЕЧНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ.....	39
Оверко В. С., Яснопольская Н. В. (ІПММ, Славянск, ПМГМУ ім.І.М.Сеченова, Москва) ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В БИФУРКАЦИИ СОННОЙ АРТЕРИИ.....	40
Онанко Ю. А., Андрущенко В. О., Продайвода Г. Т., Вижва С. А., Онанко А. П., Попов С. А., Хоменко Р. В., Шабатура О. В. (КНУ ім.Т.Г.Шевченка, Київ) АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ “KERN-DR” ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТИКИ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ.....	42
Онанко Ю. А., Андрущенко В. О., Продайвода Г. Т., Вижва С. А., Онанко А. П., Попов С. А., Хоменко Р. В., Шабатура О. В. (КНУ ім.Т.Г.Шевченка, Київ) ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ “KERN-DR” ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТИКИ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ.....	44
Островерх Б. Н., Потапенко Л. С. (ІГМ НАНУ, УЦМЗР, Київ) ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ГИДРОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ.....	46
Письменный Е. Н., Терех А. М., Баранюк А. В., Рева С. А. (НТУУ “КПІ”, Київ) ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И АЭРОДИНАМИКИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ВНУТРИ ВИНТООБРАЗНЫХ ТРУБ.....	48
Приходько А. А., Артеменко Н. Ю., Толочьянц Г. Э., Арсенюк М. С. (ДНУ ім. Гончара, ГП «КБ Южное», Днепропетровск) ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РДТТ.....	50
Редчиц Д. А. (ІТСТ НАНУ, Днепропетровск) КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ВБЛИЗИ ЭКРАНА.....	52

Рогачев В. А., Баранюк А. В., Рева С. А. (НТУУ “КПИ”, Киев,) ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ КРУГЛОЙ ТРУБЫ ПРИ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ.....	54
Розумнюк Н. В. (ИГМ НАНУ, Киев) МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИНФЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДУШКИ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ	56
Терлецька К., Мадерич В., Бровченко І. (ІПММС НАНУ, Киев) КЛАСИФІКАЦІЯ ТИПІВ ВЗАЄМОДІЇ ВНУТРІШНІХ ПООДИНОКИХ ХВИЛЬ ІЗ ТРАПЕЦІДАЛЬНИМ ШЕЛЬФОМ.....	58
Ткаченко Л. В., Нікішов В. І. (ІГМ НАНУ, Киев) ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНОСУ ДОМІШОК У ПРИМЕЖОВОМУ ШАРІ У КРУГОВІЙ ТЕЧІЇ КУЕТТА	60
Тимошенко В. И. (ИГМ НАНУ и ГКАУ, Днепр) ОДНОРОДНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИСТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЗАТОПЛЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО ПРИ ПОДАЧЕ ВОДЫ В ТЕЛО СТРУИ.....	62
Фомін В. В., Хомицький В. В., Терещенко Л. М., Абрамова Л. П., Харченко А. Г., Нікінін І. А., Кудибин І. Б. (МГІ, Севастополь, ІГМ, Київ) МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОГО ХВИЛЮВАННЯ В РАЙОНІ ДАМБИ ГИРЛА БИСТРЕ РІЧКИ ДУНАЙ.....	64
Хотенко О. О., Хотенко І. М. (ІМ ім.С.П.Тимошенка НАНУ, Київ) СУЧАСНІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ.....	66
Черний Д. И., Воскобойник А. А., Воскобойник В. А. (КНУ ім.Т.Г.Шевченко, ИТГИП НАНУ, ИГМ НАНУ, Киев) ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ.....	68
Шеховцов А. В. (ИГМ НАНУ, Киев) МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ИНЕРЦИОННОЙ И НЕИНЕРЦИОННОЙ КОМПОНЕНТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ ОРНИТОПТЕРА.....	70
Danevskiy D. O., Shkvar E. O. (NTUU “KPI”, Institute of Physics and Technology, Kyiv, Ukraine, Zhejiang Normal University, College of Engineering & College of Vocational and Technical Education, Jinhua, China) TURBULENT BOUNDARY LAYER OVER SURFACE WITH MICROPOROUS SECTION.....	72
Strelyayev O. Yu., Shkvar E. O. (NTUU “KPI”, Institute of Physics and Technology, Kyiv, Ukraine, ²Zhejiang Normal University, College of Engineering & College of Vocational and Technical Education, Jinhua, China) TURBULENT WALL FLOW CONTROL BY MEANS OF REGULAR HETEROGENEOUS HEATING.....	74
Tovkach S. S., Shkvar E. O. (NAU, Kyiv, Ukraine, Zhejiang Normal University, College of Engineering & College, of Vocational and Technical Education, Jinhua, China) PARALLEL CUDA-BASED COMPUTING TECHNIQUES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF SCALING THE TURBULENT SHEAR FLOWS MODELING.....	76

ОБЛЕДЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ: ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОФИЛЯ

С.В. Алексеенко, А.А. Приходько
Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара

При полете самолетов в неблагоприятных метеорологических условиях существует риск образования наледи на его поверхностях. Ледяные наросты изменяют геометрию и шероховатость профилей, могут привести к уменьшению подъемной силы и угла срыва потока на крыльях, элементах хвостового оперения, а также вызвать потерю продольной устойчивости и управляемости летательного аппарата в целом.

С целью обеспечения безопасности полетов при проектировании летательного аппарата возникает необходимость оценки влияния обледенения поверхности в заданных условиях на его аэродинамические характеристики, а также в разработке и оценке эффективности системы защиты от обледенения. Современный этап развития вычислительной техники позволяет при решении проблемы обледенения наряду с летными испытаниями и наземными экспериментами использовать методы численного моделирования. Это дает возможность с одной стороны значительно сократить количество необходимых экспериментов, и тем самым удешевить и ускорить проектные работы, а с другой стороны значительно расширить возможный диапазон исследуемых параметров.

Известные программные продукты LEWICE, ONERA2D, TRAJICE и целый ряд других позволяют моделировать процессы обледенения летательных аппаратов. При описании внешнего потока, как правило, в этих программах используют уравнение потенциала, а для расчета пограничного слоя применяют интегральный метод с использованием эмпирических и полуэмпирических соотношений. С одной стороны, такие инструменты просты, позволяют в относительно небольшие сроки проводить достаточно большое количество расчетов, покрывающее весь исследуемый диапазон определяющих параметров, очень хорошо протестированы и откорректированы с использованием многочисленных экспериментальных данных и официально признаются в процессе сертификации. Однако с другой стороны, предполагая несжимаемость и используя одномерные приближения, они пренебрегают предысторией развития потока, имеют ограниченное применение в случае достаточно больших скоростей и сложных форм ледяных наростов (из-за наличия локальных трансзвуковых зон, градиентов давления, отрыва потока), конфигураций с мультителами. Так же такой подход не учитывает влияние микронеровностей нарастающей наледи на структуру течения и, соответственно, не позволяет определять аэродинамические характеристики профилей с наличием ледяных наростов.

Целью данной работы является создание математической модели, учитывающей вязкость и сжимаемость воздушно-капельного потока и описывающей процессы обледенения аэродинамических профилей с учетом микронеровностей на поверхности льда, и, таким образом, позволяющей оценивать влияние образующихся ледяных наростов на аэродинамические характеристики профиля крыла.

Для расчета параметров набегающего потока применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса вязкого сжимаемого газа. При описании турбулентности использована модифицированная модель турбулентности Спалларта-Алмараса. Движение капель описано с помощью модели взаимопроникающих сред. Математическая модель позволяет вычислить поток влаги, выпадающей на обтекаемую

поверхность. На основе термодинамической модели нарастания льда определяется форма существования влаги, рассчитывается масса накопленного льда и шероховатость поверхности. Влияние шероховатости учитывается с помощью модифицированных соотношений, определяющих масштаб турбулентности, вихревую вязкость, а также граничные условия на стенке для турбулентной вязкости.

При реализации методики использованы метод контрольных объемов, расщепления и неявная разностная схема.

На основе разработанной методики были выполнены расчеты обтекания профиля крыла НАСА 0012 под различными углами атаки для чистого профиля и с различными значениями высоты шероховатости. Оценено влияние шероховатости поверхности на структуру обтекания профиля, распределение коэффициентов давления, трения и теплоотдачи, а также подъемную силу и лобовое сопротивление, угол срыва потока. Проведено сравнение полученных результатов с известными экспериментальными и расчетными данными.

Разработанное программно-методическое обеспечение может быть использовано наряду с натурными и наземными экспериментами для моделирования процесса образования ледяных наростов в заданных метеорологических условиях и оценки влияния таких наростов на эксплуатационные характеристики летательных аппаратов с учетом шероховатости поверхности.

ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРУБОПРОВОДУ З ГОФРОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ

Баскова О.О., Воропаєв Г.О.

НТУУ «КПІ»

Різні види структурування обтічних поверхонь є розповсюдженим методом інтенсифікації теплообміну. Гофрування поверхні дозволяє істотно збільшити ефективність роботи теплообмінного обладнання (ТОА) за рахунок збільшення збурень на обтічних поверхнях, при цьому незначно підвищує гідравлічний опір [1], вирішує ряд технологічних проблем [2]. Метою дослідження є визначення залежності теплогідравлічних параметрів внутрішньої течії від геометричних характеристик гофрів, числа Рейнольдса і фізичних характеристик теплоносія. В доповіді представлено результати чисельного моделювання течії в трубі з гофрованою вставкою, геометричні характеристики якої приведені на Рис.1, при перехідних числах Рейнольдса та різнонаправлених температурних напруженнях із заданням залежності в'язкості рідини від температури.

Моделювання проводилося при наступних граничних умовах: на вході постійна швидкість та температура, представлено результати для двох швидкостей 0,03 м/с та 0,1 м/с, температур теплоносія $T_f = 283^\circ \text{K}$, 333°K , температур стінок: $T_w = 333^\circ \text{K}$, 283°K . На виході задавалися м'які граничні умови. В якості теплоносія використовувалася вода.

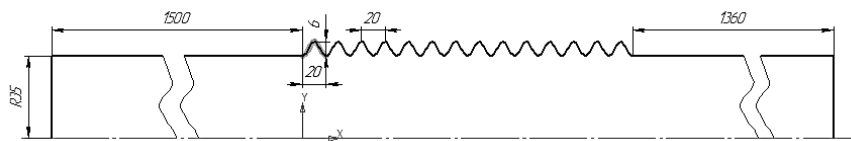


Рисунок 1 – Геометрія досліджуваної ділянки труби

В ході проведення чисельного експерименту на підставі пакету Fluent Ansys були отримані наступні результати. При розглянутих значеннях температурних навантажень 50° гідравлічний опір істотно залежить від знаку цих навантажень, а саме, нагріває стінка чи охолоджує носій (Рис.2).

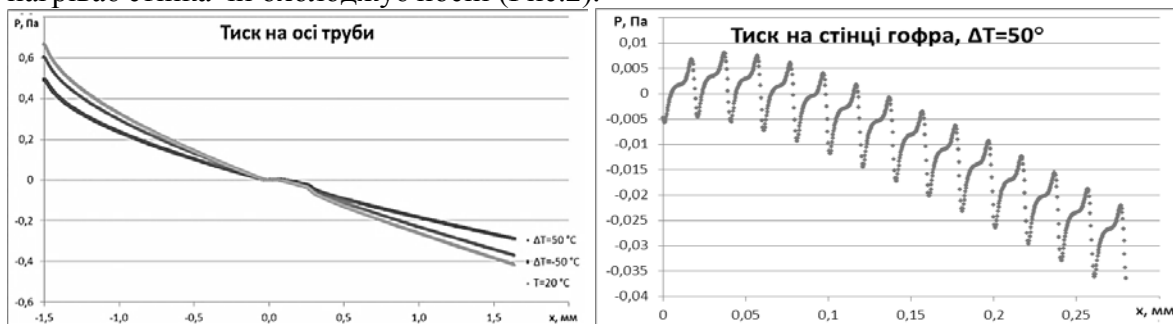


Рисунок 2 – Розподіл тиску на осі труби при різних температурних навантаженнях
($Re = 4430$)

Найбільш ефективно, з точки зору теплообмінних характеристик, гофрування «працювало» при холодному теплоносії і нагрітих стінках: так, тепловий потік був вищим на 23% при швидкості 0,03 м/с, і різниця зростає при збільшенні швидкості та складає 33% для швидкості потоку 0,1 м/с. Саме для даних умов спостерігався найбільш заповнений профіль швидкостей (Рис. 3), що обумовлено градієнтом в'язкості рідини.

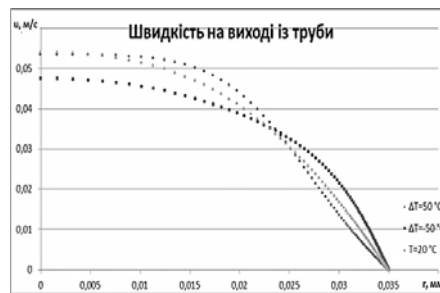


Рисунок 3 – Профілі швидкості на виході із гофрованої труби при різних температурних навантаженнях ($Re = 4430$)

Ділянці труби із гофруванням відповідає невелике плавне збільшення тиску на осі труби, що повністю відповідає закону Бернуллі, але на стінці гофра спостерігається аперіодична зміна тиску відповідно геометрії поверхні та здвигових напружень (Рис.4).

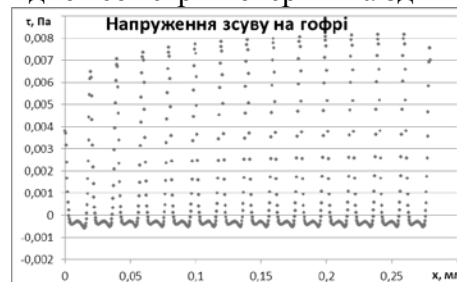


Рисунок 4 – Напруження зсуву на гофрованій частині труби при $\Delta T=50^\circ$ ($Re = 4430$)

На нагрітих стінках зсувні напруження більші, ніж на холодних, але якісно структура течії не відрізняється. Всередині гофрів існує циркуляційна течія і, відповідно, зсувні напруження змінюють знак та досягають максимальних значень у місцях з'єднання одного гофра з наступним. У вершині гофра в зоні циркуляційної течії локальні коефіцієнти тепловіддачі є меншими майже у три рази ніж у [3], в той час як в зоні максимальних напружень вони суттєво вищі. При порівнянні із даними роботи [4] осереднені по всьому гофру коефіцієнти тепловіддачі були майже однаковими при однакових числах Re . При зростанні чисел Re стійка зона циркуляційної течії порушується і необхідно переходити до розв'язання задачі у нестационарній постановці.

Отже, ефективність інтенсифікації тепловіддачі залежить як від геометрії гофрування труби, так і від напрямку теплового потоку та числа Re . Також при моделюванні теплогідравлічних процесів з великими тепловими навантаженнями необхідно враховувати залежність фізичних властивостей теплоносія від температури.

Літературна:

1. Попов И. А. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена: монография / И.А.Попов, Х.М.Махьянов, В.М.Гуреев; под общ. ред. Ю.Ф.Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.
2. Дрейцер Г.А. О некоторых проблемах создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // Новости теплоснабжения. №5. 2004.
3. Noor N. Heat Transfer and Pumping Power Using Nanofluid in a Corrugated Tube / Shafi Noor, M. M. Ehsan, Sayedus Salehin, A.K.M. Sadrul Islam // 19th Australasian Fluid Mechanics Conference, Melbourne, Australia, 2014.
4. Pradip R. B. Experimental Investigation on Convective Heat Transfer Analysis in a Circular Tube with Internal Threads of Different Pitches / R. B. Pradip, K. K. Dinesh // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). – 2013. - Volume-3, Issue-1. – P. 280-284.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В ПАРКОВЫХ ЗОНАХ

О. Н. Буланчук¹, Г. Г. Буланчук²

¹ДонГУУ, г. Мариуполь

²ГВУЗ «ПГТУ», г. Мариуполь

Существенное влияние на распространение пылевых загрязнений и газовых выбросов автотранспорта и промышленных предприятий вблизи жилых массивов оказывают аэродинамические процессы в парковых зонах. Поэтому при моделировании процессов распространения загрязняющих примесей необходимо учитывать наличие парковых зон. Актуальным является оптимальное расположение самой парковой зоны и влияние различных типов посадки деревьев на распространение примесей.

При численном решении данной задачи использовалась модель идеальной жидкости, которая хорошо апробирована при моделировании городской застройки [1], [2],[3]. Для парковых зон авторами была реализована программная среда моделирования (деревья моделируются правильными шестиугольниками), которая позволяет реализовать следующие действия:

- с помощью графического манипулятора задавать и модифицировать городскую застройку (количество и формы домов);
- с помощью графического манипулятора задавать источники загрязнений (тип, форму, количество частиц, длительность выброса);
- с помощью графического манипулятора задавать расположение и размеры деревьев.

Преимущества такого подхода:

1. сходящие вихри моделируют значительную завихренность непосредственно в окрестности парковой зоны;
2. количество отрывов небольшое, что ускоряет расчеты и позволяет быстро отслеживать влияние различных конфигураций парковой зоны на характер распространения загрязнений;
3. изменяя размер и расстояние между шестиугольниками (деревьями), можно исследовать различные типы посадки деревьев в парковой зоне.



Рисунок 1. Расчет при наличии посадки
внутри двора

Выброс загрязняющей примеси осуществляется на протяжении промежутка времени $t = 1.7$, примесь полагается пассивной. В качестве тестовой была выбрана такая

конфигурация городской застройки и положения источника загрязнения, когда при отсутствии деревьев выброс примеси через достаточно большой промежуток времени выносится за пределы застройки.

На рис.1 показан случай, когда деревья высажены внутри двора (направление ветра указывает стрелка). Видно, что к расчетному моменту времени значительное количество вредных веществ задерживаются внутри застройки на более длительный промежуток времени. Данный эффект объясняется тем, что деревья генерируют вихри, которые создают циркуляционные зоны внутри двора и способствуют задержке загрязнений внутри дворовой территории. Таким образом, неудачное расположение деревьев между застройкой и источником загрязнений может резко увеличить концентрацию вредных примесей внутри двора.

На рис. 2 показан случай увеличения числа деревьев, это приводит к следующим эффектам:

1) вредные примеси в меньшем количестве попадают внутрь дворовой территории за счет образования циркуляционных зон непосредственно за парковой зоной;

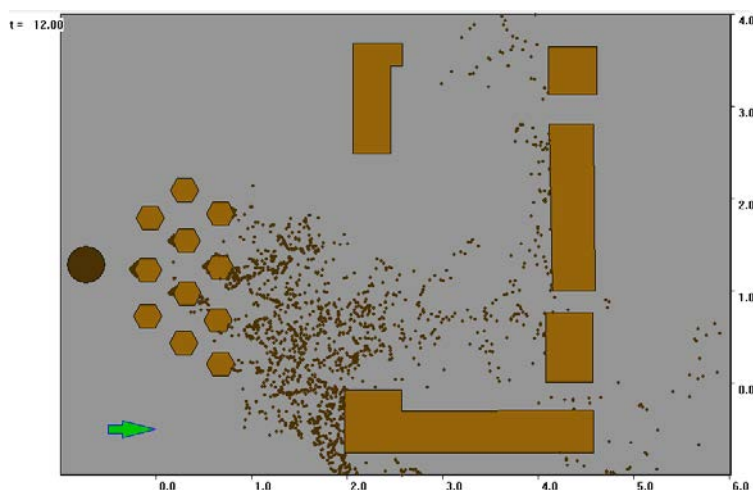


Рисунок 2. Расчет для случая большого массива деревьев

2) большее количество вредных веществ задерживается внутри посадки.

Из проведенных расчетов можно сделать вывод, что для нейтрализации вредных выбросов посадку деревьев следует осуществлять, определив:

- 1) оптимальное расстояние от лесопосадки до жилых массивов;
- 2) оптимальную плотность и площадь посадки.

Была также создана программа для расчета трехмерного случая, но на данном этапе время расчета является достаточно большим, что не позволяет использовать ее для оперативной оценки влияния парковой зоны на распространение загрязнений.

1. Лифанов И.К., Гутников В.А., Скотченко А.С. Рекомендации по оценке аэрации территории в жилой застройке г. Москвы.–М.:Диалог-МГУ, 1997.–24с.
2. В.А.Гутников, В.Ю.Кириякин, И.К.Лифанов, А.Н.Сетуха. Математическое моделирование аэродинамики городской застройки.–М.: «Пасьева», 2002.–244с.
3. Довгий С.О., Буланчук Г.Г., Буланчук О.М. Моделювання аеродинаміки міських забудов. Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки (Машинобудування) –№12(58). – 2003. – , с.72–76.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СЕТОК

Г.А. Воропаев, Я.В. Загуменный

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

e-mail: voropaiev.gena@gmail.com, zagumennyi@gmail.com

Течения, формирующиеся на поверхности обтекаемых тел и в следе за ними, как правило, даже при стационарном натекающем потоке – нестационарные при достаточно небольших числах Рейнольдса. Деформирующиеся под действием возмущений потока или активно колеблющиеся обтекаемые поверхности принципиально изменяют структуру потока и интегральные характеристики обтекаемых тел.

Численное моделирование течений жидкостей в таких сложных условиях практически невозможно реализовать на базе статических расчетных сеток и, следовательно, требует применения специфических подходов, позволяющих адекватно учитывать изменяемую во времени геометрию расчетных областей.

В данной работе представлены результаты численного моделирования ряда нестационарных задач, в которых были использованы методы динамических расчетных сеток на базе вычислительного пакета OpenFOAM с открытым исходным кодом. Дискретизация исходных дифференциальных уравнений проводилась методом конечного объема, для вычисления объемных интегралов по контрольному объему использовалась общая процедура Гаусса. Интерполяция конвективных членов проводилась на основе TVD схем повышенного порядка точности, для дискретизации производной по времени использовалась неявная трехточечная несимметричная схема второго порядка с разностями назад. Обработка и визуализация результатов расчетов выполнялась с использованием графического интерфейса ParaView и пакета прикладных программ для численного анализа и научной графики Origin.

В зависимости от специфики рассматриваемой задачи использовались различные алгоритмы построения динамических расчетных сеток, которые реализовывались на языке программирования C++ и имплементировались в пакет OpenFOAM в качестве новых библиотек динамических сеток собственной разработки. В случае колебательных движений поверхности обтекаемого тела либо определенной ее части перемещения расчетных ячеек согласовывались с характером движения поверхности, при этом деформации сетки уменьшались по мере удаления от подвижной границы. При решении задач, когда обтекаемые тела вращаются в потоке, применены согласованные расчетные сетки, как подвижные, связываемые с подвижными элементами конструкции, так и неподвижные, которые связаны между собой с помощью специальных циклических граничных условий на разделяющих гранях. В подвижных областях расчетной сетки предварительные значения физических переменных в новых положениях расчетных ячеек на текущем временном слое находились с помощью процедуры линейной интерполяции по соответствующим значениям на сетке с предыдущего временного слоя.

Разработанная методика была применена к решению задач определения динамических характеристик тел, поверхность которых моделирует деформирующуюся поверхность гидробионтов [1], что позволило описать трансформацию трехмерных возмущений в пограничном слое на деформирующейся поверхности [2–4] и получить значения мгновенных нагрузок на колеблющихся крыльях, моделирующих машущий движитель [5].

Применение структурно динамических сеток дало возможность адекватно описывать и определять нестационарные динамические характеристики аэрогидродинамических систем роторного типа, в частности, установок типа турбин Дарье [6]. Разработанный подход также был успешно применен к моделированию процесса нестационарного раскрытия и наполнения подушки безопасности газовым потоком, формирующимся в камере смешения импульсной эжекторной системы (инфлятора) перемешиванием высоконапорной струи, выходящей из газогенератора через сверхзвуковое сопло, и низконапорного эжектируемого газа [7].

Важным аспектом численного моделирования стратифицированных течений является построение алгоритма расчета, в котором не поток жидкости натекает на препятствие, а движение совершает само тело в изначально покоящейся стратифицированной жидкости, что соответствует постановке лабораторных и полевых экспериментов в стратифицированных средах [8]. Методы динамических сеток дали возможность реализовать перемещение тела в стратифицированной жидкости, что, в свою очередь, позволило избежать проявления нефизических волновых возмущений по всей области течения, вследствие взаимодействия опережающих возмущений и внутренних волн с внешними границами расчетной области, а также адекватно описать структуру и динамику течения на начальном этапе трогания тела.

На рис.1 приведены примеры мгновенной структуры динамических расчетных сеток для рассмотренных выше типов задач. Вблизи колеблющейся поверхности по закону бегущей волны и машущего крыла структура сетки повторяет характер движения поверхности, но с удалением от нее положения расчетных ячеек стремятся к исходному статическому состоянию (рис.1, а, б). Расчетная сетка около вращающийся пластины состоит из двух частей – некоторой цилиндрической области, вращающейся вместе с телом, и внешней статической области, которые связаны между собой специальными циклическими условиями на границе раздела (рис.1, в). При движении стенок цилиндрической области, моделирующей подушку безопасности, вначале в продольном, а затем в поперечном направлении, расчетная сетка растягивается соответствующим образом при сохранении относительных масштабов ячеек (рис.1, г).

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Kramer. Boundary layer stabilization by distributed damping. Amer. Soc. Nav. Eng., 1960, 72, С. 25–33.
2. Г.А. Воропаев. Структура вынужденных возмущений в ламинарном пограничном слое при источнике возмущений на обтекаемой поверхности // Прикл. гидромеханика, 2007, **9(81)**, № 2–3, С. 52–68.
3. G. Voropaev, Ia. Zagumennyi. Wave and vortex structure of transitional boundary layer over deformable surface // *Physica Scripta*, 2010, T142, paper 014010. doi:10.1088/0031-8949/2010/T142/014010.
4. Г.А. Воропаев, Я.В. Загуменный. Численное моделирование взаимодействия локальных возмущений пограничного слоя с деформирующейся поверхностью // Вестник Донецкого Университета, Сер. А: Естественные науки, 2009, **1**, С. 154–165.
5. Г.А. Воропаев, Д. Зайнер-Гундерсен, В.И. Коробов. Гидродинамические характеристики колеблющегося крыла // Прикл. гидромеханика, 2015, **17**, № 3, С. 3–9.
6. Д.В. Беляков. Разработка и особенности математической модели ветротурбины Дарье // *International Journal of Open Information Technologies*, 2015, **3**, № 9, С. 1–7.
7. X.J. Wang *et al.* A numerical study of passenger side airbag deployment based on arbitrary Lagrangian-Eulerian method // *Technological Sciences*, 2015, **58**, Issue 3, P. 397–404.
8. Я.В. Загуменный. Динамика и структура стратифицированного течения около горизонтальной пластины // Доклады НАН Украины, 2014, № 7, С. 60–67.

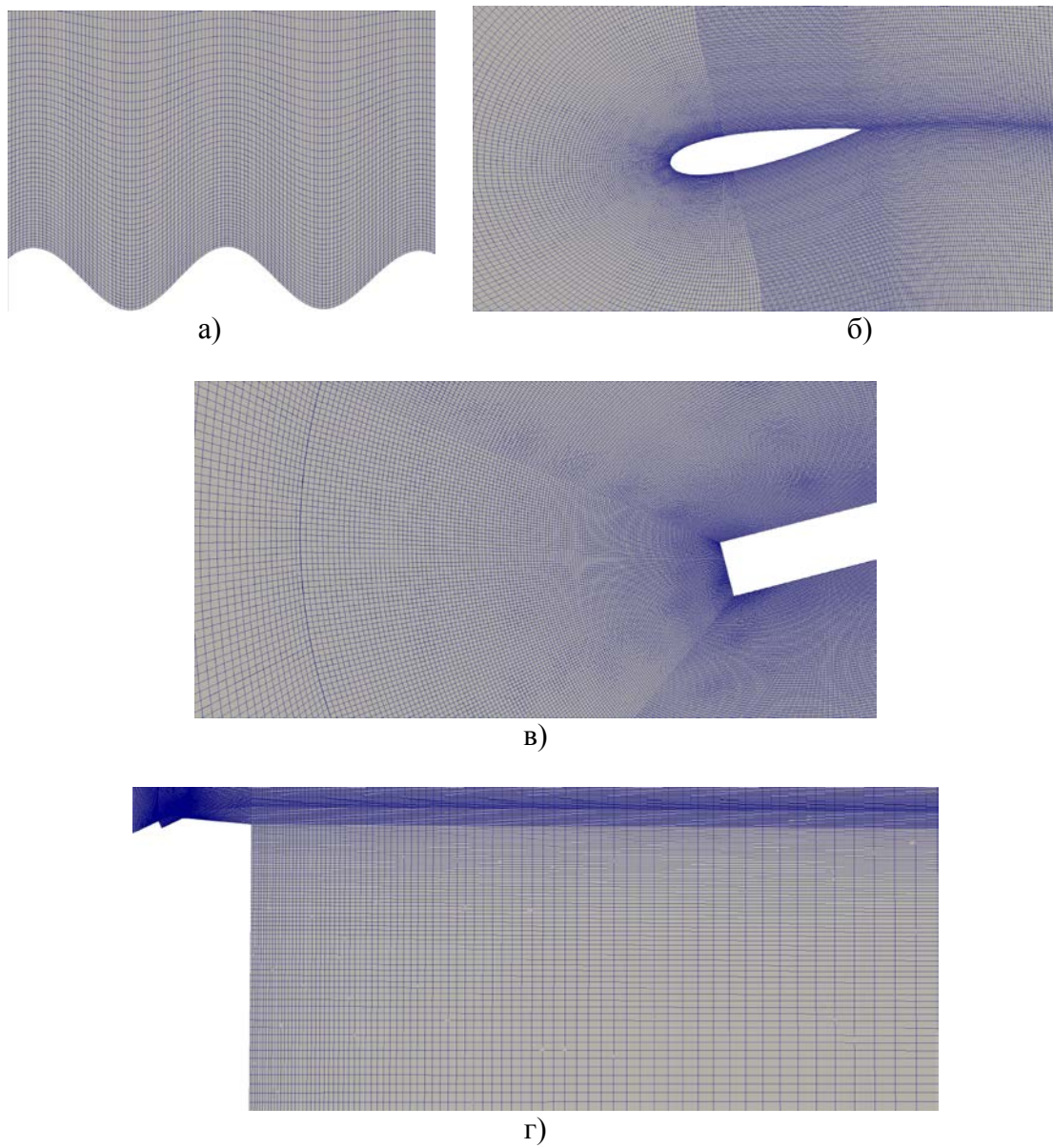


Рис.1. Фрагменты динамических расчетных сеток около активно колеблющейся поверхности (а), машущего крыла (б), вращающейся пластины (в) и внутри раскрывающейся подушки безопасности (г).

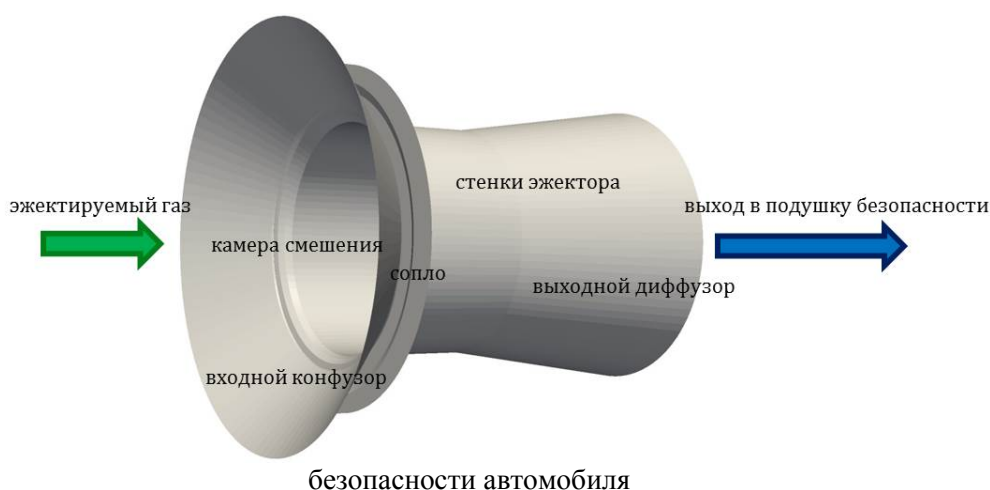
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО СВЕРХЗВУКОВОГО ВНУТРЕННЕГО ТЕЧЕНИЯ

Воропаев Г.А., Розумнюк Н.В., Загуменный Я.В., Сирош Е.А.
Институт гидромеханики НАН Украины

Внутренние стационарные сверхзвуковые течения с образованием прямых и косых висячих скачков уплотнения хорошо изучены в достаточно широком диапазоне чисел Маха, в том числе и задачи струйной эжекции в эжекторах высокого давления. В то же время запуск эжектора при открытии клапана высокого давления с момента образования ударной волны в сопле и выхода ее в камеру смешения до образования смешанного до- и сверхзвукового стационарного течения практически не изучен. В первую очередь это связано с тем, что время выхода на установившееся течение даже в областях несложной геометрии существенно зависит от определяющих параметров задачи, но самое главное, то, что может реализоваться неоднозначность этих течений при незначительных изменении определяющих параметров задачи или вообще отсутствие стационарного решения.

В нашей работе исследовалось формирование течения в осесимметричном эжекторе (Рис.1) при различных соплах высокого давления, их сопряжения с камерой смешения от момента срабатывания клапана высокого давления до выхода на установившийся режим течения, обеспечивающий требуемый общий расход газа через эжектор. Результаты этого исследования были положены в основу разработки параметров импульсного эжектора для наполнения подушек безопасности автомобиля.

Рис.1. Общая схема симметричного сверхзвукового эжектора для наполнения подушки



Для численного эксперимента по моделированию течения газа в эжекторе использовались пакет Fluent и вычислительный инструмент OpenFOAM, открытость исходного кода которого предоставляет широкие возможности внесения изменений в алгоритм расчета с учетом специфики конкретных задач.

На основании системных расчетов получены предельные значения расходов сопла высокого давления для каждой геометрии сопряжения сопла с камерой смешения, обеспечивающей максимальный объем эжектируемого газа. Найдены предельные значения коэффициентов эжекции при фиксированной площади сечения камеры смешения.

Практическим результатом численного эксперимента является геометрия эжектора, обеспечивающего наполнение подушки безопасности объемом 50 литров за 25-30 мсек.

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ТЕЧІЇ НАД НАХИЛЕНОЮ ОВАЛЬНОЮ ЛУНКОЮ

В.А. Воскобійник, О.А. Воскобойник, В.М. Степанович,
А.В. Воскобійник, П.Ю. Романенко
Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

Лункові генератори вихорів, як пасивні методи керування примежовим шаром, знайшли широке застосування у літакобудуванні, теплоенергетиці, автомобільній та судноплавній галузях господарства. За відповідних умов обтікання заглиблень усередині них утворюються великомасштабні когерентні вихрові системи, які генерують інтенсивні пульсації швидкості, тиску, температури, завихореності та інших параметрів турбулентності, що використовується у засобах керування примежовим шаром. У залежності від режиму обтікання, геометричних параметрів і форми заглиблення усередині останніх генеруються вихрові структури різних масштабів, напрямків руху, частот обертання та осциляцій як у просторі, так і у часі. Ці вихрові структури, взаємодіючи між собою та обтічною поверхнею, за певних умов, викидаються назовні із заглиблення, змінюючи структуру примежового шару та інтегральні характеристики тіл обтікання, процесів теплообміну та змішування, якості аеродинамічних профілів та інше.

Необхідність практичного використання лункових рельєфів на обтічній поверхні диктує вивчення механізмів вихроутворення усередині обтічних заглиблень і виявлення їх гідродинамічні особливості. Експериментальні результати аеродинамічних і теплофізичних досліджень показали досить високу ефективність деяких рельєфів заглиблень зі збільшення тепло- і масопереносу за незначного зростання рівня гідродинамічних втрат у таких течіях. Так, сферичні заглиблення за теплогідрравлічною ефективністю не є найкращими для турбулентного режиму обтікання теплоносія, а у ламінарному режимі їх використання практично не виправдане. В останні роки зроблено багато дослідів з метою визначення оптимальної конфігурації лункової поверхні. Створення генераторів вихорів, які мали б мінімальний гідродинамічний опір і генерували б штучні вихрові системи із заданими кінематичними і динамічними параметрами, можливо, як показують останні наукові дослідження, використовуючи овальні заглиблення помірної глибини. У зв'язку з цим була поставлена мета експериментально дослідити механізми та закономірності формування і еволюції вихрових структур в овальних лунках, яка обтікається під різними кутами, та визначити їх взаємодію між собою і з примежовим шаром. Особливості вихроутворення усередині овальної лунки, яка розташовувалась під різними кутами до напрямку потоку на плоскій поверхні, досліджуються зокрема за допомогою візуалізації течії [1]. Візуалізація з нанесенням на поверхню водорозчинних покриттів або введенням у потік різнокольорових барвників дозволяє зробити оцінку масштабів вихрових структур, їх форму і напрямок руху, а також місця викидів та взаємодії з вихровими структурами примежового шару і частоти цих викидів. За допомогою візуалізації та комп'ютерного аналізу експериментальних результатів визначається вплив орієнтації лунки на формування та еволюцію когерентних вихрових структур, які зароджуються усередині лунки під дією набігаючого потоку та відривної течії, що утворюється над отвором лунки. Отримані результати візуалізації використовуються у подальшому під час планування, підготовки та проведення у характерних точках вихроутворення і місцях взаємодії вихорів з обтічною поверхнею вимірювань полів швидкості та тиску.

Експерименти проведено у гідродинамічному лотку ІГМ НАНУ, детальний опис якого наведено у роботах [1, 2]. Над дном гідродинамічного лотка розташовувалась гідравлічно гладка пластина довжиною 2м та шириною 0,5м, у центрі якої було

виготовлено дискову вставку з овальною лункою у вигляді двох сферичних лунок об'єднаних циліндричним заглибленням. Сферичні частини лунки були діаметром $d=0,04$ м, а ширина та довжина циліндричної вставки складала по $0,04$ м. Таким чином, овальна лунка мала ширину $0,04$ м, довжину $l=0,08$ м та глибину $h=0,009$ м, а відношення глибини до ширини складало $h/d=0,22$. Дискова вставка на пластині дозволяла обертати овальну лунку у площині пластини на довільний кут. У дослідженнях кут розташування овальної лунки щодо напрямку потоку змінювався від 30° до 90° (поперечне обтікання лунки). Візуалізація була проведена для швидкості потоку $U=(0,1\ldots0,5)$ м/с та чисел Рейнольдса $Re_x=Ux/\nu=(8\ldots40)\cdot 10^4$ і $Re_d=Ud/\nu=(4\ldots20)\cdot 10^3$, де x – відстань від переднього краю пластини до овальної лунки, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості води. Фарбники та мічені частинки мали щільність близьку до щільності води та їх рух у просторі відображав особливості вихрової течії усередині лунки і поблизу неї. Використання відповідної відео- та фотоапаратури дало змогу реєструвати картини течії, які у подальшому оброблялись та аналізувались за допомогою персональних комп'ютерів та графічної станції з використанням штатного і спеціально розробленого програмного забезпечення.

Отримані експериментальні результати з вивчення особливостей формування вихрової течії усередині овальної лунки, розташованої на плоскій поверхні під різними кутами відносно напрямку потоку, та в її ближньому сліді показали:

Для ламінарного режиму течії ($Re_x=8\cdot 10^4$, $Re_d=4\cdot 10^3$) усередині придонної частини лунки генеруються великомасштабні вихрові структури, інтенсивність і масштаб яких збільшується зі збільшенням кута від 30° до 60° . Для поперечного обтікання овальної лунки формування великомасштабних вихорів не спостерігалось. Для цього режиму течії незалежно від кута обтікання мали місце низькочастотні коливання рідини усередині лунки. Викиди великомасштабних вихорів фіксувались, головним чином, над серединною частиною лунки з частотами, яким відповідали числа Струхаля ($St=fd/U$) від $0,02$ до $0,06$. При цьому частота викидів зменшувалася зі збільшенням кута нахилу овальної лунки, а зона викидів вихрових структур пересувалася ближче до передньої сферичної частини лунки.

Для перехідного режиму течії ($Re_x=2\cdot 10^5$, $Re_d=1\cdot 10^4$) спостерігався інтенсивний відрив примежового шару з передньої стінки лунки з формуванням зсувного шару. У лунці формувалися стійкі великомасштабні спіралеподібні вихори, джерело яких розташовувалось у передній сферичній частині лунки. Зі збільшенням кута нахилу овальної лунки масштаб великомасштабних спіралеподібних вихорів збільшувався. Викид спіралеподібних вихорів спостерігався над кормовою серединною частиною лунки, а для кутів 45° та 60° викид мав місце і над кормовою стінкою передньої сферичної частини лунки. Частота викидів вихорів зі збільшенням кута нахилу лунки збільшувалась і складала $St=(0,06-0,14)$.

Для турбулентного режиму течії ($Re_x=4\cdot 10^5$, $Re_d=2\cdot 10^4$) у лунці формувалися великомасштабні вихори менших розмірів ніж для перехідного режиму течії. Викид верхньої частини великомасштабних вихорів спостерігався над передньою частиною лунки з частотою, якій відповідало число Струхаля від $0,07$ до $0,2$. Над кормовою та серединною частинами лунки фіксувались інтенсивні викиди дрібномасштабних вихорів у вигляді вихрової пелени з безрозмірними частотами $St=(0,3-0,5)$.

1. Воропаєв Г.А., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Исаев С.А. Візуалізація ламінарного обтекания овального углубления // Прикладна гідромеханіка. – 2009. – 11, № 4. – С. 31 – 46.

2. Воскобійник В.А., Воскобійник А.В., Воскобойник О.А., Степанович В.М., Хижа І.А. Вихровий рух усередині лунки складної геометрії // Прикладна гідромеханіка. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 14-23.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ШУМ ОТКРЫТОГО И ПОЛУЗАКРЫТОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ДВУХСТВОРЧАТОГО КЛАПАНА СЕРДЦА

В. Воскобойник¹, А. Редаелли², О. Чертов³, Б. Фиоре²,
А. Воскобойник¹, Л. Терещенко¹, С. Сирик³, Ф. Лукерини²

¹Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, Украина,

²Миланский технический университет “Politecnico di Milano”, Милан, Италия,

³Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев, Украина

В докладе приведены результаты физического моделирования in-vitro работы открытого и полузакрытого механического двухстворчатого митрального клапана в режиме диастолы. Исследования проводились в Микролаборатории Миланского технического университета с двухстворчатым сердечным клапаном “Sorin biomedica cardio” (Италия). Цель исследований – выявить гидроакустические различия работы открытого и полузакрытого механического клапана для разработки и создания диагностического комплекса индивидуального пользования, регистрирующего гидродинамические шумы. В настоящее время около 12 миллионов пациентов во всем мире имеют протезы механических двухстворчатых клапанов различных модификаций и фирм-изготовителей. Ранняя диагностика закрытия створок таких клапанов под действием различных причин и патологий имеет первостепенное значение, что обуславливает особую актуальность разработки современных индивидуальных недорогих и малогабаритных автоматических диагностических средств.

Для проведения гидроакустической диагностики работы механического двухстворчатого митрального клапана был создан специальный экспериментальный стенд. Основой стенда являлась емкость, в которой были смоделированы камера предсердия и камера левого желудочка сердца. Между этими камерами устанавливался механический митральный двухстворчатый клапан диаметром 25 мм. Схема и фотография стенда показана на рис. 1. Импульсная помпа (P) прокачивала воду через митральный клапан из резервуара (R) в импедансную емкость (I). Импульсная помпа управлялась посредством компьютера по специально разработанной программе, которая дала возможность создавать пульсирующую подачу воды определенной амплитуды, периода и формы. В наших исследованиях форма импульса движения воды через митральный клапан соответствовала сердечному циклу диастолы. На входном либо выходном патрубке экспериментальной емкости устанавливался ультразвуковой накладной датчик скорости (F). Таким образом, компьютерное управление работой импульсной помпы дало возможность достаточно точно и стабильно контролировать

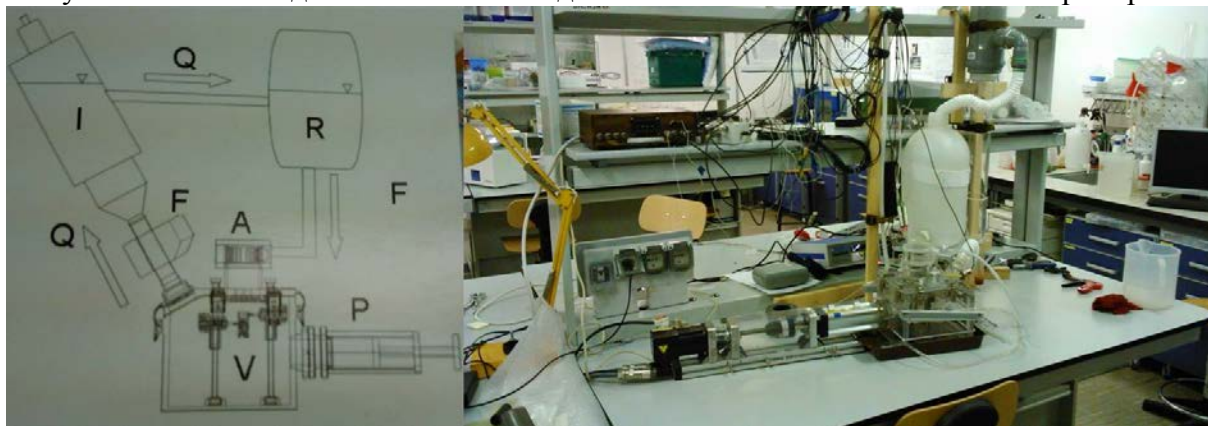


Рис. 1 Экспериментальный стенд: А-атриум, V-желудочек, P-помпа, F-измеритель скорости, I-импедансная емкость, R-резервуар

форму импульса подачи воды через митральный клапан (диастола), период импульса (сердечный пульс) и скорость подачи воды (расход). В исследованиях частота импульсной подачи воды составляла 1 Гц или 60 ударов в мин., а расход воды через митральный клапан изменялся от 3 л/мин до 6 л/мин.

Исследования гидродинамического шума струй воды, которые вытекали из митрального клапана в камеру левого желудочка, проводились с помощью блока датчиков пульсаций давления. Эти датчики находились внутри экспериментальной емкости на координатном устройстве и располагались ниже по потоку от клапана. Миниатюрные пьезокерамические датчики пульсаций давления (диаметр чувствительной поверхности 1,3 мм) устанавливались в хорошо обтекаемый блок датчиков давления на фиксированном расстоянии друг от друга. Блок датчиков перемещался вдоль исследуемых струй, которые вытекали через открытый или полузакрытый клапан. Таким образом, датчики регистрировали гидроакустический шум ближнего поля струй. Приспособление крепления митрального клапана давало возможность поворачивать клапан вокруг своей оси. Следовательно, датчики регистрировали шум либо боковой струи, либо центральной струи двухстворчатого клапана.

Результаты экспериментальных исследований показали, что интенсивность гидродинамического шума вблизи боковой и центральной струй, вытекающих из полузакрытого клапана выше, чем из открытого двухстворчатого клапана.

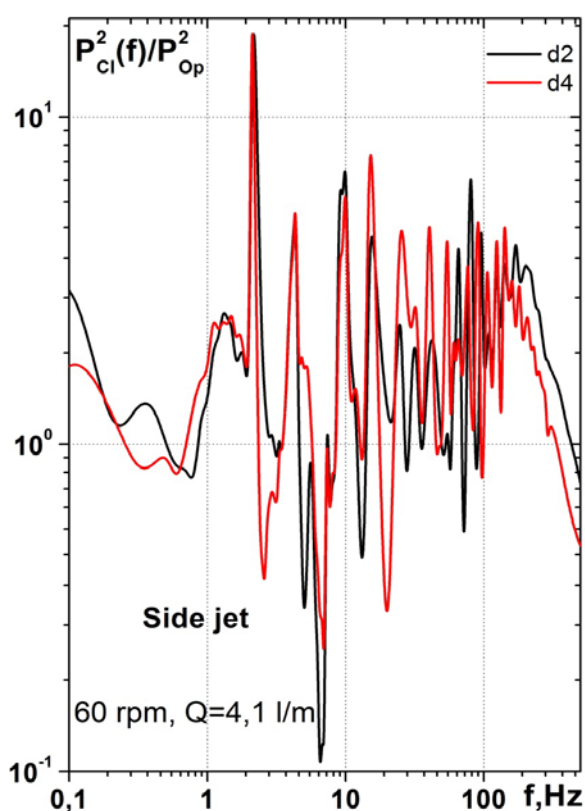


Рис. 2 Сопоставление спектров пульсаций давления ближнего шума боковой струи полузакрытого и открытого механического двухстворчатого клапана

Установлено, что интенсивные пульсации давления имеют место на частоте 1 Гц и ее высших гармониках. При этом уровни пульсаций давления для полузакрытого клапана выше, чем для открытого клапана на этих гармониках (рис. 2). Обнаружено, что в диапазоне низких частот гидродинамический шум в условиях работы полузакрытого механического митрального клапана в (4-6) раз выше, чем в условиях работы открытого клапана.

Исследования показали, что измерения гидродинамического шума могут быть эффективным средством диагностики работы механического двухстворчатого клапана сердца.

Исследования выполнялись при финансовой поддержке проектов: EUMLS (EU-Ukrainian Mathematicians for Life Sciences) – грант PIRSES-GA-2011-295164-EUMLS и AMMODIT (Approximation Methods for Molecular Modelling and Diagnosis Tools) – номер проекта: 645672, финансируемого по программе Horizon 2020: H2020-EU.1.3.3 - MSCA-RISE-2014 (Marie Skłodowska-Curie Research and Innovation Staff).

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕВОЛЮЦІЇ ДОННОЇ ПОВЕРХНІ В РУСЛОВИХ ПОТОКАХ

Горбань І.М. (Інститут гідромеханіки НАНУ)

В цій роботі розглядаються морфологічні процеси, що відбуваються на дні відкритих водойм внаслідок взаємодії водної течії з розмивним дном. Особливу увагу приділено еволюції донних нерівностей великого масштабу – ям та пагорбів, що можуть бути як частиною природного рельєфу, так і результатом інтенсивної промислової діяльності у береговій зоні. Такі дослідження є важливими для прогнозування впливу крупномасштабних донних утворень на еволюцію річкових течій, стійкість гідротехнічних споруд, розмивні процеси поблизу берегів, тощо.

Відомо, що великі донні утворення мають складну та довгу еволюційну історію[1]. Через це для їх моделювання мають застосовуватися такі чисельні алгоритми, які забезпечили б стійкість і точність морфологічних розрахунків протягом довгого часу. Розвинена в цій роботі чисельна модель ґрунтується на нестационарному підході, який передбачає зв'язане моделювання гідродинамічного та морфологічного процесів. Для розрахунку гідродинаміки течії, яка описується рівняннями мілкої води, використовується центральна схема другого порядку Курганова-Ноелля-Петрової[2]. Вона належить до проєкційно-еволюційних методів типу Годунова, що мають високу роздільність та можуть знаходити розривні розв'язки. Морфологія дна розраховується на основі еволюційного рівняння Екснера, для інтегрування якого розвинуто зважену істотно неосцилюючу схему 5-го порядку (*WENO-scheme*). Ця схема ґрунтується на хвильовій формі еволюційного рівняння, де фазові швидкості поширення збурень вздовж донної поверхні розраховуються через градієнт потоку наносів. Для інтегрування рівнянь по часові застосовуються явна схема і метод Ейлера. Одержано, що використання багатокрокових TVD-схем типу Рунге-Кутта майже не впливає на результати, в той же час, це потребує значних обчислювальних ресурсів, що обмежує застосування розвинутого алгоритму до моделювання практичних проблем.

Одновимірна реалізація розвинутої чисельної схеми представлена в роботі [3], де на багатьох тестових прикладах показано, що вона повністю виключає хибні коливання шуканих розв'язків, завдяки чому здатна успішно моделювати довготривалі морфологічні процеси. В цьому дослідженні ця схема адаптується до двовимірного випадку, що значно розширює межі її застосування.

На рис. 1, 2 наведені результати розрахунків еволюції деяких форм донної поверхні, виконаних у припущеннях однорідності донного ґрунту ($d_{50} \approx 0.25$ мм) та степеневій залежності потоку наносів від швидкості течії. Рис. 1 ілюструє розрахунок відомої тестової задачі про розмив циліндричного пагорбу, розташованого на дні прямокутного каналу [4]. Глибина води в каналі покладається 10 м, висота пагорбу – 1 м, швидкість водної течії – 1 м/с. Отримані результати вказують на формування складного рельєфу на донній поверхні та його пересування вниз за течією. На рис. 2 показано еволюцію піщаного кар'єру глибиною 5 м в каналі зі швидкістю води 1 м/с протягом місяця. Можна бачити, що початкове заглиблення (рис. 2 а) трансформується в складну систему ям та невеликих пагорбів, які рухаються вниз за течією і поширюються вздовж поперечного перерізу каналу.

В роботі зроблені оцінки “живучості” піщаних кар'єрів в залежності від їх глибини та гідродинамічних характеристик течії. Зазначимо, що наведені терміни і оцінки є відносними, оскільки розрахунок задачі істотно залежить від покладених в основу моделі гідравлічних параметрів.

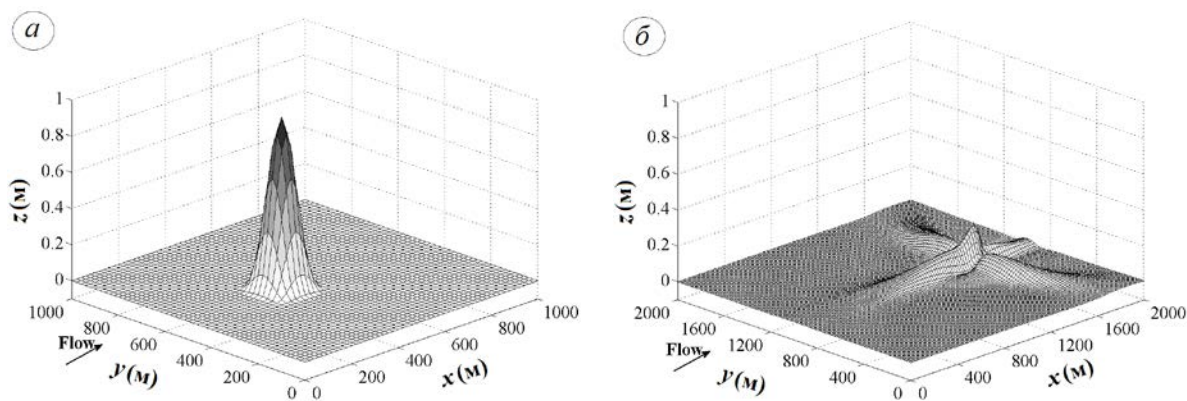


Рис. 1. Еволюція піщаного пагорбу: $a - t = 0$, $b - t = 600$ годин.

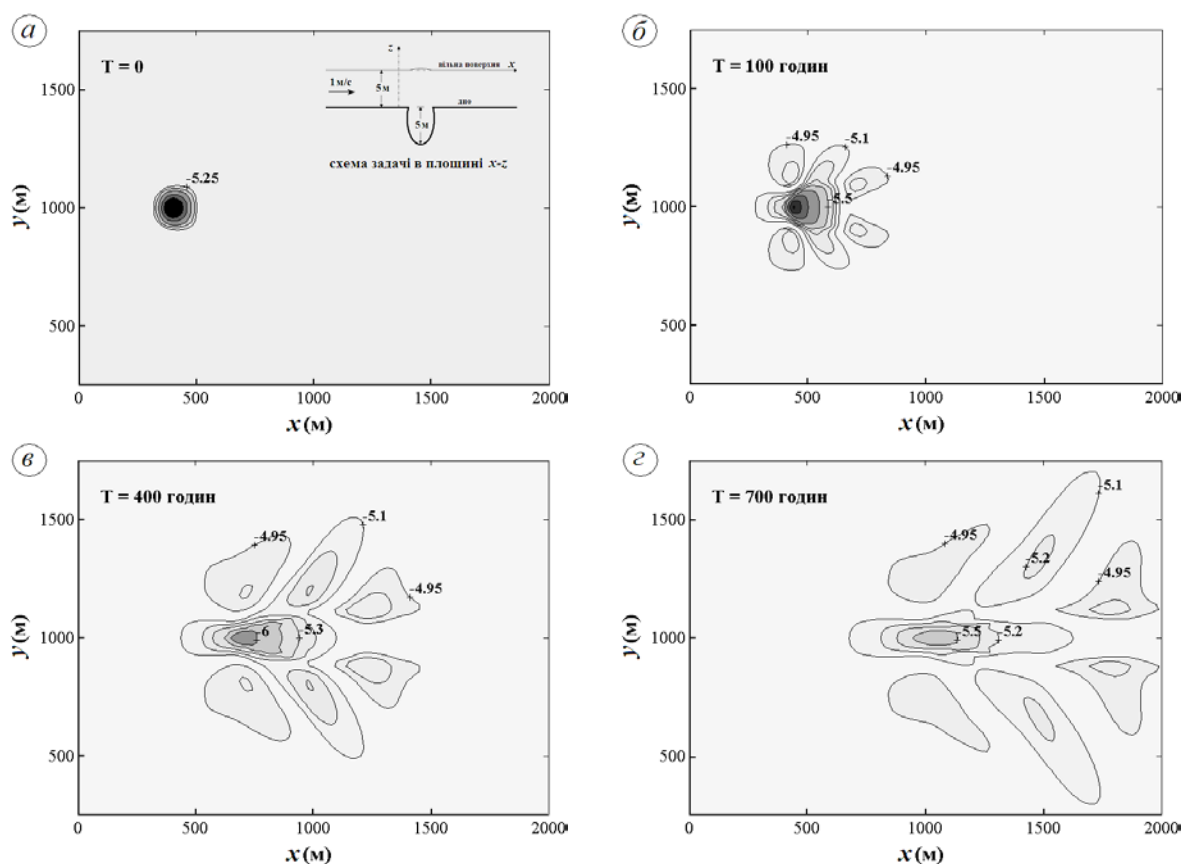


Рис. 2. Еволюція піщаного кар'єру.

1. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Ленинград: Госметеиздат. – 1979. – 275 с.
2. Kurganov A., Noelle S., Petrova S. Semidiscrete central-upwind schemes for hyperbolic conservation laws and Hamilton–Jacobi equations // SIAM J. Sci. Comput. – 2001. – 23. – N 3.
3. Горбань І.М. Чисельне моделювання еволюції нерівностей великого масштабу на річковому дні// Прикладна гідромеханіка. – 2015. – 17. – № 4.
4. Hudson J., Sweby P.K. Formulations for numerically approximating hyperbolic systems governing sediment transport// J. Scient. Comput. – 2003. – 19.

ТРАНСФОРМАЦІЯ ПОВЕРХНЕВИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ НА НЕОДНОРІДНОСТІ ДОННОЇ ПОВЕРХНІ

Н.С. Городецька¹, Т.М. Щербак², В.І. Нікішов¹

¹ ІГМ НАН України, Київ,

² НТУ, Київ

Інтенсивне освоєння шельфової зони морів і океанів обумовлює необхідність використання штучних захисних споруд, які призначені для захисту берегів та гідротехнічних конструкцій від руйнівної дії поверхневих гравітаційних хвиль. Під впливом цих споруд має місце розсіювання і руйнування хвиль, що призводить до зменшення навантаження на берегову лінію і конструкції. Підвищення ефективності берегозахисних споруд досягається за рахунок їх ускладнення, використання проникних матеріалів і т.і. Актуальною є проблема теоретичного розрахунку динаміки хвиль при їх взаємодії з берегозахисними спорудами. Незважаючи на велику кількість робіт, присвячених цій тематиці, існує багато питань, що потребують уваги і відповідного розгляду. Через труднощі врахування всіх факторів, що впливають на процес взаємодії хвиль з перешкодами, стає доцільним використовувати наближені моделі, на основі якої можна отримувати необхідні чисельні оцінки щодо параметрів хвиль. В рамках таких моделей може здійснюватись як спрощення моделі середовища (модель ідеальної рідини), так і самої конструкції споруди. Це дозволяє застосовувати чисельно-аналітичні підходи до розв'язання відповідних граничних задач.

Серед робіт, присвячених проблемі захисту берегової зони від руйнування поверхневими хвилями за допомогою занурених у рідину штучних конструкцій, можна виділити клас задач, в яких розглядаються хвильові рухи в водоймі, схематично розділеній на окремі області, що мають вертикальні границі, і глибина в кожній з них є постійною. Відмітимо, що довільний профіль донної поверхні може бути представлений в ступінчастому вигляді, і особливості поширення поверхневих хвиль над таким профілем можуть бути вивчені шляхом вирішення задачі про трансформацію хвиль зазначеною сукупністю східчастих структур.

В роботі розглянуто розсіювання монохроматичних поверхневих гравітаційних хвиль в каналі при різкій зміні рівня донної поверхні, тобто на уступі. На уступ падає хвиля з частотою ω_{dim} , що поширюється уздовж горизонтальної вісі x . Глибина рідини до уступу дорівнює H_1 і після - становить H_2 . Поведінка лінійних поверхневих хвиль, що поширюються уздовж вільної поверхні ідеальної нестисливої рідини, описується рівнянням Лапласа для потенціалу швидкості з відповідними граничними умовами на вільній поверхні і на дні. Одним з ефективних підходів до задач розсіювання поверхневих хвиль на перешкодах, що характеризуються наявністю вертикальних границь, є подання розв'язку для потенціалу швидкості в кожній з областей в вигляді розкладів по системі власних функцій, характерних для конкретної області, а потім використання умов спряження цих розв'язків на вертикальних границях. У результаті задача зводиться до нескінченної системи лінійних функціональних рівнянь. Далі, використовуючи умову ортогональності власних функцій, після застосування операції редукції отримуємо систему алгебраїчних рівнянь, розв'язання якої здійснюється на основі методу найменших квадратів, який є по суті інтегральним методом, або шляхом безпосереднього розв'язку зазначеної системи рівнянь чисельним методом.

Характерною особливістю розглянутих задач є наявність кутових точок на перешкоді. У цих точках вираз для швидкості рідини має стенову особливість, порядок якої залежить від характерних особливостей межі. При існуванні локальних особливостей в характеристиках хвильових полів, як правило, виникає неоднозначність в розв'язанні граничної задачі. При цьому можлива побудова декількох розв'язків, які відповідають основним рівнянням задачі і відрізняються тільки швидкістю прагнення до нескінченності тієї чи іншої характеристики поля. Тоді для побудови єдиного розв'язку необхідно визначити характер особливості.

У даній роботі розглядається задача розсіювання поверхневих гравітаційних хвиль одиничним уступом в разі нормального падіння без обмежень на висоту уступу. Виконано виділення описаної вище особливості (в даному випадку степеневій) за швидкостями в кутовій точці. На основі розвинення цієї особливості в ряд по власних функціях задачі знаходиться асимптотика невідомих коефіцієнтів розкладу для великих порядків. Це дозволило поліпшити якість розв'язання при використанні меншої кількості рівнянь, в той же час внесок високочастотних складових враховується асимптотично. Проведено порівняння застосованого методу поліпшеної редукції зі звичайною редукцією. Здійснено перевірку точності виконання граничних умов і умов спряження. Показано переваги методу в порівнянні з методом звичайної редукції. Виконано порівняння з відомими результатами.

КОМПЬЮТЕР И НАУКА

В.Т. Гринченко

Институт гидромеханики НАНУ

Формирование и развитие такого раздела современного естествознания как CFD (компьютерная гидродинамика) является лишь одним из примеров, иллюстрирующих возможности нового средства получения знаний. В докладе представлены некоторые данные, указывающие на использование компьютера для расширения и углубления предметной области исследований в разных областях современной науки. Аналогичная приставка «компьютерная» в названии гидродинамики приставки появились в самых разнообразных направлениях науки, включая физику, химию, биологию. Есть некоторая аналогия в оценке роли компьютера в науке в сравнении эффекта его использования с такими инструментами, как микроскоп и телескоп. Однако, в отличие от этих известных инструментов познания, возможности которых ограничиваются чисто физическими факторами по пространству и времени, возможности компьютера выглядят неограниченными, поскольку определяются лишь интеллектуальными способностями человека. Выражением возможностей нового средства познания является появление наряду с традиционными *in vivo* и *in vitro* нового мощного средства *in silico*. Именно благодаря эффективности этого нового средства появилась возможность развития научных направлений, находящихся на стыке различных наук и формирования новой научной теории – теории сложности и отхода от идеологии редукционизма, определявшей лицо европейской науки на протяжении трех столетий после Ньютона.

В докладе представлены также некоторые исторические сведения об определяющих моментах в процессе развития и становления компьютерных наук. Обращено внимание на возникновение новых этических проблем в науке при реализации требования воспроизводимости и повторяемости результатов исследований.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.А. Гуржий, Е.И. Никифорович, О.И. Кордас, Д.И. Черний
Национальный технический университет Украины “КПИ”, г.Киев, Украина
Институт гидромеханики НАН Украины, г.Киев, Украина
Королевский технологический институт КТН, г.Стокгольм, Швеция
Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, г.Киев, Украина

В докладе рассматривается двухмерная задача моделирования распространения загрязнения под действием глобальных течений и ветровой нагрузки на морской поверхности со сложной геометрией береговой линии и системы островов в приближении идеальной и несжимаемой жидкости.

Поставленная задача решается в два этапа. Сначала определяется поле скорости, которое развивается на морской поверхности при заданных начальных и граничных условиях. Второй этап заключается в определении эволюции загрязнения, представленной в виде набора пассивных жидких частиц, в поле скорости, найденном на первом этапе.

Обезразмеренная гидродинамическая задача решена методом дискретных особенностей, адаптированным к задачам адвекции жидкости [1]. Метод включает в себя дискретизацию береговой линии путем размещения системы точек коллокаций на береговые линии рассматриваемого течения и системы фиксированных точечных вихрей, смещенных внутрь континента или островов. Равенство функций тока на каждой береговой линии позволяет сформировать систему линейных алгебраических уравнений для интенсивности фиксированных точечных вихрей, суммарный вклад которых используется для определения распределения поля скорости в произвольной точке расчетной области течения.

Ветровая нагрузка моделируется с помощью системы вихревых вихрей над поверхностью моря. Интенсивность и ориентация вихревых вихрей используется для коррекции поля скорости под действием нестационарной ветровой нагрузки на морской поверхности.

Пассивная частица жидкости движется со скоростью, равной потоку $U(x,t)$ в точке, в которой находится частица. Равенство скорости частицы и скорости внешнего потока приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, называемой уравнением адвекции [2]

$$\frac{dx}{dt} = U(x,t), \quad x(0) = x_0. \quad (1)$$

Форма области загрязнения описывается системой жидких частиц (пассивные маркеры), соединение которых формирует границы загрязнения. Движение маркеров описывает эволюцию загрязнения на поверхности моря. Выделение гладких отрезков границы загрязнения, позволяет организовать процедуру добавления системы маркеров в сильно удлинённые сегменты границ в зависимости от количества маркеров, образующих такие сегменты. При необходимости применяется процедура уменьшения общего количества маркеров, используемых при вычислениях.

В качестве тестового примера в докладе используются данные [3], полученные после столкновения китайский сухогруза Fu Shan Hai и кипрского контейнеровоза Gdynia (31 мая 2003 года) около о.Борнхольм в Балтийском море (рис.1). Около 1200 тонн нефти и топлива пролилась на морскую поверхность. Столкновение произошло в ясную погоду, был северо-западный ветер 6 м/сек. Наблюдения показали, что поверхностное загрязнение достигло побережья Швеции в течение трех дней из-за умеренного западного ветра.

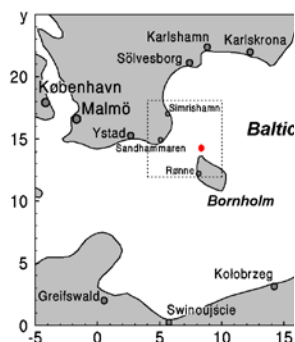


Рис.1. Юго-западная часть Балтийского моря (место аварии – точка к северу от о.Борнхольм)

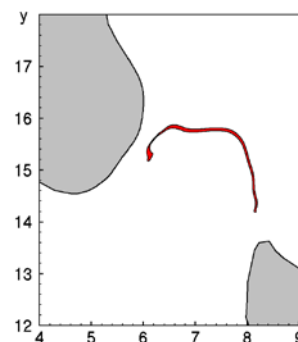
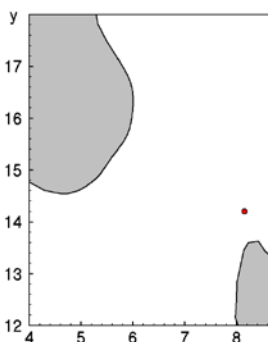


Рис.2. Начальная стадия смещения загрязнения:
а) $t = 0.0$, б) $t = 20.0$

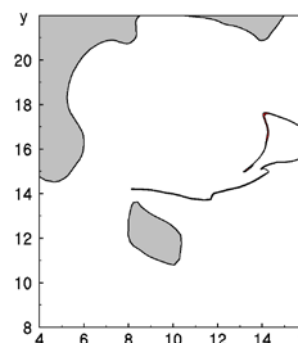
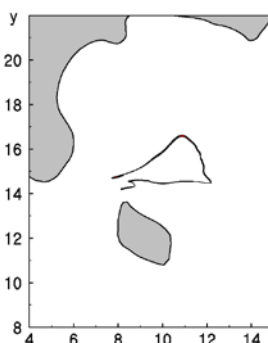
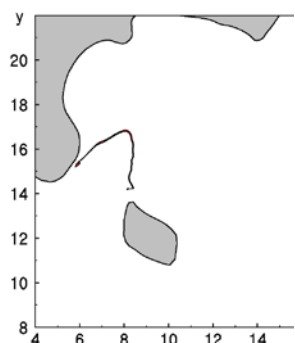


Рис.3. Распространения загрязнения на морской поверхности:
а) $t = 33.0$, б) $t = 46.0$, в) $t = 100.0$

На рис.2 и рис.3 представлены результаты численного моделирования переноса загрязнения на поверхности Балтийского моря. Начальное положение загрязнения показано на рис.2,а. Последующее усиление ветра до умеренного вызвало движение загрязнения двигаться в сторону побережья Швеции. Рис.2,б иллюстрирует положение загрязнения поверхности в момент $t = 20,0$ (3 июня, 6h00).

Затем атмосферный циклон над Балтийским морем усилил ветер и изменил свое направление на северо-восточный. Загрязнение начало смещаться на северо-восток, но часть загрязнения продолжало свое движение вдоль побережья Швеции, $t = 33,0$ (4 июня, 21h00). Дальнейшее усиление ветра в восточном направлении привело к удалению загрязнения от побережья Швеции в направлении серенной части о.Борнхольм (рис.3,б). На рис.3,в показано положение загрязнения при $t = 100.0$ (13 июня, 0h00). Можно видеть, что загрязнение поверхности, покрытой обширную область в северо-восточной части Балтийского моря по отношению к о.Борнхольм.

Результаты моделирования согласуются с фактическими наблюдениями за нефтяным пятном, сообщенными в мировой литературе [3]. Распространение разлива нефти на поверхности моря численное моделировалось на персональном компьютере.

Литература

1. Гуржий А.А., Черний Д.И. Адаптированный метод дискретных особенностей к задаче адвекции пассивной примеси морскими течениями // Прикладная гидромеханика. – 2009. – Т.11, N2. – с.30-39.
2. Ottino J.M. *The Kinematics of mixing: stretching, chaos and transport*, Cambridge University Press, 1989.
3. Christiansen B.M. *3D Oil drift and fate forecast at DMI*. Technical Report No.03-36. Danish Meteorological Institute, Denmark. 2003.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ТУРБУЛЕНТНЫХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Дешко А. Е.
ИТМ НАНУ и ГКАУ, г. Днепропетровск

Проведение численного моделирования процессов истечения струй двигательных установок и их взаимодействия с элементами стартовых устройств при отработке старта ракет-носителей позволяет значительно сократить затраты на экспериментальную отработку. Струйные течения при старте характеризуются ударно-волновой структурой в ядре струи, турбулентным смешением струи с воздухом окружающего пространства, догоранием продуктов сгорания в кислороде воздуха, большой протяженностью расчетной области вдоль оси струи (может составлять десятки калибров струи). Поэтому, проведение параметрических расчетов термогазодинамических параметров турбулентных неизобарических многокомпонентных химически-реагирующих струй продуктов сгорания в рамках полных уравнений Навье-Стокса требует больших вычислительных затрат. Модель стационарных уравнений вязкого слоя для вязкого многокомпонентного химически-реагирующего газа [1] с использованием регуляризации решения в дозвуковых областях течения [2] позволяет проводить расчет истечения неизобарической сверхзвуковой турбулентной струи продуктов при вытекании ее в дозвуковой спутный поток или заторможенное пространство с использованием экономичных маршевых методов.

При истечении турбулентной неизобарической струи в окружающее пространство происходит значительное увеличение поперечного размера струи. От точности определения границы струи зависит точность расчета поля течения в струе в целом. Для уменьшения вычислительных затрат в процессе расчета параметров турбулентного течения в многокомпонентной химически-реагирующей струе используется алгоритм определения асимптотической границы струи, который основан на требовании гладкого сопряжения скорости в струе и в спутном потоке [3].

Существенное влияние на термогазодинамические параметры струи продуктов сгорания, истекающей в окружающее пространство, и особенно, на температуру струи, может оказывать догорание продуктов сгорания в струе под воздействием повышения температуры и давления при торможении сверхзвуковой струи, а также догорания продуктов сгорания в кислороде воздуха. Для исследования влияния химических превращений на параметры турбулентной сверхзвуковой струи продуктов сгорания рассмотрены случаи замороженного состава, неравновесного и равновесного состояния компонент.

Для определения неравновесных параметров струи продуктов сгорания с учетом догорания в воздухе с конечными скоростями химических реакций предложена кинетическая модель, которая включает 2 обратимых элементарных реакции, включающие газообразный углерод и 8 обратимых элементарных реакций для газовой смеси, включающей О-Н компоненты. Тестирование этой модели в среднеобъемном приближении показало, что она позволяет получить хорошее согласование с равновесными значениями параметров после выхода термодинамической системы на равновесный режим при моделировании догорания продуктов сгорания керосина.

Определение параметров струи в предположении равновесного состава выполнено при помощи алгоритма, в основу которого положен термодинамический

метод определения характеристик равновесия, основанный на фундаментальном принципе максимума энтропии. Этот метод позволяет описать любое высокотемпературное состояние термодинамической системы с помощью фундаментальных законов термодинамики, независимо от условий и способов достижения равновесия. Расчеты состава и характеристик равновесия проводятся с использованием базы данных по свойствам индивидуальных веществ.

В результате анализа результатов численного моделирования установлено, что догорание продуктов сгорания в кислороде воздуха приводит к существенному увеличению температуры, заметному увеличению концентраций продуктов сгорания, небольшому увеличению скорости и незначительному уменьшению числа Маха. Влияние химического взаимодействия на давление в струе практически отсутствует. Учет химического взаимодействия в равновесном приближении приводит к усилению тепловых эффектов, по сравнению с неравновесным приближением. Влияние химического взаимодействия на параметры течения в струе проявляется в замедлении процесса смешения струи продуктов сгорания с воздухом. При расчете в равновесном приближении смешение с воздухом менее интенсивно, чем в неравновесном приближении.

1 Тимошенко В. И. О влиянии массового состава неравновесной воздушно-водородной струи на интенсификацию процесса горения в спутном сверхзвуковом потоке воздуха / В. И. Тимошенко, А. Е. Дешко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 3 (110). – С. 52 – 58.

2 Родионов А. В. Новый маршевый метод расчета струй продуктов сгорания / А. В. Родионов // *ЖВМ и МФ*. – 2002. – Т. 42, № 9. – С. 1413 – 1424.

3 Тимошенко В. И. К определению границы вязкой струи сжимаемого газа в спутном потоке / В. И. Тимошенко, А. Е. Дешко, И. С. Белоцерковец // *Техническая механика*. – 2012. – № 2. – С. 31 – 42.

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ВИХРОВОЇ ТЕЧІЇ БІЛЯ ЛУНКИ У ВІДКРИТОМУ ПАКЕТІ OPENFOAM

Димитрієва Н. Ф.
Інститут гідромеханіки НАН України

Помітний прогрес у вирішенні наукоємних задач механіки нестисливих рідин в широкому діапазоні геометричних і фізичних параметрів в останні роки обумовлений розвитком відкритих обчислювальних технологій, які дозволили реалізовувати більш точні методи побудови рішень і чисельні моделі з високою роздільною здатністю. Одним з найбільш перспективних пакетів, що швидко розвиваються та вільно розповсюджується, є OpenFOAM (www.openfoam.com). В основі його вихідного коду лежить набір бібліотек, що надають інструменти для вирішення ряду прикладних задач, а також проводити розпаралелювання розрахунків в суперкомп'ютерних системах. Чисельне моделювання системи рівнянь руху в пакеті OpenFOAM проводиться методом кінцевих об'ємів в декартовій системі координат. Інтеграли по контрольному об'єму зводяться до поверхневого методом Гаусса, а значення функції на поверхні комірки інтерполюється із значень функції в центроїдах сусідніх комірок. Робочою мовою коду є об'єктно-орієнтована мова програмування C++, в термінах якого більшість математичних диференціальних і тензорних операторів в програмному коді рівнянь може бути представлена в зрозумілій формі, а метод дискретизації та розв'язку для кожного оператора може бути обраний користувачем в процесі розрахунку.

Для чисельного вирішення задачі обтікання пластини з лункою запропоновано використовувати стандартний вирішувач `simpleFOAM` пакету OpenFOAM, що реалізує нестационарні рівняння Нав'є-Стокса для нестисливої рідини. Розрахункова область являє собою паралелепіпед, на дні якого на відстані 15 см від початкового перерізу впоперек зовнішній течії розташована лунка напівциліндричної форми діаметром 2 см і довжиною 5 см. На вході в розрахункову область була задана постійна швидкість U_0 , на дні – умова прилипання, на верхній границі – просковзування.

Дискретне представлення обчислювальної області (сітка) є складовою частиною чисельного моделювання і значною мірою визначає успіх рішення задачі. Більш перспективним і функціональним сітковим генератором, особливо для тіл зі складною геометрією, вважається відкрита інтегрована платформа SALOME (www.salome-platform.org). Однією з переваг SALOME є можливість перетворення побудованої розрахункової сітки до форматів, які використовуються в різних комерційних і відкритих пакетах прикладних програм. Створена за допомогою Salome сітка і збережена у форматі UNV, конвертується в формат OpenFOAM командою `ideasUnvToFoam mesh.unv`, де `mesh.unv` - ім'я файлу.

Враховуючи геометрію області розрахунку, запропоновано блочно-структуровану гексадральну сітку з суміщенням ліній на границях блоків. Умови адекватного врахування мікомасштабних елементів вихрової течії накладає суттєві обмеження на мінімальний шаг у просторі поблизу обтічної поверхні та всередині каверни. В той самий час розрахункова область повинна бути достатньо великою, щоб врахувати крупномасштабні структурні елементи течії, що виходять за межі турбулентного примежового шару. Це призводить до збільшення кількості вузлів розрахункової сітки, що суттєво вповільнює швидкість чисельних розрахунків і спонукає дослідника до високоточних обчислювальних систем. Для економного використання розрахункових ресурсів запропоновано згущення сітки в напрямку до лунки. В двовимірній постановці було використано розрахункову сітку із загальною кількістю комірок $2,2 \cdot 10^5$, а для тривимірної задачі – $4,5 \cdot 10^6$.

Успішність розрахунку значною мірою залежить від ефективного аналізу і представлення отриманих результатів. Для проведення повного аналізу структури і динаміки течій OpenFOAM дозволяє обчислювати нові фізичні змінні: повна щільність, завихореність, швидкість дисипації механічної енергії, компоненти тензора в'язких напружень, розподілу різних динамічних характеристик та ін. Для цих цілей використовувалися розширені утиліти `funkySetFields`, що дозволяють задавати аналітичні вирази для шуканих величин, а також `sample` для побудови розподілів уздовж заданих ділянок, поверхонь, перетинів. Крім того, утиліта `sample` дозволяє перетворювати поля змінних до різних форматів, що дає можливість обробляти результати обчислень в інших пакетах прикладних програм.

Візуалізацію результатів розрахунків, проведених із застосуванням відкритого пакету OpenFOAM, пропонується виконувалася з використанням відкритого графічного інтерфейсу ParaView (www.paraview.org). Пакет був розроблений з метою аналізу дуже великих обсягів інформації з використанням розподілених обчислювальних ресурсів пам'яті і може працювати як на кластерах для аналізу даних тера-порядку, так і на персональних комп'ютерах для порівняно менших об'ємів.

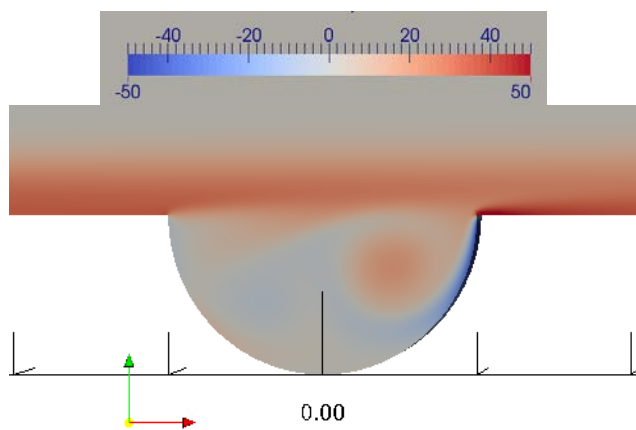


Рис.1 Завихореність в поздовжньому перерізі при $y = 0$

Результати проведених розрахунків показали, що всередині лунки формується циркуляційна зона, яка утворюється взаємодією рідини в лунці та шару зсуву, що сходиться з гострої кромки (рис. 1). При невеликих числах Рейнольдса формується трансверсальна завихореність практично по всьому об'єму лунки, крім невеличких зон поблизу передньої та задньої стінок. З ростом швидкості зовнішнього потоку завихореність стає суттєво тривимірною та нестационарною. Залежність від швидкості зовнішнього потоку різних фізичних величин вздовж лунки наведено на рис. 2.

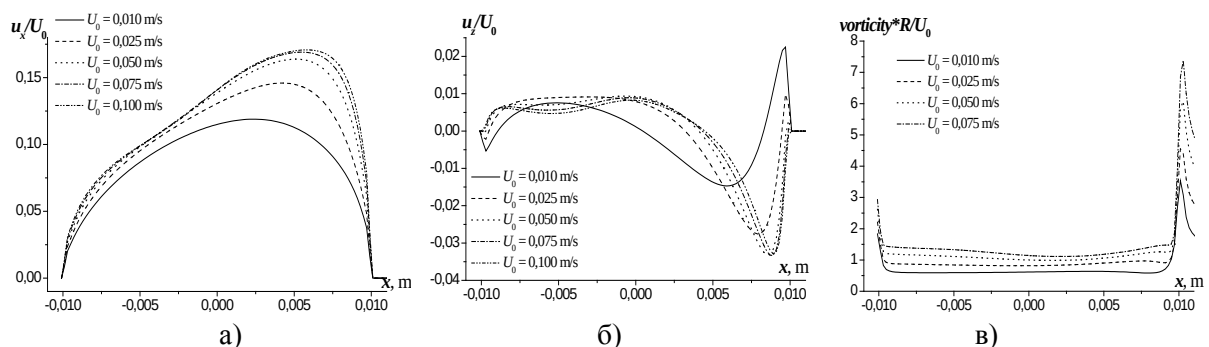


Рис.2 Розподіл фізичних величин вздовж лунки при $y = z = 0$ залежно від швидкості обтікання U_0 : поздовжня (а) та вертикальна (б) компоненти швидкості, завихореність (в)

Результати проведених тестових розрахунків показали задовільну роботу запропонованої методики чисельного моделювання. Еволюція та просторовий розподіл різних фізичних величин відповідає експериментальним даним, а також результатам розрахунків з використанням інших методів чисельного моделювання.

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ СРЕДЫ

Я.Р.Дубик, В.О.Антонченко

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренка НАН Украины, Киев

Наличие среды в трубопроводе сказывается на динамическом поведении исследуемой системы. В простейшем варианте можно учитывать среду как присоединенную массу, однако такой подход может привести к значительным ошибкам, особенно при расчете динамических событий, таких как гидроудар. В более детальном анализе необходимо учитывать взаимодействие, которое возникает между трубой и средой. Взаимодействие между динамическим поведением внутренней среды (жидкости или газа) и механической конструкции происходит путем наложения четырех механизмов [1-2]: взаимодействие на фитингах; Пуассоново взаимодействие; взаимодействие трением; взаимодействие Бурдона.

Взаимодействие может быть сильным или двухсторонним, и слабым или односторонним. Расчет по схеме одностороннего взаимодействия является классическим, когда в начале рассчитываются скорости и давления в среде, а затем эти значения как внешние нагрузки прикладываются к трубопроводу. Расчет по схеме двухстороннего взаимодействия является более сложным, но позволяет получить правильный динамический отклик системы.

Самый удобный и гибкий метод динамического анализа трубопроводов – метод нормальных форм колебаний. Этот метод широко известен в инженерной практике, в частности в сейсмическом анализе, однако для его применения необходимы условия ортогональности форм колебаний.

Система дифференциальных уравнений связанных колебаний для прямого участка трубопровода с учетом Пуассонового взаимодействия имеет вид:

$$K^* A^* \frac{\partial^2 U_{cp}}{\partial x^2} = 2\mu \frac{K^*}{E} \rho_m A^* \frac{\partial^2 V_t}{\partial t^2} + \rho_f A^* \frac{\partial^2 U_{cp}}{\partial t^2}, \quad (1a)$$

$$EA \frac{\partial^2 V_t}{\partial x^2} = \rho_p A \frac{\partial^2 V_t}{\partial t^2} + \mu \frac{R}{h} \rho_f A \frac{\partial^2 U_{cp}}{\partial t^2}, \quad (1б)$$

где x - продольная координата, t - время, V_t - продольное смещение трубы, U_{cp} - продольное смещения среды. h - толщина стенки трубы; R - внутренний радиус, $\rho_{f/p}$ - плотность среды или материала трубы; E - модуль Юнга, $A^* = \pi R^2$ - внутренняя площадь трубы, $A = 2\pi R h$ - площадь сечения трубы, K^* - модуль упругости среды с поправкой на тонкостенность.

Полагаем, что все процессы являются гармоническими, т.е. пропорциональны $\sin \omega t$, где ω - некоторая частота гармонических колебаний, тогда (1) преобразуется в систему ОДУ, относительно функций, зависящих теперь только от x . Решение системы (1) записывается с помощью метода начальных параметров (МНП) в виде:

$$\bar{W}_1 = [A] \cdot \bar{W}_0 \quad (2)$$

Это решение дано [2] в очень простой форме, которое может быть напрямую использовано в расчетах. Необходимые для расчета условия ортогональности приведены в [3], таким образом, мы можем решать динамические задачи для трубопроводных систем с учетом транспортируемой среды, где каждая форма колебаний вносит свой вклад в результирующее движение системы.

Рассмотрим классическую задачу о гидроударе: имеется резервуар с присоединенным трубопроводом, по которому со скоростью $u_0 = 1 \text{ м/с}$ течет жидкость, задвижка мгновенно закрывается, вызывая возникновение волн давления в системе. Решение этой классической задачи получено Н.Е. Жуковским в начале XX века:

$$P_f = \rho_f c_f u_0 \quad (3)$$

Не связанные расчеты выполняются вначале для среды, т.е. определяются амплитуды волн давления (3) и их период $T_f = c_f / L$. Затем эти значения как внешние силы прикладываются к трубе, которая рассматривается как консольная балка. Для проведения связанных расчетов необходимо воспользоваться условиями ортогональности [3] и записать решение в виде метода нормальных форм колебаний. На рис.1 приведено сравнение давлений для не связанного и связанного расчета. Влияние Пуассонового взаимодействия значительно, видно, что связанные расчеты превышают до 50% значение давления полученного формулой Жуковского (3).

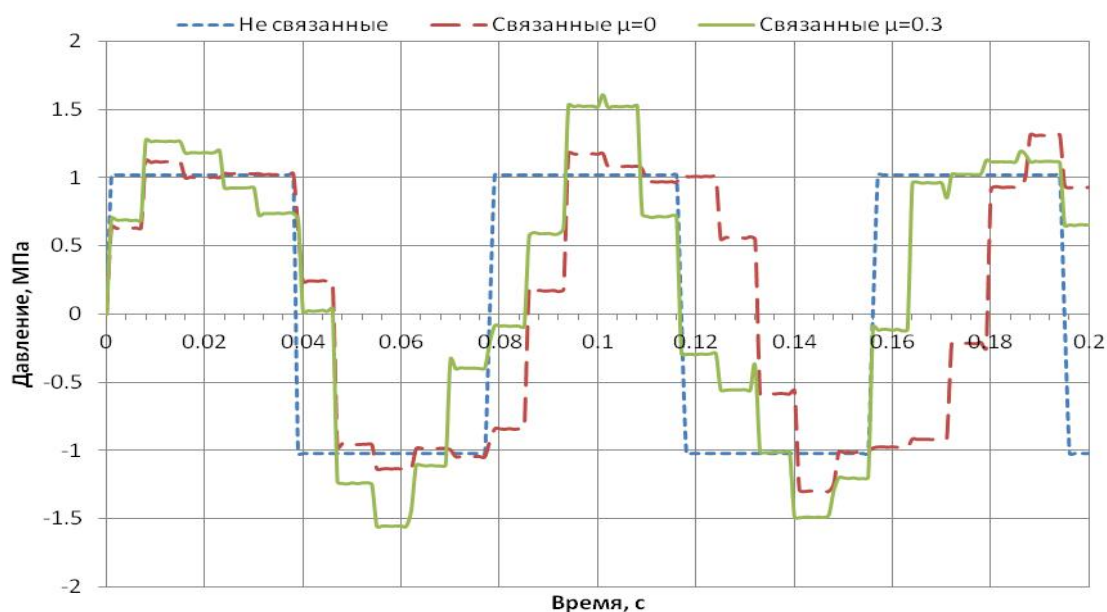


Рис.1. Давление на краю трубы ($x = L$) во времени.

Связанный анализ дает более точные результаты при расчете давлений, напряжений и перемещений, собственных и резонансных частот, демпфирования и усилий в опорах. В частности учет взаимодействия более детально описывает динамическое поведение системы, устраняет резонанс при совпадении акустических и механических частот колебаний

Литература

1. Tijsseling A. S. Fluid-structure interaction in liquid-filled pipes systems: A review / A. S. Tijsseling // J. Fluids Struct. – 1996. – **10**. – P.109-146.
2. Orynyak I. V. Application of the transfer matrix method to the analysis of hydro-mechanical vibration of NPP piping / I. V. Orynyak, S. A. Radchenko, I. R. Dubyk // Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2013-97676. — July 14-18, 2013, Paris. — 10p.
3. Дубик Я. Р. Динамічний аналіз трубопроводів методом нормальних форм коливань з урахуванням взаємодії із середовищем / Я. Р. Дубик // Наукоємні технології. — 2016. — №2. — С. 242–248.

ВЛИЯНИЕ СИММЕТРИИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЯ ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ: ВИХРИ ТЕЙЛОРА И ВОЛНИСТЫЕ ВИХРИ

А. Ф. Зибольд
Донецк

Исследуется стационарная неустойчивость осесимметричного ламинарного течения вязкой проводящей жидкости в бесконечно длинном круговом цилиндре, возникающего под действием соосно вращающегося магнитного поля (ВМП) произвольной поворотной симметрии. Ближайшим аналогом течения проводящей жидкости, возбуждаемого вращающимся магнитным полем, является течение Куэтта между двумя концентрическими цилиндрами, из которых внутренний вращается, а внешний остается неподвижным. Анализируя устойчивость такого течения, Линь [1] отметил, что уравнения первого приближения для малых возмущений скорости и давления допускают решения, периодические относительно φ и z :

$$f = f(r) \cdot \exp(\sigma t + in\varphi + iaz),$$

где n – целое число, а a – действительное (безразмерное волновое число).

Обычно рассматривают специальный случай вращательной симметрии $n = 0$. В этом случае первичное течение не зависит от φ , но возмущения скорости u_r , u_φ , u_z и давления q не равны нулю. Устойчивость первичного азимутального течения и возникающие при этом трехмерные гидродинамические структуры – вихри Тейлора – достаточно подробно исследованы [2-4].

Случай $n \neq 0$ соответствует появлению так называемых волнистых вихрей, когда вдоль оси тейлоровских вихрей распространяются волны. Задача устойчивости первичного азимутального течения относительно возникновения как тейлоровских вихрей, так и волнистых вихрей различного порядка для одной пары полюсов ($p = 1$) ВМП рассмотрена в [5]. Предлагается расширение области параметров этой задачи для произвольных симметрий ВМП. Задача решена для двух случаев: в низкочастотном приближении и для произвольных значений относительной частоты. С использованием метода Галеркина рассчитаны кривые нейтральной устойчивости, соответствующие возникновению вихрей Тейлора и волнистых вихрей. Показано, что при $p = 1$ тейлоровские вихри возникают в достаточно широком, но ограниченном диапазоне параметров течения, и при возрастании параметров теряют устойчивость и переходят в волнистые вихри. Установлено, что при определенных условиях потеря устойчивости первичного течения приводит к появлению непосредственно волнистых вихрей того или иного порядка, минуя стадию тейлоровских вихрей. На кривой нейтральной устойчивости, отделяющей область одномерного азимутального течения от области трехмерного вихревого течения, определены точки бифуркации, соответствующие переходу от вторичного течения в виде тейлоровских вихрей ко вторичному течению в виде волнистых вихрей с $n = 1$ и далее с последовательно все более высоким порядком волнистости. Характерно, что такие переходы сопровождаются скачкообразным увеличением волнового числа, т.е. переходом ко все более мелкомасштабным вихрям. Такой каскад бифуркаций наблюдается как на ветви нейтральной устойчивости, соответствующей низкочастотному приближению, так и на ветви, соответствующей случаю произвольных значений относительной частоты. С увеличением порядка поворотной симметрии ВМП ($p = 2$) сокращается диапазон параметров, при которых потеря устойчивости первичного течения приводит к появлению тейлоровских вихрей. При $p = 3$ вихри Тейлора вообще не возникают, а

сразу появляются волнистые вихри с $n \geq 1$. При $p = 4$ зона возникновения волнистых вихрей с $n = 1$ сокращается, а при $p = 5$ волнистые вихри появляются уже только с $n \geq 2$. Увеличение значений числа Гартмана, относительной частоты и порядка поворотной симметрии ВМП уменьшает характерный размер как тейлоровских, так и волнистых вихрей. Центры вихрей при этом смещаются к стенке цилиндра.

Оказалось, что полученные в низкочастотной постановке значения волновых чисел, при которых происходят переходы между структурами с соседними n , довольно-таки слабо зависят от порядка поворотной симметрии ВМП. Более того, в области произвольных не малых значений относительной частоты значения волновых чисел при таких переходах практически не зависят от значения p . При этом и величина скачка волновых чисел в точках переходов для каждого n остается практически постоянной. Можно предположить, что это объясняется тем, что геометрические параметры гидродинамических структур в точках переходов существенным образом зависят от геометрии магнитного поля. А различие конфигурации магнитных полей для различных p при не малых значениях относительной частоты в большой степени нивелируется из-за скин-эффекта.

Выполненное исследование позволило установить интересный факт, что при потере устойчивости первичного течения возможно возникновение волнистых вихрей без промежуточной стадии в виде тейлоровских вихрей. В этом заключается принципиальное отличие полученных результатов от результатов классической задачи исследования устойчивости течения Куэтта между соосными цилиндрами [6], когда переходу к волнистым вихрям обязательно предшествует стадия тейлоровских вихрей. Такое отличие можно объяснить тем, что течение Куэтта возникает за счет сил вязкости (прилипание жидкости к вращающемуся цилиндру). А в нашем случае при использовании ВМП течение возбуждается за счет полевого воздействия на проводящую жидкость при неподвижной стенке цилиндра. Профили первичного течения принципиально отличаются: в нашем случае всегда существует хотя бы тонкий пограничный слой между ядром течения и стенкой цилиндра.

Выполненное исследование позволяет расширить наши представления о механизмах возникновения неустойчивости течения проводящей жидкости, возбуждаемого ВМП в бесконечно длинном цилиндрическом сосуде. Полученные результаты позволяют при потере устойчивости первичного течения прогнозировать возникновение вторичного течения в виде тейлоровских вихрей или волнистых вихрей того или иного порядка в зависимости от величины силового воздействия на жидкость и порядка поворотной симметрии ВМП. По-видимому, эти выводы будут справедливы и для достаточно длинных цилиндров конечной длины, когда можно пренебречь влиянием торцов на течение в центральной части сосуда.

1. Линь Цзяцзяо Теория гидродинамической устойчивости. М.: изд-во ИЛ, 1958.

2. Капуста А. Б., Зибольд А. Ф. О стационарной неустойчивости осесимметричного течения жидкости во вращающемся магнитном поле // Магнитная гидродинамика. – 1977. – **13**, № 3. – С. 67-76.

3. Капуста А. Б., Зибольд А. Ф. Влияние симметрии вращающегося магнитного поля на устойчивость стационарного осесимметричного течения // Магнитная гидродинамика. – 1981. – **17**, № 4. – С. 134-136.

4. Зибольд А. Ф. Стационарная неустойчивость осесимметричного течения жидкости в слабом вращающемся магнитном поле // Магнитная гидродинамика. – 1984. – **20**, № 2. – С. 61-68.

5. Zibold A. F. Instability of a flow of the conducting liquid generated by the rotating magnetic field: Taylor's and wavy vortices // Fluid Dyn. Res. (in press).

6. Davey A., Di Prima R. C., Stuart J. T. On the instability of Taylor vortices // J. Fluid Mech. – 1968. – **31**, № 1. – P. 17-52.

ХАОТИЧНІ ХРЕСТОПОДІБНІ ХВИЛІ НА ВІЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ РІДИНИ У ПРЯМОКУТНОМУ БАСЕЙНІ

Т. С. Краснопольська, Є. Д. Печук, В. М. Спектор

Інститут гідромеханіки НАНУ, м. Київ, 03680, вул. Желябова 8/4.

Явище збудження хрестоподібних хвиль на вільній поверхні рідини розглянуто у прямокутному басейні скінчених розмірів. Такі хвилі можуть бути збуджені у прямокутному басейні, коли один торець його є махаючим хвилепродуктором. Експериментальні спостереження виявили, що хвилі збуджуються у двох різних резонансних режимах. Перший вид хвиль відповідає вимушеному резонансу, коли реалізуються хвилі у напрямку вібрацій хвилепродуктора з власними частотами рівними частоті збудження. Другий тип хвиль є параметричні резонансні хвилі, їх вузли і максимуми розташовуються перпендикулярно до вібруючих поверхонь. Ці хрестоподібні хвилі мають частоти рівні половині частоти хвилепродуктора. Існування хаотичних аттракторів встановлено у динамічній системі третього порядку, яка описує параметричні коливання амплітуди резонансної моди коливань. На основі аналізу старших показників Ляпунова були встановлені два види усталених режимів: періодичні та хаотичні. Побудовані та вивчені фазові портрети та спектральні щільності розв'язків.

Хрестоподібні хвилі - це хвилі, перпендикулярні до напрямку руху хвилепродуктора. Хоча вони добре відомі принаймні з відомої роботи М. Фарадея 1831 року [2], їх аналіз супроводжується великими математичними труднощами, які викликані тим фактом, що лінеаризовані рівняння не описують механізм їх виникнення і передавання енергії від руху хвилепродуктора в такого роду хвилі.

Хрестоподібні хвилі можуть виникати під час руху хвилепродуктора, який не залежить від поперечної координати, скажімо, від ширини каналу (координати y на рис. 1), коли коливання хвилепродуктора відбуваються вздовж каналу (вздовж координати x на рис. 1). В цьому випадку лінеаризовані рівняння не містять членів, які відповідають передачі енергії від хвилепродуктора в хрестоподібні хвилі, а отже, вони (хвилі) не повинні існувати. Тим не менш вони в експерименті спостерігаються та існують. В експериментах по збудженню хрестоподібних хвиль хвилепродуктор коливається з частотою, половина значення якої близьке до власної частоти хрестоподібних хвиль. Це свідчить про реалізацію параметричного резонансу, тобто механізм збудження хрестоподібних хвиль - реалізація умов параметричного резонансу.

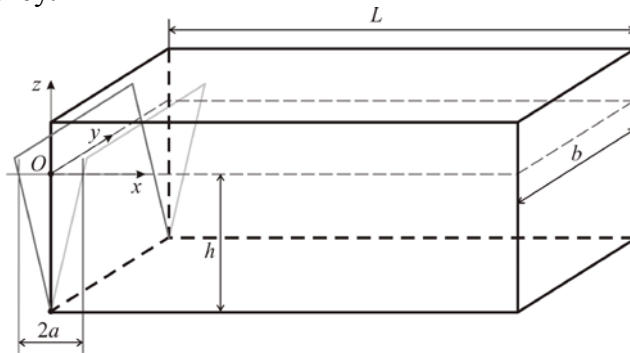


Рис. 1 Схема прямокутного каналу з махаючим хвилепродуктором.

В даній роботі буде показано існування хрестоподібних хвиль без врахування інших поверхневих хвиль в разі, коли геометрія басейну така, що коливання середнього рівня нехтовно малі. Якщо всі попередні дослідження [3-5] вказували, що саме взаємодія хрестоподібних хвиль з основним базовим рухом вільної поверхні рідини,

(базовими хвилями вимушеного резонансу), яке безпосередньо збуджується хвилепродуктором, передає енергію хвилепродуктора в хрестоподібні хвилі. Безумовно, такого роду взаємодія також створює канал перекачки енергії від хвилепродуктора в хрестоподібні хвилі. Але і без врахування такої взаємодії ці хвилі збуджуються та існують.

Механізм генерації хрестоподібних хвиль при наявності суттєвих коливань середнього рівня рідини в басейні вперше був пояснений Гарреттом в 1970 році [3]. Він виділив коливання середнього рівня, а поверхневі хвилі розклав в ряди Фур'є по довжині і ширині басейну. Застосовуючи процедуру Бубнова - Гальоркіна для амплітуди хвилі, яку він розглядав як основну з хвильовими числами $m = 0$ (по довжині басейну x) та $n = 1$ (по ширині) він після лінеаризації рівнянь відносно малої амплітуди хвилі отримав рівняння Мат'є для амплітуди цієї хвилі. З цього рівняння він зробив висновок про можливість існування хвилі з половинною частотою коливань хвилепродуктора при наявності коливань середнього рівня. Коливання середнього рівня в силу виконання закону збереження маси рідини повинні існувати завжди. Однак їх амплітуда може бути нехтовно малою, що залежить від відношення довжини басейна до його глибини. Чим це відношення більше, тим менша амплітуда коливань середнього рівня. При відношенні, близькому до 10, вони стають наступного порядку малості, тобто нехтовно малі. Тому в 1972 р. Дж. Махоні переглянув теорію Гарреттатапоказав, що для довгих басейнів вона непридатна. Він створив теорію генерації хрестоподібних хвиль, коли є взаємодія вимушених хвиль і хрестоподібних[4]. Махоні розглядав вже нелінійні граничні умови на хвилепродукторі. Однак, він розглядав дуже довгий басейн, для якого врахував умови випромінювання. Махоні використовував як головні коливання поверхні рідини, такі, які відповідають славнозвісному розв'язку 1929 року Хавелока для нескінченного басейну [1]. Ми ж розглядаємо генерацію хрестоподібних хвиль в басейні довгому, але скінченних розмірів. Дж. Майлс [5] застосував варіаційний метод для отримання розв'язку для хрестоподібних хвиль в прямокутному басейні. При цьому він зніс граничну умову рівності нулю швидкості на дні басейну на нескінченність, тобто розглядав нескінченно глибокий канал ($4\pi d > b$). Мидосліджуємо хрестоподібні хвилі в прямокутному басейні скінченних розмірів.

1. T.H. Havelock. Forced surface waves on water. *Philosophical Magazine*, vol. 8(7), 569-576, 1929.
2. M. Faraday. On a peculiar class of acoustical figures; and on certain forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic surface, *Philosophical Transactions of Royal Society of London A*, vol. 121, 299-340, 1831.
3. C.J.R. Garrett. Cross waves. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 41, 837-849, 1970.
4. J.J. Mahony. Cross-waves. Part 1. Theory. *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55, 229–244, 1972.
5. J.W. Miles. Parametrically excited, standing cross-waves, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 186, 119–127, 1988.

МОДЕЛЮВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН СИСТЕМИ ЧОРНОГО І АЗОВСЬКОГО МОРІВТА ТУРЕЦЬКИХ ПРОТОК

В. Мадерич, І. Ковалець, К. Терлецька, І. Бровченко

Інститут проблем математичних машин і систем НАНУ, Київ

Чорне та Азовське моря поєднані системою Турецьких проток (Босфор, Дарданелли та Мармурове море) з Егейським морем є дуже складним об'єктом океанографічних досліджень[1-4]. Кліматичні зміни стану Чорного моря залежать від балансу прісної води в басейні моря (опаді, випаровування, річковий стік), температури повітря та вітрового режиму над Чорним морем, а також від змін рівня у північній частині Егейського моря, температури та солоності вод, які втікають до Дарданелл з Егейського моря. Метою роботи була розробка ланцюга, відносно простих, взаємопов'язаних моделей для аналізу сезонної і міжрічної мінливості морів та проток, їх верифікація на доступних даних 2070-2009 рр. та оцінки майбутнього стану у 2010-2100 роках на основі сценаріїв IPCC змін клімату. Розроблена система включає в себе багаторівневу модель розмірності «один із половиною» для Чорного моря, модель Азовського моря і Керченської протоки, доповнені двошаровими гідравлічними моделями проток Босфор і Дарданелли та багаторівневою моделлю Мармурового моря розмірності «один із половиною». Для опису обмінних потоків через протоки Босфор і Дарданелли використовується квазістаціонарна гідравлічна двошарова модель довгих проток із донним іміжшаровим тертям [2,4], яка заснована на так званому «гідравлічному контролі». Порівняння розрахунків з даними спостережень у 1970-2009 показує досить добре узгодження з наявними даними.

Вхідними даними для моделювання кліматичних змін в період 2010-2100 роки згідно сценаріям IPCC RCP 4.5 та RCP 8.5 є результати розрахунків регіональними кліматичними моделями. Річковий стік у Чорне та Азовське моря розраховувався за допомогою моделі нейронних мереж (MATLAB 6.5), у якій використовувались дані різниці опадів-випаровування та середньої температури у водозбірному басейні в якості предикторів. Розрахунки показали, що потік прісних вод у Чорне море з 2010 до 2100 року зменшиться на $2432 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ для сценарія RCP4.5 та на $2844 \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ для сценарія RCP8.5. Основним фактором зменшення притоку прісних вод у Чорне море є збільшення випаровування з поверхні Чорного моря за рахунок підвищення температури повітря та змін циркуляції в регіоні. Зменшення притоку прісних вод на третину та підвищення температури повітря суттєво впливає на рівень моря, який зменшиться, та температуру і солоність, які піднімуться.

ЛІТЕРАТУРА.

1. Maderich V. Modelling of the Mediterranean system: changes under climate variations and man-made impact. // Journal of Environmental Modeling and Software. -1999.-13 (5-6).-P. 405-412
2. Maderich V., Konstantinov S. Seasonal dynamics of the system sea-strait: Black Sea-Bosphorus case study. // Estuarine, Coastal and Shelf Sciences. -2002.-55.-P. 183-196.
3. Kanarska Y., Maderich V. Modelling of seasonal exchange flows through the Dardanelles Strait. // Estuarine, Coastal and Shelf Science. -2008.-79.-P. 449-458.
4. Maderich V., Ilyin Yu., Lemeshko E. Seasonal and interannual variability of the water exchange in the Turkish Straits System estimated by modelling. // Mediterranean Marine Science. -2015.-16 (2).-P. 444-459.

ГЕНЕРАЦИЯ ЗВУКА ПРИ НАТЕКАНИИ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ НА КЛИН

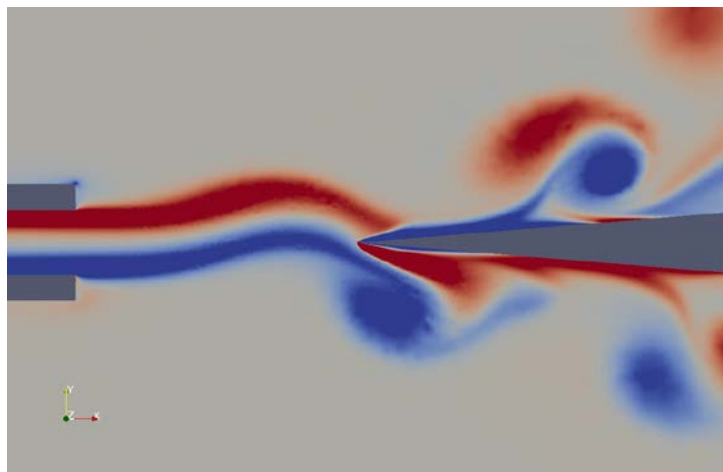
Малюга В.С., Вовк И.В.

Институт гидромеханики НАН Украины. Киев

К струйным гидроаэродинамическим генераторам звука относятся флейты, дудки, волынки и другие подобные духовые музыкальные инструменты. Многие из них известны с давних времен и используются до сегодняшнего дня [1]. В основе работы струйных излучателей лежит явление звукообразования при натекании узкой струи на клин. Схема наиболее простого струйного генератора состоит лишь из двух элементов: канала с соплом на конце и жесткого клина, на который набегающая струя. При достижении струей определенной скорости возникает тональный звук, известный под названием клиновый тон (edgetone). Такой относительно простой струйный генератор встречается в большинстве газоструйных излучателей звука, используемых в технике или в музыкальных инструментах. Например, он присутствует в простом свистке или в технических гудках.

В данной работе мы проводим детальное численное моделирование затопленной струи, набегающей на клин, при различных числах Рейнольдса. На приведенном ниже рисунке показано поле завихренности течения. Гармоничные колебания струи, набегающей на клин, являются механизмом генерации звукового поля в среде. Мы вычисляем при каких скоростях начинаются гармонические колебания струи, исследуем основные характеристики акустического поля при различных скоростях истечения струи, набегающей на клин. Полученные численные результаты сравниваются с экспериментальными данными [2].

Используя метод, изложенный в [3], на основе полученных результатов численного решения гидродинамической задачи мы численно исследуем характеристики генерируемого потоком акустического поля, в том числе пространственное распределение звукового давления (диаграмму направленности), давление и силу звука на оси диаграммы направленности и полную излучаемую мощность.



1. Вовк И. В., Гринченко В. Т. Звук, рожденный потоком— Киев: Наукова думка, 2010. – 221 с.
2. Кондратьев В. И., Назаренко Т. И. Клиновый тон и его усиление – В кн. Аэроакустика. – М.: Наука, 1980. – 144 с.
3. Вовк И.В., Малюга В.С. Об одном методе оценки звукового поля эоловых тонов – Акуст. вісн., 2010. Т. 13, N 2. С. 3 – 19

ПЕРЕМЕШИВАНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЯХ. ПРИМЕРЫ ТЕЧЕНИЙ В КОНЕЧНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КОНТЕЙНЕРЕ.

Малюга В.С.¹, Голиченко А.Л.²

¹Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев

Рассматриваются особенности перемешивания жидкости в трехмерных периодических течениях. Показано, что природа перемешивания в трехмерных течениях имеет гораздо более сложный характер по сравнению с процессом перемешивания в двумерных течениях. Проведено классификацию периодических течений. Показано, что качественное перемешивание жидкости возможно лишь в течениях, которые содержат только изолированные периодические точки. Перемешивание в течениях, содержащих периодические линии, всегда имеет двумерный характер, и, следовательно, получение качественной микстуры в таких течениях невозможно. Процессы перемешивания в течениях, как с периодическими линиями, так и с изолированными периодическими точками иллюстрируются на примере трех периодических течений Стокса в конечном цилиндре. В первом рассмотренном примере движение жидкости в цилиндрической полости генерируется периодическим движением верхней и нижней торцевых крышек, которые по очереди двигаются в направлении осей Ox и Oy . Во втором примере движение жидкости генерируется периодическим движением торцевых крышек, которые по очереди двигаются в разных направлениях параллельно оси Ox . В третьем примере период движения состоит из трех шагов: 1) верхняя крышка движется в направлении Ox , 2) нижняя крышка движется в противоположном направлении $-Ox$, 3) верхняя крышка движется в направлении Oy . В первых двух примерах течение содержит периодические линии, а, следовательно, процесс перемешивания жидкости в таких течениях носит двумерный характер. Сечение Пуанкаре для этих двух примеров показано на рис. 1 а) и б). Видно, что материальная точка не может бродить по всей области течения, а, следовательно, получение качественной микстуры невозможно. В третьем примере течение содержит только изолированные периодические точки. Сечение Пуанкаре такого течения показано на рис. 1 с). Видно, что только в этом случае можно получить качественную микстуру.

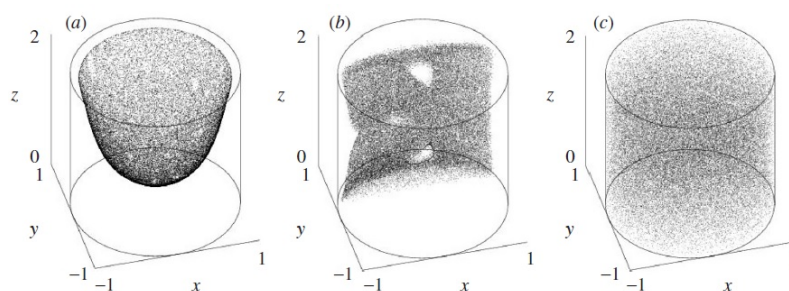


Рис. 1. Сечение Пуанкаре для трех протоколов движения торцевых стенок. Течения а) и б) содержат периодические линии. Течение с) содержит лишь изолированные периодические точки.

Устойчивое и неустойчивое многообразие периодических линий представляют собой две поверхности. Для нахождения этих многообразий использовалась численная техника, основанная на трекинге материальных поверхностей.

1. Malyuga V.S. Mixing in the Stokes flow in cylindrical container/ Malyuga V.S., Meleshko V.V., Speetjens M.F.M., Clercx, H.J.H, van Heijst G.J.F.// Journal of Fluid Mechanics. – 2002. – Vol. 458. – P. 1867–1885.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В БИФУРКАЦИИ СОННОЙ АРТЕРИИ

В. С. Оверко, Н. В. Яснопольская
ИПММ, Славянск, ПМГМУ им. И.М. Сеченова, Москва

Проблема ишемического инсульта в настоящее время, является актуальной как в нашей стране, так и во всем мире. В Украине ежегодно умирает 35% больных, перенесших инсульт, а количество инсультов, регистрируемых ежегодно, составляет около 100 000. Перенесенный инсульт занимает первое место среди причин стойкой утраты трудоспособности и способности к самообслуживанию. От 73% до 87% инсультов – ишемические. В 30-50% случаев причиной ишемического инсульта является стеноз сонных артерий. Основным способом профилактики инсульта при окклюзионно-стенотических поражениях бифуркации сонной артерии является восстановление проходимости сосудистого русла [1-7].

В настоящее время «золотым стандартом» в лечении окклюзионно-стенотических поражений сонных артерий остаются различные варианты каротидной эндартерэктомии: эверсионная каротидная эндартерэктомия, каротидная эндартерэктомия и пластика заплатой [8]. Однако, по мнению ряда авторов, эверсионная методика может быть выполнена в условиях, когда атеросклеротическая бляшка имеет протяженность не более 2 -3 см, а запас (извитость) артерии позволяет выполнить анастомозирование внутренней сонной артерии (ВСА) с бифуркацией общей сонной артерии (ОСА). В противном случае выполнение эндаректомии и адекватное удаление бляшки считается невозможным [3].

В связи с этим был предложен оригинальный способ эверсионной эндартерэктомии, когда применение эверсии возможно практически во всех анатомических ситуациях. Так как новая методика характеризуется изменением ангиоархитектоники сосудистого русла, соответственно возможно изменение нормальных потоков крови во вновь сформированном русле. С целью изучения возможных гемодинамических изменений в ней, и предупреждение осложнений связанных с изменением потоков, перед внедрением ее в клиническую практику данная методика подверглась математическому моделированию и изучению ее гемодинамических характеристик.

Расчеты были проведены в бифуркациях сонной артерий в случаях: а) бифуркация не требующая оперативного вмешательства (NO-модель), б) после оперативного вмешательства без формирования анастомоза (OSA-модель), в) после оперативного вмешательства с формированием анастомоза (ОА-модель), г) после оперативного вмешательства с формированием анастомоза по предлагаемой методике (OAN-модель).

Математическое моделирование течения потока крови при реконструкции бифуркации сонной артерии, продемонстрировало преимущества формирования нового анастомоза с учетом гемодинамических характеристик потока крови. В частности, массовые расходы кровотока в ВСА и НСА практически не изменились по сравнению с расходами в ветвях неоперированной бифуркации (максимальное отклонение СА +3,5% для НСА и +1,8% для ВСА). Оперативное вмешательство без использования ЭКЭн приводит к значительному перераспределению кровотока (до +35,2% для НСА и до -26,3% для ВСА).

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко А.А., Кужугет Р.А., Стародубцев В.Б., Игнатенко П.В., Ким И.Н., Горбатов В.Н. Непосредственные и отдаленные результаты различных методов реконструкции каротидной бифуркации.// Патология кровообращения и кардиохирургия. 2013. № 1. С. 21-24.
2. Мищенко Т.С. Лечение и вторичная профилактика ишемического инсульта/ Т.С. Мищенко // Журн. практ. лікаря. – 2005. – № 2. – С. 8-17.
3. Никульников П.И. Выбор способа пластики бифуркации общей сонной артерии при ее атеросклеротическом окклюзионно- стенотическом поражении.// Клінічна хірургія. – 2009. –№4. – С.22-25.
4. Brott Th. G. Halperin J. L., Abbara S., et al. Guideline on the Management of Patients With Extracranial Carotid and Vertebral Artery Disease. Stroke. 2011; 42:e464-e540.
5. Gao M. Y. et al. Eversion carotid endarterectomy generates fewer microemboli than standard carotid endarterectomy. Eur J Vasc Endovasc Surg. 2000 Aug; 20(2):153-7.
6. Katras T, Baltazar U et al. Durability of eversion carotid endarterectomy: comparison with primary closure and carotid patch angioplasty. J Vasc Surg. 2001 Sep;34(3):453-8.
7. Kumar Rajamani and Seemant Chaturvedi. Stroke Prevention-Surgical and Interventional Approaches to Carotid Stenosis.// Neurotherapeutics. –2011. –8(3): 503–514.
8. Ricotta J.J., Abu Rahma A. et al. Updated Society for Vascular Surgery guidelines for management of extracranial carotid disease J Vasc Surg 2011;54:e1-e31.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ “KERN-DP” ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТИКИ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ

Ю.А. Онанко, В.О. Андрущенко, Г.Т. Продайвода, С.А. Вижва, А.П. Онанко,
С.А. Попов, Р.В. Хоменко, О.В. Шабатура
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
onanko@univ.kiev.ua

ВСТУП

Експериментальні дослідження ультразвуковими (УЗ) методами показують, що анізотропія пружних хвиль обумовлена впливом кристалографічної орієнтації, формою зерен, орієнтацією мікротріщин [1,2]. Для обчислення осереднених пружних постійних C_{ijkl} застосовується інваріантно-поляризаційний метод [2]. Автоматизована система (АС) дозволяє проводити аналіз параметрів анізотропії пружних хвиль. Всі результати розрахунків, які проводяться АС “KERN-DP”, записуються у базу даних в автоматичному режимі, при цьому виключається можливість внесення некоректних даних оператором в ручному режимі.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Використовувалися УЗ методи для вимірювання внутрішнього тертя (ВТ) и модуля пружності E [2]. Також установка методики акустичної емісії (АЕ). Загальне підсилення реєструючої апаратури на основі спеціалізованого акустоемісійного приладу АФ-15 було $\alpha = 60 \div 70$ дБ. Потужність імпульсу рубінового лазера $I \approx 300$ МВт/см². Тривалість дії імпульсу рубінового лазера $\tau \approx 20$ нсек з довжиною хвилі $\lambda = 694$ нм. Площа лазерної плями була $S_0 \approx 1 \times 1$ мм².

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Коефіцієнт затухання УЗ $\alpha = \frac{Q^{-1}}{\lambda} = \frac{Q^{-1}}{\frac{V}{f}} = \frac{\lg\left(\frac{A_0}{A_1}\right)}{h}$ на рис. 1, внутрішнє тертя

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\pi} \text{ на рис. 2 і дефект внутрішнього тертя } \frac{\Delta Q^{-1}}{Q^{-1}} = \frac{Q^{-1}_{нас} - Q^{-1}_{ск}}{Q^{-1}_{ск}}$$

визначались з осцилограм імпульсів швидкості відповідної поляризації $V_{P[001]}$ в сухому скелеті SiO₂ до і після насичення флюїдом $V_{P[001]}^H$ з ln відношень амплітуд $A_1, A_2, (A_0 - \text{без зразка})$.

$\alpha \times 10^3, \text{ дБ/мм}$

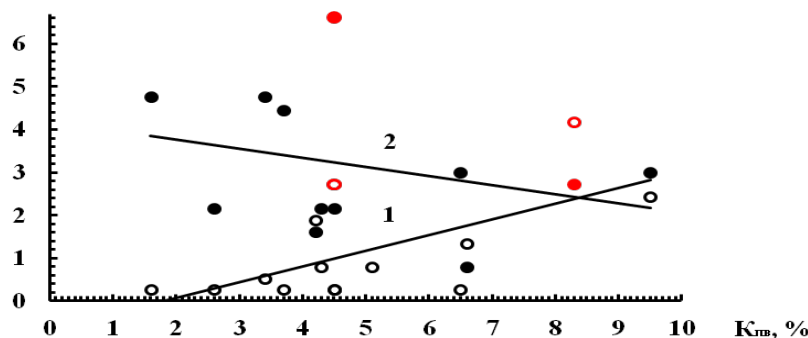


Рис. 1. Кореляційна залежність між геофізичними параметрами та колекторськими властивостями: коефіцієнту затухання УЗ α у SiO₂ від коефіцієнту відкритої пористості

$$K_{тв} = \frac{V_{тв}}{V} : 1 - \text{до, } 2 - \text{після насичення } \rho_{\text{NaCl}} = 180 \text{ кг/м}^3.$$

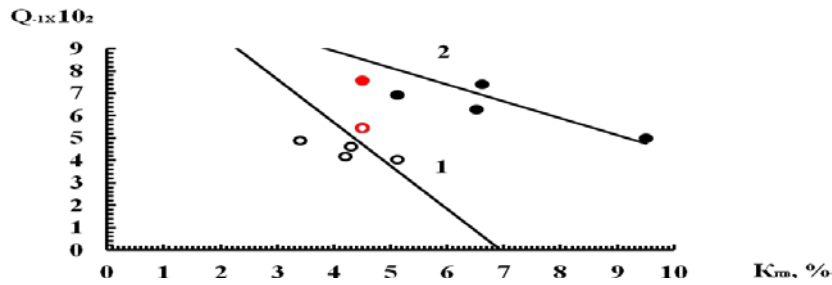


Рис. 2. Кореляційна залежність між геофізичними параметрами та колекторськими

властивостями: внутрішнього тертя $Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\pi}$ у SiO_2 від коефіцієнту відкритої пористості $K_{пв}$: 1 – до, 2 – після насичення $\rho_{\text{NaCl}} = 180 \text{ кг/м}^3$.

Глибинна залежність акустичного каротажу (4) *in situ* корелює з глибинними залежностями квазіповздовжньої $V_{P[001]}$ (1,2) і квазіпоперечної “швидкої” $V_{S1[001]}$ (5) та “повільної” $V_{S2[001]}$ (6) *in vitro* швидкостей в пісковику SiO_2 на рис. 3.

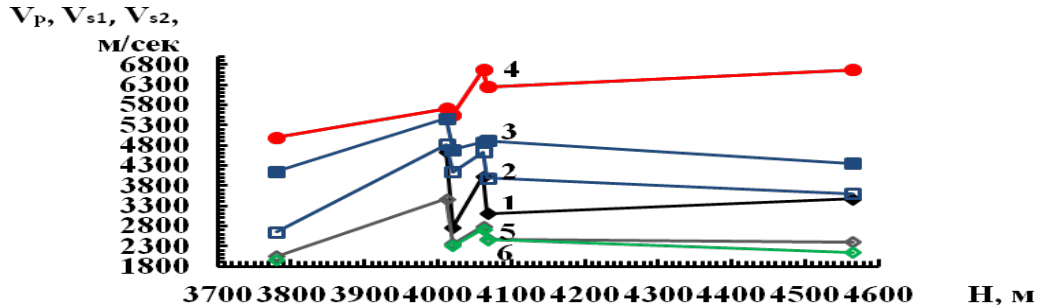


Рис. 3. Глибинна залежність квазіповздовжньої $V_{P[001]}$ і квазіпоперечної “швидкої” $V_{S1[001]}$ та “повільної” $V_{S2[001]}$ швидкостей в пісковику SiO_2 : 1 – УЗВШ-КНУ, 2 – Керн-4, 3 – Керн-4 після насичення $\rho_{\text{NaCl}} = 180 \text{ кг/м}^3$, 4 – акустичний каротаж, 5 – квазіпоперечна “швидка” $V_{S1[001]}$, 6 – квазіпоперечна “повільна” $V_{S2[001]}$.

ВИСНОВКИ

1. Автоматизована система “KERN-DP” на мові програмування Delphi 7 за допомогою зовнішнього OLE 2.0 – сервера використовує програму Surfer 10 для чисельного та графічного аналізу і візуалізації в автоматичному режимі даних УЗ вимірювань параметрів анізотропії: диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d , інтегрального коефіцієнта пружної анізотропії A_μ , швидкостей пружних хвиль в матеріалах для експрес-обробки експериментальних значень фазових швидкостей квазіповздовжньої V_P , “швидкої” V_{S1} і “повільної” V_{S2} квазіпоперечних хвиль інваріантно-поляризаційним методом.

2. Проведений аналіз параметрів пружної анізотропії A_d , A_μ осадових порід показав, що ромбічне наближення забезпечило максимальне узгодження експериментальних і розрахункових даних та ефективність використання інваріантно-поляризаційного методу для вирішення задач акустичного текстурного аналізу. Одержані данні пружних постійних C_{mn} пісковику SiO_2 , вапняків CaCO_3 .

ЛІТЕРАТУРА

1. Вовк І.В., Грінченко В.Т. Звук, рожденный потоком. – Київ: Наукова думка, 2010. – 221 с.
2. Вишва С.А., Продайвода Г.Т., Онанко Ю.А. Сейсмоакустична діагностика процесів руйнування в геологічному середовищі // Геоінформатика. – 2011. - № 1. - С. 42-47.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ “KERN-DP” ПАРАМЕТРІВ ДІАГНОСТИКИ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ

Ю.А. Онанко, В.О. Андрущенко, Г.Т. Продайвода, С.А. Вижва, А.П. Онанко,
С.А. Попов, Р.В. Хоменко, О.В. Шабатура

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
onanko@univ.kiev.ua

ВСТУП

Визначення повних наборів матриць тензора пружних постійних C_{ijkl} і тензора акустичних констант μ_{il} в триклинному наближенні та їх симетрії, чисельні розрахунки параметрів анізотропії: диференціального коефіцієнта пружної анізотропії A_d , інтегрального коефіцієнта пружної анізотропії A_μ і їх графічна візуалізація вимагають великих об'ємів обчислень [1-2]. Дану розробку - програмне забезпечення “KERN-DP” можна застосовувати при дослідженнях сильно анізотропних матеріалів. Програмне забезпечення “KERN-DP” дозволяє проводити аналіз параметрів анізотропії пружних хвиль в матеріалах.

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Використовувалися ультразвукові (УЗ) методики для вимірювання модуля пружності E і внутрішнього тертя (ВТ) складного п'єзоелектричного вібратора на частоті $f \approx 117$ кГц, оптичні спостереження мікроструктури за допомогою мікроскопа “ЛОМО MBT”, інвертовного металургійного системного мікроскопа “GX51”, акустичної емісії (АЕ), скануючої атомно-силової мікроскопії (АСМ). Комп'ютеризована установка “Керн-4” на рис. 1 складається із вимірювального блока і персонального комп'ютера із операційною системою “Windows XP”. Використовувалися також теоретичні методи із застосуванням розробленого алгоритму та програмного забезпечення автоматизованої системи “KERN-DP” на мові програмування Delphi 7 за допомогою зовнішнього OLE 2.0 – сервера, який використовує програму Surfer 10 для чисельного та графічного аналізу і візуалізації в автоматичному режимі даних [3].

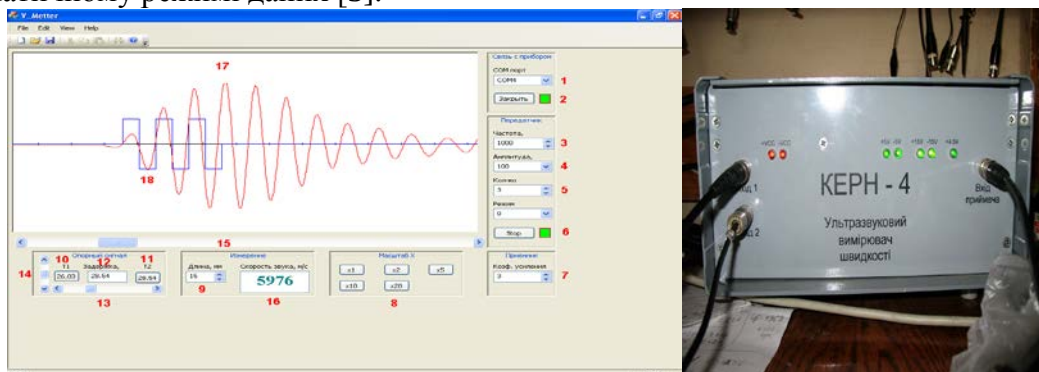


Рис. 1. Ілюстрація вікна обробки даних вимірювань швидкостей пружних хвиль в гірських породах луна-імпульсної методики на частоті $f_{\parallel} \approx 1,11$ МГц, $f_{\perp} \approx 0,43$ МГц і загальний вид комп'ютеризованої установки КЕРН-4.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

З осцилограми на рис. 2 визначалась квазіповздовжня УЗ швидкість $V_{P[001]} = 5280$ м/сек, модуль пружності $E_{001} = \rho V_{P[001]}^2 = 70,53$ ГПа; “швидка” квазіпоперечна УЗ швидкість $V_{S1[001]} = 3200$ м/сек, модуль зсуву $G_{001} = \rho V_{S1[001]}^2 = 25,91$ ГПа, потім коефіцієнт Пуассону $\mu = 0,2097$, температура Дебая $\theta_D = 309,3$ К SiO_2 .

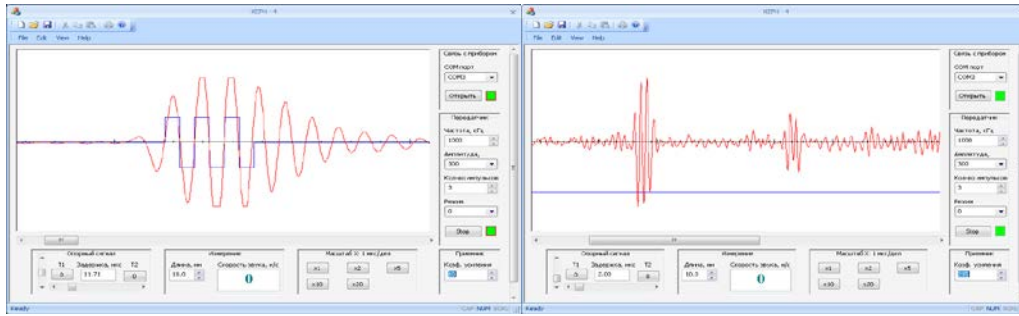


Рис. 2. Ілюстрація вікна обробки даних вимірювань швидкості квазіпоперечної поляризації V_{S1} в SiO_2 комп'ютеризованої установки КЕРН-4.

Внутрішнє тертя $Q^{-1} = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\pi}$, дефект внутрішнього тертя

$$\frac{\Delta Q^{-1}}{Q^{-1}} = \frac{Q^{-1}_{\text{нас}} - Q^{-1}_{\text{ск}}}{Q^{-1}_{\text{ск}}} \text{ на рис. 3 і коефіцієнт затухання УЗ } \alpha = \frac{Q^{-1}}{\lambda} = \frac{Q^{-1}}{V} = \frac{\lg\left(\frac{A_0}{A_1}\right)}{h}$$

визначались з осцилограм імпульсів відповідної поляризації $V_{P[001]}$ в “сухому” скелеті SiO_2 на рис. 2 до і після насичення $V_{P[001]}$ з $\ln$ відношень амплітуд $A_1, A_2, (A_0 - \text{без зразка})$.

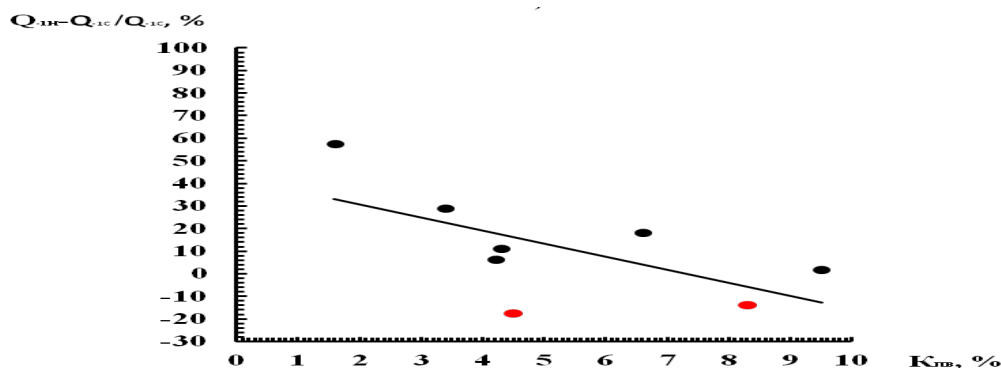


Рис. 3. Кореляційна залежність між геофізичними параметрами та колекторськими властивостями: дефекту внутрішнього тертя $\frac{\Delta Q^{-1}}{Q^{-1}} = \frac{Q^{-1}_{\text{нас}} - Q^{-1}_{\text{ск}}}{Q^{-1}_{\text{ск}}}$ у SiO_2 від коефіцієнту

$$\text{відкритої пористості } K_{\text{пв}} = \frac{V_{\text{пв}}}{V}.$$

ВИСНОВКИ

1. Розроблено програмне забезпечення “KERN-DP” для аналізу параметрів анізотропії пружних хвиль.

2. Програмне забезпечення “KERN-DP” обробки даних ультразвукових вимірювань анізотропії швидкостей в матеріалах побудована за віконним принципом. Розроблена структура бази даних на мові MySQL інформації, фізичних властивостей, розроблені спеціальні процедури управління даними.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мезон У.П. Физическая акустика. Методы и приборы ультразвуковых исследований. Т. 1. Часть А. – М.: Мир, 1966. – 592 с.
2. Грінченко В.Т., Вовк І.В., Маципура В.Т. Основи акустики. – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
3. Онанко Ю.А. Автоматизована система аналізу даних вимірювань анізотропії в гірських породах // Геоінформатика. – 2013. - № 2(46). - С. 55-60.

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ГІДРОМОРФОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Б.М.Островець¹, Л.С.Потапенко²

¹Інститут Гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

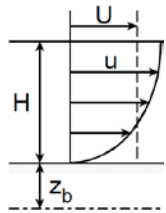
²Український Центр Менеджменту Землі і Ресурсів, Київ, Україна

Для розв'язання багатьох прикладних задач забезпечення транспортних та екологічних потреб найбільше поширення знайшли математичні методи, в основі яких покладені рівняння руху, що відображають основні сили, які діють в потоці. Рівняння формулюються в рамках теорії мілкої води та транспорту незв'язаних наносів [1]. В ІГМ розроблені методи та комп'ютерні програми розрахунку руслових процесів на основі експериментів та багаторічних спостережень за гідроморфодинамікою річок Дніпро та Дунай [2,3].

Слід зазначити, що універсальних залежностей, що виражають значення напруг тертя від дії вітру й тертя дном ріки до теперішнього часу не існує й тому вони повинні вибиратися в ході адаптації математичних моделей для конкретних умов на основі проведення спеціальних дуже витратних експериментальних та натурних досліджень [4]. Для розрахунків можуть бути використані формули, які найбільш часто застосовуються в гідравліці відкритих потоків і динаміці прибережної зони.

В разі недостатності експериментальних даних доцільно використовувати сучасні відкриті системи які мають широкий спектр опцій пристосування результатів розрахунків до натурних спостережень, що дозволяє надійно визначати параметри потоків у руслових та прибережних зонах морів та водосховищ. Тут використовується програма *FST2DH* (Flow and Sediment Transport Model) [4], яка реалізує метод скінченних елементів для розрахунку нестационарної усередненої за глибиною течії поверхневих вод и транспорта наносів. Більшість вихідних даних залежать від географічних координат та відміток (батиметрія, границі т.і.), тому раціонально вести обробку даних методами геоінформаційних систем[5]. Побудова розрахункових сіток, обробка та візуалізація результатів розрахунків також виконується засобами ГІС [6].

В систему розрахункових рівнянь входять рівняння нерозривності з врахуванням деформації дна (розмиву/замулення) на глибину активної зони z_b (див. рисунок), рівняння збереження імпульсу та рівняння переносу тяглих та завислих наносів.



Компоненти придонних дотичних напруг визначаються наступним чином

$$\tau_{bx} = \rho c_f m_b \frac{q_1 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{H^2}; \tau_{by} = \rho c_f m_b \frac{q_2 \sqrt{q_1^2 + q_2^2}}{H^2}; m_b = \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z_b}{\partial y}\right)^2}$$

де $q_1 = UH$ - питома витрата по x , $q_2 = VH$ - питома витрата по y .

Зміни поверхні дна під час розмиву та відкладення наносів визначається рівнянням балансу наносів

$$(1 - \eta_s) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{s1}}{\partial x} + \frac{\partial q_{s2}}{\partial y} = 0$$

де η_s - пористість донного матеріалу, q_{s1} , q_{s2} - питома об'ємна витрата тяглих та завислих наносів (на одиничну ширину течії). Перенос тяглих та завислих наносів для часток i -ї фракції визначається відомим рівнянням, де динамічна рівновага наносів визначається формулою Енглунда-Хансена

$$C_{si}^* = 0.05 \frac{\sqrt{(\rho_s / \rho - 1) g D_i^3}}{q} \left(\frac{U_s}{u_*} \right)^2 \tau_{*i}^{2.5}$$

де ρ_s - щільність наносів; U_s - швидкість в напрямку потоку, усереднена за глибинною; u_* - придонна дотична швидкість, D_i - діаметр часток i -ої фракції;

$$\tau_{*i} = \frac{\rho u_*^2}{(\rho_s / \rho - 1) \rho g D_i} \text{ — напруга зрушення часток } i\text{-ої фракції.}$$

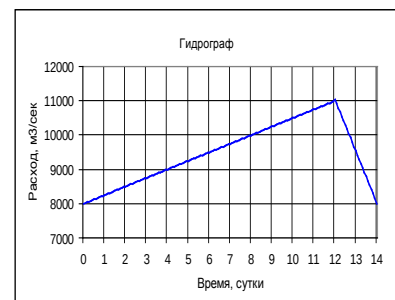
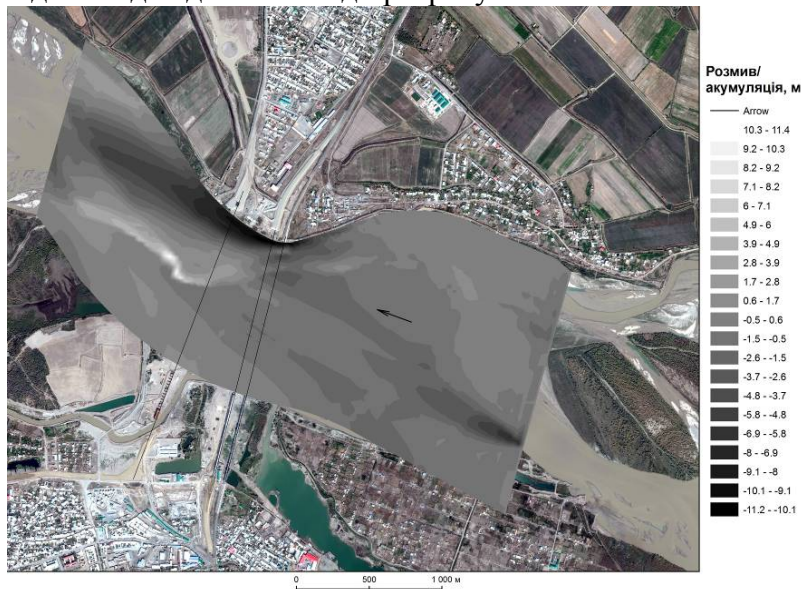
Метою роботи є оцінка деформацій дна р. Амудар'я біля руслових опор та берегових захисних споруд в зоні існуючого залізничного мосту для визначення вихідних проектних параметрів додаткових мостових переходів (МП) на трасі Туркменабат-Фарап (Туркменістан). Зона моделювання (див. рис.) має протяжність 4000 м та ширину від 1060 м на ділянці мостових переходів до 1700 м на вхідній ділянці. Елементи розрахункової сітки направлені паралельно опорам і мають прямокутну форму 20*40 м, в зоні мостових переходів сітка згущується до 20*20 м. Кількість елементів сітки становить 8800.

При моделюванні враховані конструктивні елементи МП — захисні дамби та опори МП. Ефект стиснення потоку мостовими опорами враховується рівномірним розподілом гідродинамічного опору впоперек елемента сітки, що містить опору. У верхньому створі течії задані витрати Q , в нижньому — рівень поверхні води z_w .

На межах берегів задані граничні умови $q_n = 0$, q_n — нормальні питомі витрати.

Розрахунок повені для оцінки загального розмиву проведений по гідрографу тривалістю 14 діб в межах $Q > 8000 \text{ м}^3/\text{с}$. Для визначення початкових умов розрахована стаціонарна течія з граничними умовами $Q = 8000 \text{ м}^3/\text{с}$, $z_w = 189.5 \text{ м}$

Деформація поверхні дна (товщина шару розмиву/замулення) після дії потоку на природне річище на протязі розрахункового гідрографа представлена на рисунку нижче. Спостерігається утворення зони розмиву поблизу правобережної дамби. Біля лівого берега спостерігається замулення існуючої донної улоговини, що відповідає натурним спостереженням. Обсяги деформації дна визначаються методом порівняння відміток дна до та після дії розрахункової повені.



Розрахункові деформації дна річища Амудар'ї (натурні виміри 2014р.) за гідрографом 14 діб повені на фоні знімка супутника GeoEYE-1 в період близький до піку повені 19 липня 2015 р.

Література

1. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. М.: 1972.—216 с.
2. Островерх Б.М., Хомицкий В.В. Развитие теории и методов моделирования русловых процессов. // Прикладная механика. —2007, т.9(81).—с.139—149.
3. Гидрология дельты Дуная (под ред. В.Н. Михайлова). М.: ГЕОС, 2004.—448 с.
4. Two dimensional Depth-averaged Flow and Sediment Transport Model. Publication No. FHWA-RD-03-053, U.S. Department of Transportation, 2003.
5. Лурье И.К. Основы геоинформатики и создания ГИС. М.:Изд. МГУ, 2002.—140 с.
6. ArcGIS Desktop 9.1 ESRI, ліцензія УЦМЗР

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И АЭРОДИНАМИКИ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ВНУТРИ ВИНТООБРАЗНЫХ ТРУБ

Е.Н. Письменный, А.М. Терех, А.В. Баранюк, С.А. Рева

Национальный технический университет Украины "КПИ", г. Киев, Украина

Работа посвящена исследованию теплоаэродинамических характеристик винтообразных труб, изготовленных способом роликового выдавливания из гладкой круглой трубы. Такие трубы предназначены для использования в качестве базовых элементов теплообменных поверхностей воздухонагревателей-регенераторов газотурбинных установок, нагревателей топливного газа, котельных воздухоподогревателей и т.д.

Исследованы теплообмен и аэродинамика при течении воздушного потока внутри винтообразных труб двух типоразмеров, отличающихся высотой выступов (впадин) и шагами между ними.

Исследованные винтообразные трубы показаны на рис.1.



Рис. 1 Общий вид винтообразных труб с равноразвитой поверхностью

Высота и шаг выступов (впадин), образующих профиль винтообразной трубы (рис. 2а, б), соответственно составляли $h = 5$ мм, $t = 12$ мм (тип 1) и $h = 3$, $t = 8$ мм (тип 2). Радиус скругления вершин выступов (впадин) равнялся 1,6 мм. В зависимости от указанных геометрических величин степень развития исходной гладкой поверхности (коэффициент оребрения) при ее преобразовании в винтообразную составляла 1,15 и 1,27. За определяющий размер в числах Нуссельта Nu и Рейнольдса Re принимался наружный диаметр $D = 38$ мм, ограниченный вершинами выступов (рис. 2). Теплофизические константы, входящие

в числа Nu и Re , относились к среднебалансовой температуре воздуха в ряду пакета, где находилась труба-калориметр. За определяющую скорость воздуха в числах Re принималась скорость в наиболее узком сечении пакета.

Теплообмен и аэродинамика внутри трубы исследовались экспериментальным и численным методами [1]. При численном исследовании, на входе в трубу задавались следующие параметры: средняя температура воздуха $T_\infty = 19,3$ °С, давление $P_\infty = 0,1$ МПа, степень турбулентности $Tu_\infty = 0,1$ %, профиль скорости – развитый турбулентный. На стенке трубы, с целью обеспечения корректного сопоставления результатов численного моделирования с данными экспериментальных исследований [1, 2], задавались граничные условия типа $q_w = \text{const}$. Числа подобия рассчитывались по среднерасходной скорости воздуха $w_{\text{ср}}$ и внутреннему проточному диаметру трубы $D = 36$ мм. В качестве определяющей температуры принималась средняя температура потока воздуха в трубе. Исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (10 - 60) \cdot 10^3$. Методика экспериментального исследования внутри трубы винтообразного профиля подробно изложена в [1].

Результаты экспериментальных и численных исследований конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления внутри винтообразной трубы представлены на рис. 2 а и б.

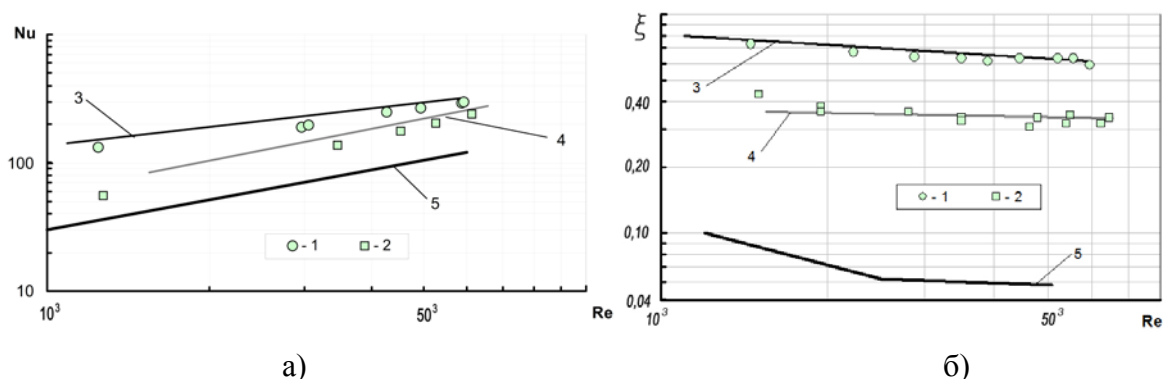


Рис.2. Сравнение экспериментальных и численных данных по теплообмену (а) и аэродинамическому сопротивлению (б) внутри трубы: 1 и 2 – тип 1: $h = 5$ мм, $t = 12$ мм и тип 2: $h = 3$ мм, $t = 8$ мм; 3 и 4 – численное моделирование: тип 1 - $h = 5$ мм, $t = 12$ мм и тип 2 - $h = 3$ мм, $t = 8$ мм; 5 – гладкая труба [3,4].

Данные, полученные CFD-моделированием (линии 3 и 4 на графиках) показали удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными (точки 1 и 2 на графиках) в пределах (12-15) %.

Эффект интенсификации теплоотдачи в винтообразной трубе оценивался путем сравнения данных по теплообмену для цилиндрической трубы при развитом турбулентном режиме течения, рассчитанных по известной формуле [3]. Анализируя полученные результаты, можно сказать, что для разных профилей винтообразных труб в заданном диапазоне чисел Рейнольдса все зависимости $Nu = f(Re)$ расположены значительно выше расчетной кривой для цилиндрической трубы и имеют наклон близкий к турбулентному закону теплообмена.

Результаты исследований аэродинамического сопротивления (рис. 2, б) свидетельствуют, что экспериментальные данные при $Re > 20 \cdot 10^3$ имеют практически автомодельный режим. В диапазоне изменения чисел Рейнольдса от $10 \cdot 10^3$ до $20 \cdot 10^3$ коэффициент сопротивления постепенно снижается с увеличением чисел Рейнольдса. Кривая $\xi = f(Re)$ качественно повторяет кривую для цилиндрической трубы [4].

Рассмотренные конструкции теплообменных труб позволяют увеличить интенсивность теплообмена внутри винтообразной трубы в 1,45 - 2,4 раза при росте сопротивления в 6-9 раз по сравнению с гладкими круглыми трубами в диапазоне чисел Рейнольдса от $(10 - 60) \cdot 10^3$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Письменный Е.Н. Равноразвитые поверхности теплообмена и методика численных исследований их теплогидравлических характеристик/Е.Н. Письменный, А.В. Баранюк, М.М. Вознюк//Промышленная теплотехника.-2012.-Т.34-№1.-С.45-54.
2. Демчук Л.В., Рогачов В.А., Терех О.М., О.І.Руденко. Теплоаэродинамічна ефективність гвинтоподібних труб з рівнорозвиненою поверхнею // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2007. -№5/8(53). -С. 26 – 30.
3. Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод /под ред. Н.В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973.- 296 с.
4. Аэродинамический расчет котельных установок: нормативный метод /под ред. С.И. Мочана. – М.: Энергия, 1977.- 256 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РДТТ

А.А. Приходько, Н.Ю. Артеменко, Г.Э. Толочьянц, М.С. Арсенюк
Днепропетровский национальный университет имени О.Гончара,
ГП «Конструкторское бюро Южное», Днепропетровск

Твердотопливные ракетные двигатели получили широкое распространение в ракетно-космической технике. Они применяются в качестве маршевых двигательных установок в оперативно-тактических ракетах и ракетоносителях различного класса, для торможения отработавших ступеней ракет-носителей, для дополнительного разгона космических аппаратов при переходе с орбиты на орбиту. Разработка методик расчета течения продуктов сгорания в камерах сгорания и соплах ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) является актуальной задачей.

Известно значительное количество работ, посвященных исследованию внутрикамерных процессов, проектированию РДТТ. В докладе приведен обзор литературы по проблеме расчета двухфазных потоков в проточной части РДТТ, анализируются физические особенности двухфазных потоков, модели многофазных сред, механическое взаимодействие частицы с потоком, теплообмен частиц с потоком, общие системы уравнений для моделирования двухфазных течений, известные расчеты двухфазных течений в соплах, упрощенные методики для расчета внутрикамерных параметров в РДТТ.

Развитие вычислительной аэродинамики было стимулировано растущими потребностями в теоретических исследованиях в механике жидкости и газа, тепломассообмене, при решении прикладных задач ракетной и авиационной техники, машиностроения, металлургии. Расчет интегральных характеристик одно- и двухфазных потоков продуктов сгорания в камере сгорания, критическом сечении и на срезе сопла представляют значительный интерес при решении многих задач проектирования и отработки конструкции твердотопливных ракетных двигателей РДТТ.

Для расчета газодинамических процессов разработано программно-методическое обеспечение. При описании несущей среды применяются уравнения Навье-Стокса сжимаемого газа. При описании движения частиц использованы модель взаимопроникающих сред, инерционная и гомогенная модели. В модели взаимопроникающих сред набегающий поток принимается двухскоростным и двухтемпературным, состоящим из несущей фазы и капель одного диаметра. Столкновениями между частицами пренебрегают, дискретная фаза считается лишенной собственного давления. Вязкие силы проявляются только в несущей фазе и при взаимодействии частиц с газом. В инерционной модели траектории капель рассчитываются после получения поля скоростей несущей фазы. Обратного влияния траектории капель на несущую среду не оказывают. Гомогенная модель предполагает, что жидкая и газообразная фазы движутся с одинаковыми скоростями, учитывается обмен массой, импульсом и энергией между фазами.

При построении численного алгоритма применялся метод конечных объемов. Расчеты проводились на гексаэдрической неструктурированной сетке. Разработаны алгоритмы дискретизации расчетной области и визуализации течений для проточной части РДТТ. Выполнено тестирование программно-методического обеспечения на трансзвуковом течении в диффузоре.

Проведены расчеты газодинамических процессов продуктов сгорания в проточной части многоступенчатого РДТТ. Анализируются результаты визуализации пространственного потока внутри камеры сгорания и сопла, распределения чисел Маха, давления и температуры потока вдоль оси сопла. Выполнено сравнение рассчитанных интегральных характеристик РДТТ с данными натурных испытаний.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ВБЛИЗИ ЭКРАНА

Д.А. Редчиц

Институт транспортных систем и технологий НАН Украины

Введение. На сегодняшний день оптимизация аэродинамической формы автотягачей с прицепом проводится путем многократных продувок в аэродинамических трубах. В ближайшем будущем CFD (Computational Fluid Dynamics) расчеты могут существенно уменьшить число необходимых продувок в аэродинамических трубах и как следствие снизить конечную стоимость изделия.

Целью работы является математическое моделирование физических процессов при турбулентном обтекании транспортного средства вблизи экрана турбулентным потоком.

Краткое описание натурного эксперимента. Для компьютерного моделирования обтекания транспортного средства вблизи экрана турбулентным потоком была выбрана компоновка наземной транспортной системы (Ground Transportation System – GTS), которая отражает геометрию автотягача с прицепом, в просторечии «фура». Причинами выбора данной компоновки послужило то, что она исследовалась специалистами NASA, SANDIA, по ней имеются достоверные экспериментальные данные, а также присутствуют сложные физические эффекты с точки зрения механики жидкости и газа. Экспериментальное изучение наземной транспортной системы проведено в Исследовательском центре Эймса (NASA). В упрощенной компоновке автотягача с прицепом не рассматриваются зеркала, колеса, зазор между тягачом и прицепом, мелкие элементы конструкции. Экспериментальные данные включают в себя набор интегральных и распределенных характеристик, основные из которых – коэффициенты давления и трения.

Постановка задачи математического моделирования. В настоящей работе для исследования процессов аэродинамики наземной транспортной системы применяются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса несжимаемой жидкости, замкнутые дифференциальной однопараметрической моделью Spalart-Allmaras (SA). В качестве начальных условий задавались параметры невозмущенного потока во всей расчетной области. На внешней границе применялись неотражающие граничные условия. На поверхности твердого тела ставилось условие прилипания.

В качестве характерного размера выбирается длина GTS модели равная 2.47 м. Высота составляет 0.44 м. Переднее скругление (кабина водителя) представляет собой четверть эллипса, малый радиус которого равен 0.22 м, а большой – 0.38 м. Зазор между экраном и моделью – 0.07 м. Скорость потока воздуха в аэродинамической трубе – 78 м/с (0.22 М). Число Рейнольдса рассчитанное по длине $-1.53 \cdot 10^7$.

Расчетная сетка представляет собой сетку типа Chimera, которая состоит из двух блоков с общим числом узлов 10^5 . Первый блок – это О-сетка, связанная с телом, а второй – прямоугольная сетка, которая прилегает к поверхности (экрану). Первый шаг сетки составлял 10^{-6} м.

Численный метод. Система исходных уравнений, записывалась относительно произвольной криволинейной системы координат. Согласование полей давления и скорости осуществлялось с помощью метода искусственной сжимаемости, модифицированного для расчета нестационарных задач. Для создания дискретного аналога исходных уравнений в качестве базовых использовались регулярные сетки. В неодносвязных областях применялись многоблочные вычислительные технологии, в которых размерность отдельных пересекающихся сеток (блоков) не связана между собой. Такой подход позволил выработать единую методологию расчета течений вязкой жидкости вокруг тел сложной геометрической формы.

Интегрирование системы исходных уравнений осуществлялось численно с использованием метода контрольного объема. Для конвективных потоков использовалась противопоточная аппроксимация Rogers-Kwak, основанная на схеме Рунге третьего порядка точности. В моделях турбулентности для аппроксимации конвективных слагаемых применялась схема TVD с ограничителем потоков ISNALS третьего порядка. Производные в вязких членах аппроксимировались центрально-разностной схемой второго порядка.

Алгоритм решения уравнений базируется на трехслойной неявной схеме с подитерациями по псевдовремени второго порядка точности по физическому времени. Полученная блочно-матричная система линейных алгебраических уравнений решалась методом минимизации обобщенной невязки GMRES с ILU(0) предобуславливанием.

Результаты и обсуждение. В результате проведенных расчетов турбулентного обтекания профиля автомобиля вблизи экрана выделены физические особенности структуры течения и выполнен анализ коэффициентов давления, подъемной силы и силы лобового сопротивления. Получены распределения полей давления, компонент скорости, линий тока во всей области и вблизи автотягача с прицепом, а также значения интегральных и распределенных характеристик.

Полученная картина обтекания модели автотягача с прицепом носит нестационарный характер. Данная модель относится к плохо обтекаемым телам. Размеры отрывной зоны превосходят длину транспортной системы в несколько раз.

При обтекании автотягача с прицепом происходит ускорение потока в районе кабины и в зазоре между экраном. Над кабиной водителя происходит падение давления, обусловленное резким ускорением потока в данной области. В дальнейшем давление восстанавливается и становится почти постоянным до края прицепа. В следе формируется рециркуляционное течение с противоположно направленным основному потоку течением. Вихри в донной части модели попеременно сходят с верхней и нижней поверхности. Наличие массивных вихрей приводит к уменьшению донного давления. Большой перепад давления между лобовой и донной частями тягача приводит к большим значениям лобового сопротивления.

В зазоре реализуется равномерное течение, аналогичное течению в канале, за исключением небольшой области вблизи кабины. В донной части течение по своей структуре близкое к вихревой дорожке Кармана. Отрыв потока возникает в донной части прицепа с острых кромок, а также в нижней части кабины вблизи поверхности. Отрыв потока наглядно иллюстрируют линии тока.

Получено распределение коэффициента давления по поверхности модели. Заметное различие по коэффициенту давления между экспериментальными и расчетными данными на верхней поверхности связано с двумерной постановкой задачи. Направление растекания потока ограничено в отличие от трехмерной постановки.

Это же проявляется и в распределении коэффициента трения в передней части модели. В то же время общее распределение коэффициента трения удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Расчетное значение коэффициента силы лобового сопротивления составляет 0.37, а полученное экспериментальным путем – 0.27. Коэффициент подъемной силы равен 1.19.

Заключение. Показана применимость разработанного специализированного CFD пакета к задачам аэродинамики наземного транспорта. Двумерная постановка задачи позволяет выявлять основные физические эффекты обтекания и получать быстрые оценки влияния формы транспортного средства на его аэродинамические характеристики.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В НАЧАЛЬНОМ УЧАСТКЕ КРУГЛОЙ ТРУБЫ ПРИ ОТРЫВНОМ ТЕЧЕНИИ

В.А. Рогачев, А.В. Баранюк, С.А. Рева

Национальный технический университет Украины "КПИ"

Одним из методов интенсификации теплообмена является применение в теплообменниках коротких каналов [1,2]. Как известно из работ [3,4] в начальном участке при $x/d < 30$ локальные коэффициенты теплоотдачи могут быть в 2 - 2,5 раза больше по сравнению со значениями для полностью развитого турбулентного течения.

В работе представлены результаты исследования закономерностей течения и теплообмена в начальном участке трубы с острой входной кромкой (рис. 1) с помощью CFD - моделирования в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_d = (28-110) \cdot 10^3$. Для верификации и идентификации параметров числовой модели использовались экспериментальные данные с теплообмена и гидродинамики во входном участке круглой трубы [2-3].

Решение поставленной задачи выполнялось в двумерной осесимметрической постановке. Рассматривалось изотермическое течение сухого воздуха, теплофизические свойства которого задавались в виде полиномиальных функций.

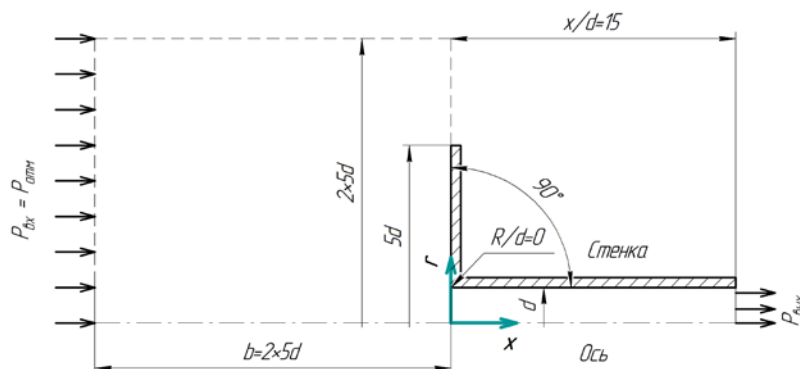


Рис. 1. Расчетная схема входного участка с острой кромкой

Для решения поставленной задачи выбрано четыре модели, широко используемые для прогнозирования характеристик отрывных течений и теплообмена в инженерных и научных расчетах: модель вихревой вязкости Спаларта-Алламареса (SA); стандартная высокорейнольдсовая модель (k - ϵ Standard); модель k - ϵ Realizable; модель переноса сдвиговых напряжений Ментера (k - ω SST). Идентификация моделей турбулентности проводилась при одинаковых геометрических характеристиках и плотности расчетной сетки при $Re_d = 110 \cdot 10^3$. Адекватность выбора модели турбулентности проверялась по экспериментальному распределению статического давления на оси начального участка (рис. 2).

Анализ рис. 2 показал, что данные, рассчитанные с помощью модели k - ω SST лучше всего коррелируются с результатами экспериментальных исследований [2], а максимальное расхождение между результатами не превышает 5%. Поэтому, для исследования отрывных течений на начальном участке трубы принята модель k - ω SST турбулентности Ментера.

На рис.3 изображены распределения экспериментальных [3] и расчетных коэффициентов теплоотдачи в интервале $x/d = 0 - 8$. Необходимо отметить, что зависимости коэффициента теплоотдачи от длины начального участка при переменных числах Рейнольдса имеют минимум возле входной кромки и два максимума с минимумом ниже по потоку.

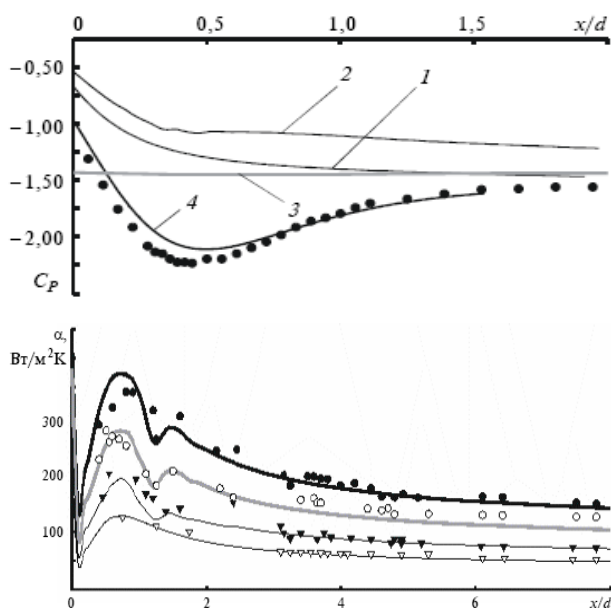


Рис.2. Результаты сравнения полей статических давлений на оси начального участка трубы для $Re_d=110 \cdot 10^3$ [3] при изменении моделей турбулентности: 1 - модель Спаларта - Аллмареса; 2 - модель $k-\epsilon$ Standard; 3 - модель $k-\epsilon$ Realizable; 4 - $k-\omega$ SST Ментера.

Рис.3. Распределение локальных коэффициентов теплоотдачи по длине начального участка [4]: $\bullet$ - $Re_d=110 \cdot 10^3$; $\circ$ - $Re_d=77 \cdot 10^3$; $\blacktriangledown$ - $Re_d=42 \cdot 10^3$; ∇ - $Re_d=28 \cdot 10^3$; сплошные линии - данные численного моделирования.

В результате проведенного анализа установлено, что численные данные не превышают экспериментальные для коэффициентов теплоотдачи на 8,4% и для коэффициентов давления на 18,3%.

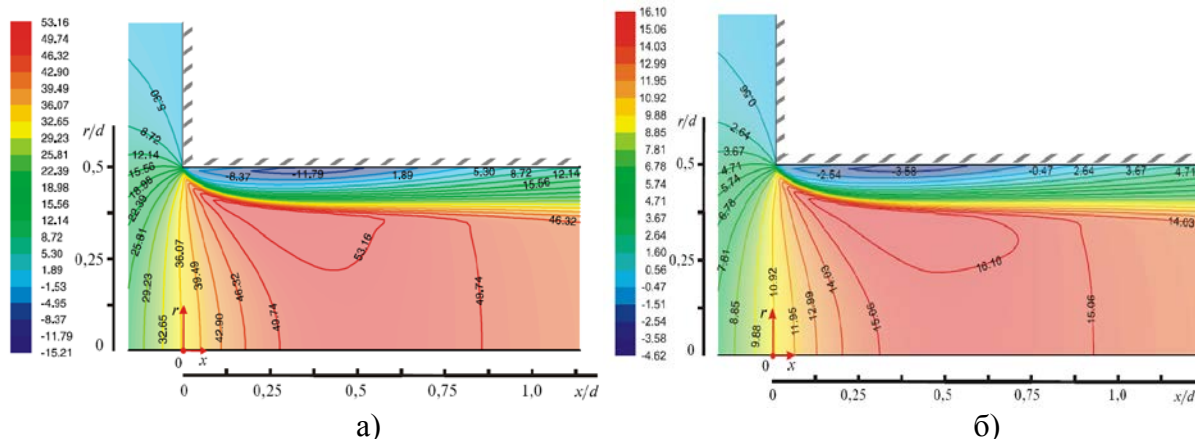


Рис. 4 Поля скоростей в начальном участке: а) - $Re_d=110 \cdot 10^3$; б) - $Re_d=28 \cdot 10^3$.

Разработанная числовая CFD - модель процессов, происходящих в начальном участке круглой гладкой трубы с острой кромкой дает возможность рассчитывать и анализировать параметры в области отрывного течения (рис 4.). Кроме того модель является основной для изучения процессов в начальных участках труб более сложного профиля.

Литература

1. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках.—М.: Наука, 1982.— 472с.
2. Сукомел А.С., Величко В.И, Абросимов Ю.Г. Теплообмен и трение при турбулентном течении газа в коротких каналах. —М.: Энергия, 1979. - 216с.
3. Легкий В.М., Рогачев В.А. Структура поля статических давлений в начальном участке трубы с острой входной кромкой // Инж.-физ. журн. — 1991. — 61, № 5. — С. 709—714.
4. Легкий В.М., Рогачев В.А. Локальный теплообмен в начальном участке трубы с острой входной кромкой. Природа и поведение экстремумов интенсивности теплообмена // Инж.-физ. журн. — 1993. — 65, № 2. — С. 131—137

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИНФЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДУШКИ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

Розумнюк Н.В.
Институт гидромеханики НАН Украины

В рамках проекта по разработке инфлятора для системы подушки безопасности автомобиля исследовались параметры течения, возникающего внутри осесимметричной области (инфлятора) при ежекции газа высокого давления через тонкое кольцевое сопло во внешней стенке. При этом используется принцип аспирации, т.е. нагнетаемый в инфлятор газ под высоким давлением порождает высокоскоростную струю, за счет которой происходит вовлечение воздуха из окружающей среды (кабины автомобиля) через входное отверстие (вход низкого давления). Суммарный поток надувает подушку безопасности автомобиля.

Эффективность работы такого инфлятора оценивается по соотношению количества нагнетаемого и суммарного потока (коэффициент аспирации). В данном случае инфлятор используется в импульсном режиме, т.е. необходимо накачать определенный объем подушки безопасности за определенный временной интервал. Поэтому суммарный поток в подушку является не менее важным параметром для оценки работы инфлятора. Кроме того, существенным требованием было вместиť инфлятор в определенные размеры, ограниченные дизайном автомобиля (рулевой колонки).

Исследование выполнено при помощи численного моделирования течения с применением пакета FLUENT.

Задача имеет большое количество параметров, влияющих на структуру течения и его количественные характеристики. Малые изменения геометрии, приложенного давления могут приводить к качественному изменению вида течения, например, отрыву сверхзвуковой струи от стенки, образованию скачков уплотнения внутри области. В то же время, вследствие сложной геометрии и необходимости малого шага по времени, расчеты нестационарного режима при имеющихся компьютерных ресурсах занимают довольно долгое компьютерное время, порядка нескольких суток. Поэтому общий подход состоял в том, что сначала моделировалось стационарное течение в инфляторе со свободным выходом, т.е. без присоединенной подушки безопасности. После достижения нужных параметров (стационарных расходов и коэффициента аспирации), моделировалось нестационарное течение в инфляторе от момента открытия клапана высокого давления до установления стационарного течения внутри инфлятора. Далее к выходу из инфлятора подсоединялась закрытая область нужного объема, моделирующая подушку безопасности, с определенными начальными условиями. Таким образом, можно было проследить процесс наполнения подушки и определить время, за которое в ней достигалось нужное значение избыточного давления.

В качестве газа высокого давления в основном использовался воздух при комнатной температуре, что моделировало наполнение из баллона со сжатым воздухом. Для полученных удачных вариантов дизайна выполнялись также расчеты с горячим воздухом (до 1200 °K), моделирующим наполнение подушки безопасности с помощью газогенератора.

Оптимальные сочетания суммарного расхода и коэффициента аспирации получались при такой структуре потока внутри инфлятора, когда сверхзвуковая струя после установления потока не отрывалась от внешней стенки; в то же время под ней образовывалась достаточно большая область разрежения, которая и обеспечивала вовлечение воздуха извне.

В результате исследования были определены такие геометрические параметры, которые при заданных общих размерах и заданных диапазонах высокого давления (до 50

Бар) обеспечивают наполнение 40-литровой подушки безопасности за 30 миллисекунд при коэффициенте аспирации ~ 3 .

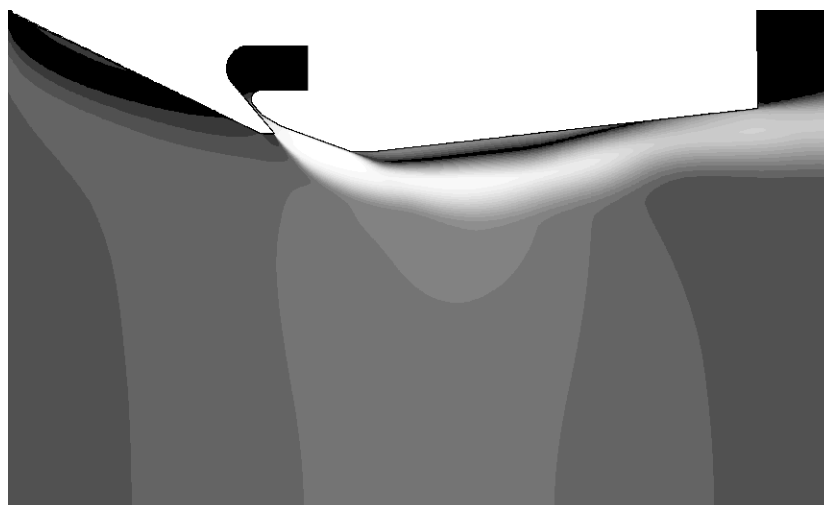


Рис.1. Поле скорости внутри инфлятора (показана верхняя половина области)

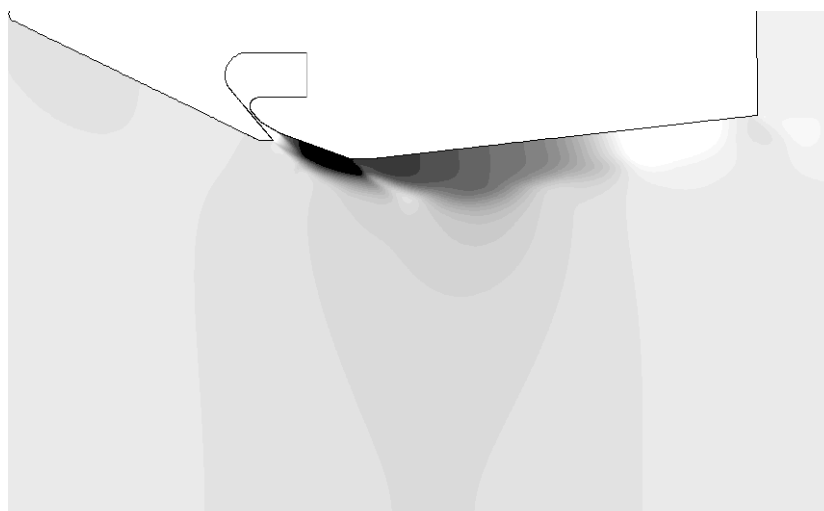


Рис.2. Распределение давления внутри инфлятора

КЛАСИФІКАЦІЯ ТИПІВ ВЗАЄМОДІЇ ВНУТРІШНІХ ПООДИНОКИХ ХВИЛЬ ІЗ ТРАПЕЦІЇДАЛЬНИМ ШЕЛЬФОМ

К. Терлецька, В. Мадерич, І. Бровченко

Інститут проблем математичних машин і систем НАНУ

Внутрішні хвилі є важливим фізичним явищем на континентальному шельфі. Вони істотно впливають на процеси вертикального і горизонтального обміну температури і солоності, а їх руйнування на схилах призводить до дисипації енергії і перемішування. В роботі запропоновано нову класифікацію режимів взаємодії внутрішніх поодиноких хвиль з трапецеїдальною топографією для двошарової стратифікованої рідини (верхній шар має глибину h_1 , нижній шар h_2). Дана класифікація може бути корисною для визначення "hot spot" - областей на континентальному шельфі, де дисипація енергії істотна. Ідея, покладена в основу класифікації полягає в тому, що при накаті хвиль на континентальний шельф два механізми є суттєвими: перший - руйнування хвиль, а другий, зміна полярності хвилі-пониження що набігає на схил (від'ємна), у хвилю-підвищення (полярність додатна) на шельфі. Розглядається тривимірний простір зі значеннями параметрів α , β , γ . Де α - амплітуда хвилі a , нормована на глибину верхнього шару h_1 $\alpha = a/h_1$. β - параметр блокування, введений раніше в роботі [1]. γ - кут нахилу схилу. Діапазон параметрів, при яких хвиля руйнується, визначений на основі критерію

$$\beta_{br} = (0.8^\circ/\gamma + 0.4)^{-1}, \quad (1)$$

що був отриманий експериментальним шляхом [2].

Зміна полярності для двошарової стратифікації визначається з умови рівності глибин верхнього та нижнього шарів $h_1=h_2$, в якій відбувається "переворот" з хвилі-пониження до хвилі-підвищення. В вищезазначених змінних дана умова має вигляд

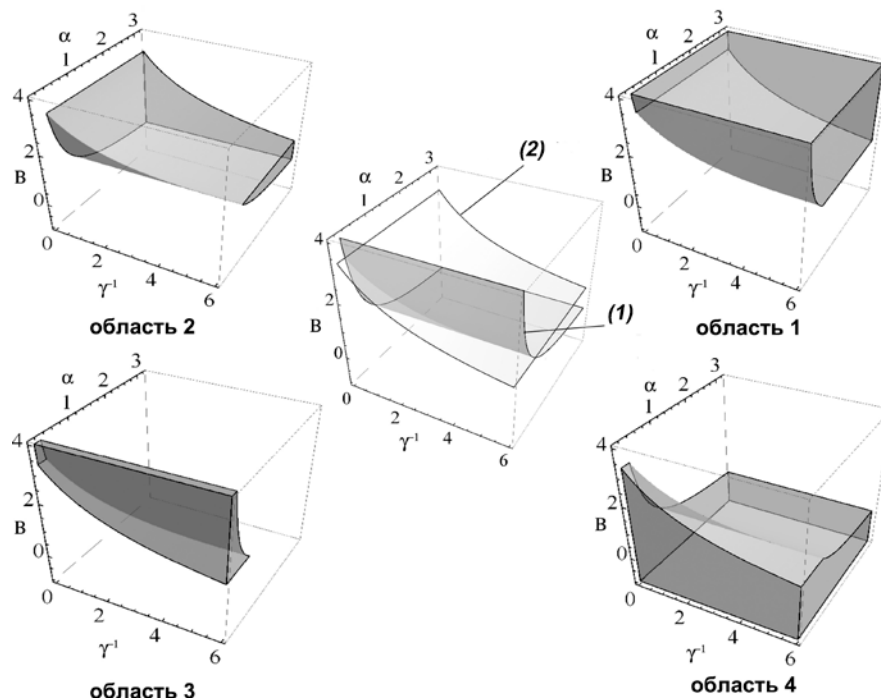


Рис. 1. Схема режимів взаємодії внутрішніх хвиль з трапецеїдальним шельфом

$$\beta = \frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

Поверхні (1) і (2) що перетинаються поділяють простір значень параметрів α , β , γ . на чотири зони.

Область 1. розташована вище двох поверхонь і відповідає режиму, коли хвилі не руйнуються і не змінюють полярність на шельфі. Трансформація хвилі для такого типу взаємодії показана на рис.2 (а), де зображена трансформація поля густини у часі. **Область 2.** лежить вище поверхні руйнування (1), але нижче поверхні зміни полярності (2). В даному випадку відбувається обвалення, але без зміни полярності хвилі. Приклад взаємодії показано на рис. 2 (б).

Область 3. розташовується вище поверхні зміни полярності (2), але нижче поверхні руйнування (1). У а цьому випадку відбувається зміна полярності хвилі, і внутрішня усамітнена хвиля-пониження трансформується в хвилю підвищення на шельфі, чи не зруйнує. Така взаємодія показана на рис. 2 (в).

Область 4. лежить нижче обох поверхонь, і відповідає режиму руйнування зі зміною полярності рис. 2 (г).

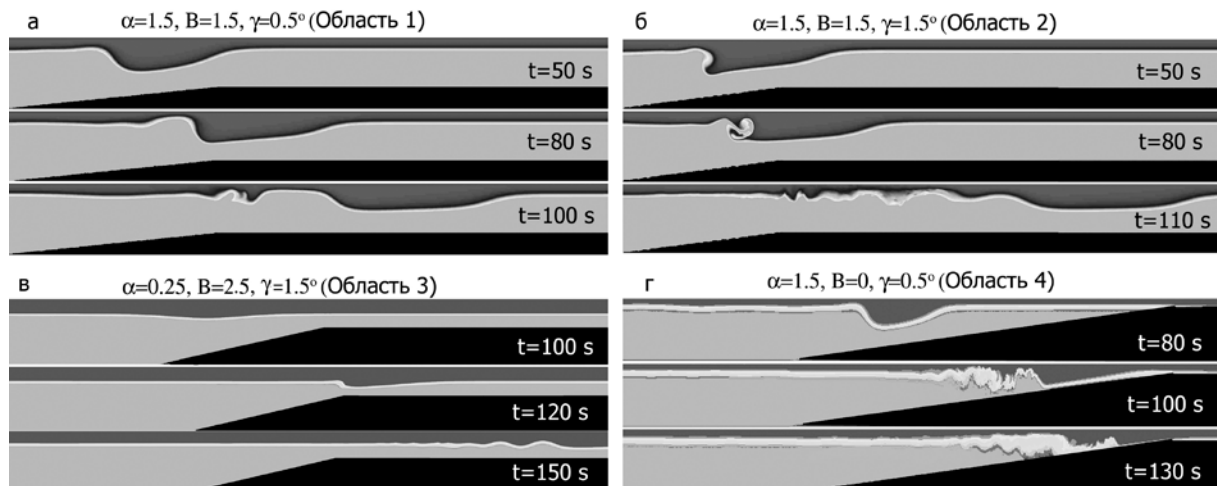


Рис. 2. Еволюція поля густини для чотирьох різних типів взаємодії

Запропонована схема порівнена з результатами відомих лабораторних та натурних спостережень і проведених чисельних експериментів за допомогою тривимірної негідростатичної чисельної моделі [1]. Режим, передбачені схемою, узгоджуються з результатами чисельного моделювання і даних спостережень. На підставі виділених на діаграмі зон на карті світу були визначені області з високою дисипацією енергії.

ЛІТЕРАТУРА.

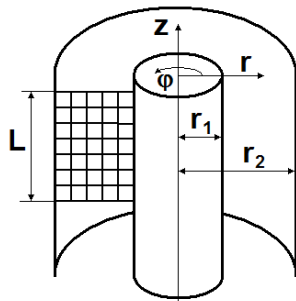
1. Talipova T., Terletska K., Maderich V., Brovchenko I., Pelinovsky E., Jung K.T., Grimshaw R. Solitary wave transformation on the underwater step: Asymptotic theory and numerical experiments // Physics of Fluids. - 2013. - **25**. - doi: 10.1063/1.4797455
2. Vlasenko V. and Hutter K. Numerical experiments on the breaking of solitary internal waves over a slope-shelf topography // J. Phys. Oceanogr. - 2002. - **32**. - P. 1779-1793

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕНОСУ ДОМІШОК У ПРИМЕЖОВОМУ ШАРІ У КРУГОВІЙ ТЕЧІЇ КУЕТТА

Л.В. Ткаченко, В.І. Нікішов

ІГМ НАН України

Розглядається осесиметрична течія Куетта в'язкої нестисливої рідини між коаксіальними циліндрами, що обертаються в одну сторону. Куткові швидкості внутрішнього і зовнішнього циліндрів рівні $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$. Радіус внутрішнього циліндра рівний r_1 , а зовнішнього - r_2 . Розташування осей координат показано на рис. 1. Вертикальна вісь z спрямована вгору, радіальна вісь r спрямована уздовж радіуса з початком відліку на осі, вісь φ спрямована уздовж кола. Циліндри мають необмежену довжину.



Після зупинки зовнішнього циліндра на його внутрішній поверхні формується примежовий шар, у якому внаслідок дисбалансу відцентрових сил і сил тиску виникають тривимірні поздовжні вихорі – вихорі Тейлора-Гертлера. Система рівнянь Нав'є-Стокса, що описує розвиток осесиметричної течії в зазорі між циліндрами, розглядається в змінних функції струму ψ й завихреності ζ (φ - тая компонента вектора завихреності).

Рис. 1

Ініціалізація вихорів відбувалась шляхом штучного внесення вісесиметричних збурень завихреності, які розташовуються вздовж циліндричної поверхні, що відстоїть від поверхні циліндра на заданій відстані. Інтенсивність цих збурень змінюється періодично вздовж вертикальної координати із заданим періодом і описується виразом $\zeta(T_m, r_d, z) = \sin(2\pi z/\lambda) \cdot 10^{-k}$, де r_d - радіус циліндричної поверхні, на якій розташовуються збурення, λ - довжина хвилі збурень, k - параметр, що характеризує інтенсивність збурень.

Наведено результати розрахунків розподілів функції струму й завихреності. Показано, що з часом виникають відхилення росту енергії вихорів від експоненціального закону внаслідок нелінійних ефектів. Виявлено, що нелінійна взаємодія вихорів приводить до їх нерівномірного розвитку в трансверсальному напрямку й формуванню “грибоподібних структур”. Продемонстровано, що між вихорями виникає течія, що спрямована до стінки, а з іншого боку цих вихорів течія спрямована від стінки. Це приводить до того, що під дією течії, спрямованої від стінки, рідкі частки (з низькою швидкістю) із пристінної області переносяться в товщу потоку й у цьому перетині виникає S-подібний профіль поздовжньої швидкості із точкою перегину. В області течії в площині r, z , де нормальна до поверхні швидкість спрямована до стінки, рідкі частки (з високою швидкістю) переносяться до стінки й тут профіль швидкості стає більш наповненим. Зростання впливу нелінійних ефектів приводить до нерівномірного уздовж координати z розвитку вихорів і формуванню грибоподібних структур, які характеризуються сильними зсувами швидкості поблизу вершини та бокових меж. Це приводить до виникнення вторинної нестійкості вихрової системи й турбулізації потоку.

При великих швидкостях потоку рідини конвективний перенос є процесом, який визначає (особливо при малих значеннях молекулярного коефіцієнта переносу) поведінку скалярних домішок. Розглянута вище структура течії в примежовому шарі обумовлює

складний тривимірний характер переміщень скалярних домішок, у даному випадку маркерів. Маркери вводилися практично відразу після введення вихрових збурень. Представлено розраховані траєкторії переміщення маркерів у площині z, r_ϕ , де r_ϕ - тангенціальна координата. Показано, що спочатку (на лінійній стадії) переміщення маркерів визначаються основною течією і вплив вихорів є малим, траєкторії мають вигляд прямих ліній. У міру розвитку вихрових структур під впливом системи течій, що перемежовується у площині перпендикулярній основному потоку, частина маркерів переміщаються до стінки, де швидкість поздовжньої течії зменшується, у результаті ці маркери відстають від інших. Інша частина маркерів попадає в область течії, спрямованій від стінки, у результаті вони попадають в область із підвищеною поздовжньою швидкістю й вони випереджають основну частину маркерів. Це проявляється у вигляді своєрідної “модуляції” переднього фронту області маркерів, що рухаються. Із часом вплив вихорів підсилюється, і маркери починають концентруватися в областях, де течія спрямована від стінки.

Аналіз траєкторій переміщень маркерів у площині r, z показав, що спочатку, коли інтенсивність вихорів мала, переміщення маркерів невеликі й близькі до лінійних. Із часом вони втягуються в кругову течію і їх траєкторії стають викривленими. Частина маркерів попадає в область течії, спрямованої до стінки, де швидкість основної течії зменшується, інша частина – в область, де течія спрямована від стінки й поздовжня швидкість вище. У результаті перша частина маркерів відстає від другий, якщо спостерігати за ними у площині z, r_ϕ , що відзначено раніше. Згодом, маркери, які переміщаються від стінки, переносяться на помітно більшу відстань, чим маркери, що рухаються до стінки. Вплив “грибоподібних” структур проявляється в тому, що маркери, потрапляючи в них, починають рухатися у зворотному напрямку, але вже по периферії цих структур, де виникають сильні зсуви швидкості. У це ж час маркери, що раніше рухалися в напрямку до стінки, під впливом вихрів починають переміщатися від стінки.

Розглянуто також особливості формування поля домішок у вихрових течіях, що ініційовані ланцюжком різноспрямованих вихорів у випадках нерухомої й стійко-обертаючої рідин. Проведено порівняння результатів з випадком розвитку конвективної нестійкості.

Зроблено висновок про те, що під впливом поздовжніх вихорів маркери швидко досягають верхньої області примежового шару, причому це відбувається над вершинами “грибоподібних” структур. Це свідчить про істотну інтенсифікацію процесів тепломасопереносу при наявності системи поздовжніх вихорів. Відзначимо, що конвективний перенос домішок значно перевищує їх поширення під впливом молекулярних ефектів. Важливо відзначити, що ніжки “грибоподібних” структур, уздовж яких відбувається переміщення маркерів від стінки, помітно тонше за область течії, спрямованої до стінки, що пояснює ефект збільшення тепло- і масопередачі при наявності вихорів Гертлера.

ОДНОРОДНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИСТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ЗАТОПЛЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО ПРИ ПОДАЧЕ ВОДЫ В ТЕЛО СТРУИ

В.И. Тимошенко,
ИТМ НАНУ и ГКАУ, г. Днепр

Для моделирования сверхзвукового истечения продуктов сгорания реактивного двигателя в затопленное пространство используется упрощенная система уравнений Навье-Стокса – система уравнений вязкого слоя,

Система уравнений разбивается на две группы. Уравнения первой группы включают уравнения для определения продольной компоненты скорости u , полной энтальпии H , концентраций компонент продуктов сгорания X_k

Уравнения второй группы используются для определения поперечной компоненты скорости и давления и включают уравнение неразрывности и уравнение количества движения в проекции на ось r , из которого исключены диссипативные слагаемые

На основе разбиения уравнений на две группы строится однородный алгоритм совместного решения этих уравнений, не требующий дополнительных вычислений при переходе от сверхзвукового течения в центральной части струи к дозвуковому течению в слое смешения на границе струи. Используя этот алгоритм можно единообразным способом провести расчет истечения сверхзвуковой струи в затопленное пространство или в спутный дозвуковой поток, начиная от полностью сверхзвукового течения на срезе сопла до сечений, в которых течение становится полностью дозвуковым.

Моделирование газодинамических процессов в струе продуктов сгорания с каплями воды осуществляется на основе двухскоростной и двухтемпературной модели сплошной среды. Пары воды добавляются к газовой фазе в процессе испарения капель воды в струе горячих продуктов сгорания. Двухфазный поток описывается уравнениями, в которых учтено скоростное и тепловое взаимодействие между газовой и дисперсной фазами.

Принимается простейшая модель испарения капли. Испарение начинается при нагреве капли до температуры кипения T_f . После этого температура частиц дисперсной фазы остается неизменной $T_s = T_f$, и все подводимое тепло расходуется на испарение. Это основано на том, что до достижения капель температуры кипения ее испарение происходит достаточно медленно, а при достижении температуры кипения испарение происходит значительно интенсивнее

Подача воды приводит в начале к резкому, а затем более плавному уменьшению скорости продуктов сгорания. Температура струи вначале на участке прогрева капель меняется более медленно, чем после начала испарения воды. Положение сечения начала испарения характеризуется резким изменением массовой концентрации паров воды на оси струи.

Уменьшение температуры продуктов сгорания приводит к уменьшению местной скорости звука в струе. Вследствие этого изменение числа Маха в струе носит немонотонный характер. На начальном участке после сечения подачи воды число Маха уменьшается и становится существенно меньше, чем в струе без воды. Здесь уменьшение скорости происходит более быстро, чем уменьшение скорости звука. Затем число Маха в струе с каплями становится больше, чем струе без воды, что определяется более интенсивным уменьшением скорости звука по сравнению с уменьшением скорости струи.

Обсуждаются основные аспекты моделирования влияния химических превращений на параметры сверхзвуковых струй продуктов сгорания и основные особенности влияния догорания продуктов сгорания на параметры сверхзвуковой струи.

В состав продуктов сгорания ракетного двигателя на срезе сопла наряду с продуктами полного сгорания H_2O и CO_2 , входят продукты неполного сгорания CO и H_2 , которые при смешении с кислородом воздуха могут вступать с ним в химическое взаимодействие – догорать.

При догорании струи без капель воды имеет место существенное уменьшение концентрации водорода в струе: на оси струи концентрация водорода уменьшается более чем в четыре раза, вследствие чего температура повышается почти на 300 оС. Подача воды приводит к существенному уменьшению температуры вдоль струи в ее конечном сечении. Снижение температуры влечет за собой резкое уменьшение скорости горения, вследствие чего, горение практически не влияет на изменение концентрации водорода и на температуру струи в ее конечном сечении (линии 2а и 2б).

Выявлены основные закономерности влияния подачи воды, смешения струи с воздухом и догорания продуктов сгорания в кислороде воздуха на структуру течения, термогазодинамические и теплофизические параметры струи. Показано, что догорание в струе приводит к увеличению температуры на ее оси на 200-300 С. и уменьшению числа Маха в струе. Подвод воды может приводить к снижению в 1,5-2 раза температуры и скорости в конечном сечении струи; При этом резкое падение температуры приводит к увеличению числа Маха. Наличие паров воды в струе приводит к снижению скорости горения водорода в продуктах сгорания, в результате, обусловленное догорание водорода практически не приводит к повышению температуры струи.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВОГО ХВИЛЮВАННЯ В РАЙОНІ ДАМБИ ГИРЛА БИСТРЕ РІЧКИ ДУНАЙ

Фомін В.В.¹, Хомицький В.В.², Терещенко Л.М.², Абрамова Л.П.²,
Харченко А.Г.², Нікінін І.А.², Кудибин І.Б.²

¹Морський гідрофізичний інститут, м. Севастополь

²Інститут Гідромеханіки Національної Академії Наук України, м.Київ

Ділянки гирл річок, які впадають в моря або крупні озера, лимани та водосховища, являють собою складні гідродинамічні структури, що знаходяться під дією морських та річкових факторів. Тому дослідження ставить багато складних проблем щодо оцінки штормових нагонів, вітрового хвилювання та аналізу натурних спостережень, а як результат розв'язок теоретичних задач із застосуванням фізичного та математичного моделювання.

Басейн Дунаю тягнеться в широтному напрямку на 1850 км, розташовуючись на території восьми європейських держав в різних кліматичних і ґрунтово-рослинних зонах. Довжина річки – 2860 км, площа басейну – 817 тис. км² і середньорічний стік – 204 км³/рік.

Гирлова область Дунаю розташована в південно-західній частині України і в східній частині Румунії і складається з дельти і узмор'я. Загальна площа гирлової області складає близько 7000 км², у тому числі площа дельти 5640 км², з яких 1240 км² доводиться на територію України. Від вершини дельти (Ізмайльського Чаталу), де Дунай розділяється на два головні рукави (Килійський і Тульчинський), відстань по прямій до будь-якого пункту її морського краю не перевищує 70–80 км. Узмор'я є прибережною смугою шириною 8...10 км і протяжністю близько 180 км. В цій смузі річкові та морські води змішуються. Вершина дельти виділяється по граничній відстані поширення приливів в межінь. Верхньою (річковою) межею гирлової області Дунаю вважається гідроствор Орлівка (19 км вище за вершину дельти і 135 км від гирла Килійського рукава). Морська межа гирлової області Дунаю проходить на узмор'ї приблизно по ізобаті 22 м [1].

Річковий потік, який виходить з гирла рук. Бистрий, зазнає великих змін на баровій частині, де розташоване МПК і струєнапрямна захисна дамба. Потік спочатку розтікається над річковим схилом бару, який має проріз у вигляді МПК. Після цього потік знову звужується, обтікає оголовок Пташиної коси і розтікається на правому забровочному просторі каналу. Внаслідок цього структура потоку набуває великої складності, яка збільшується при проведенні робіт по поглибленню дна МПК.

Морський підхідний канал запроектований довжиною 3,3/3,432 км, проектною шириною 85/100 м, глибиною 7,65/9,52–8,72 м на барі гирла Бистре. Огороджуюча дамба морського підхідного каналу (2,73 км) призначена для захисту каналу від занесення вздовж береговим потоком наносів під час штормів північного та північно-східного напрямку, захисту від опливання укосів каналу під дією хвиль та для забезпечення безпечного входу в канал суден з моря при сильних північних та північно-східних вітрах, які є домінуючими, особливо в осінньо-зимовий період. Дамба виконана з кам'яного накиду з несортованої гірської маси [2].

Для оцінки характеристик штормових нагонів і вітрового хвилювання в районі задавався «гіпотетичний» шторм, коли над всім Чорним морем діє однорідний по простору і постійний за часом вітер, взятий за дослідний період. Розглядалось 12 варіантів напрямку і швидкості приводного вітру: південь – 8, 13 та 26 м/с; південний схід – 8, 13 та 26 м/с; схід – 8, 13 та 26 м/с; північний схід – 8, 13 та 26 м/с.

Розрахунки вітрового хвилювання виконувались за допомогою спектральної моделі SWAN [3,4] версії 41.01AB. Для розрахунку штормових нагонів в Чорному морі використовувався баротропний варіант моделі циркуляції вод POM [5] на сітці 5х5км.

При цьому модельний час інтегрування складав 5 діб, що виявилось достатнім для отримання стаціонарних полів рівня моря.

Моделювання вітрового хвилювання проводилися 3-х кроковим методом вкладених сіток. Роздільна здатність хвильової моделі по кутовій координаті складала 5°, частотний інтервал дорівнював 0,04–2 Гц. Донне тертя визначалися методом Гранта-Мадсена [6] з постійним параметром еквівалентної шорсткості, рівним 0,01м. На першому кроці розраховувалося хвилювання для всього Азово-Чорноморського басейну на сітці 5х5 км. Далі проводився розрахунок хвилювання в пригирловому районі Дунаю на сітці 1х1 км. На завершальному кроці розраховувалося хвилювання в області, що мала розміри 6,87 х 6,17км (кількість вузлів – 500 х 320). Кроки сітки по зональній і меридіональній координаті становили 13,7м і 19,3м відповідно.

При моделюванні полів вітрових хвиль в третій області проводився параметричний розрахунок дифракції хвиль на захисній дамбі [4], а для розрахунку штормового нагону глибина моря в SWAN задавалася у вигляді: $H = h + \eta$, де h – рельєф дна; η – рівень моря з моделі циркуляції POM.

Як показали розрахунки, біля кінцевої частини дамби висота вітрових хвиль при швидкості вітру 26 м/с може досягати 4–5 м, при швидкості вітру 13 м/с висоти хвиль досягають 2–3 м, а при швидкості вітру 8 м/с висоти хвиль не перевищують 1,25 м. Виявлено, що в цілому дія вітру не призводить суттєвих деформації дамби та наскрізних руйнувань і вона продовжує виконувати свої захисні та струмененапрямні функції.

- [1] Создание глубоководного хода Дунай-Черное море на украинском участке дельты р. Дунай: «Физическое и математическое моделирование заносимости прорези через баровую часть Новостамбульского гирла р. Дунай и вариантов компоновки оградительных сооружений прорези и порта». Отчет НИР ИГМ НАНУ, Киев, 2001.-219 с.
- [2] Аналіз морфодинаміки прибережної зони району ГСХ Дунай –Чорне море за наявними даними космічної зйомки у 2010...2011pp та результати промірів глибин в 2011р. – Звіт УЦМЗР, етап 1, Київ, 2011.- 25 с.
- [3] Booij. N., Ris. R.C., Holthuijsen L.H., A third-generation wave model for coastal regions. Model description and validation. // J. Geophys. Res., 1999, 104(C4), p. 7649-7666.
- [4] SWAN Cycle III version 41.01AB, User Manual, Delft University of Technology, Netherlands. – 2016.–127p.
- [5] Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of three dimensional coastal ocean circulation model, in Three-Dimensional Coast Ocean Models. – 1987.–Vol. 4.–P. 1
- [6] Крылов Ю.М. Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн.- Л.: Гидрометеиздат, 1966, 225 с.

СУЧАСНІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ

Хотенко О.О., Хотенко І.М.

Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко НАН України, Київ

Пристрої, що використовують в принципі своєї роботи властивості поверхневих хвиль мають загальну назву пристрої на поверхневих хвилях. Вони проводять обробку електричних сигналів, перетворюючи електричний вхідний сигнал на електричний вихідний сигнал через лінію передачі поверхневих хвиль вздовж поверхні п'єзоелектричного кристалу. Електро механічне перетворення як на вході так і на виході звичайно здійснюється за допомогою зустрічно-штирового перетворювача.

Основними перевагами пристроїв на поверхневих хвилях є: 1) можливість їх використання в широкому діапазоні частот, аж до декількох десятків ГГц; 2) надзвичайно малі розміри та маса при високій механічній міцності, надійності а температурній стабільності; 3) висока повторюваність та простота регулювання, або ж взагалі відсутність її необхідності; 4) добра спряжність з блоками мікроелектронної техніки; 5) технологічність виробництва, оскільки застосовуються стандартні технологічні процеси, що використовуються при виробництві інтегральних мікросхем (виробництво п'єзокераміки, фотолітографія і т.д.)

Фізика поверхневих хвиль охоплює ряд різноманітних застосувань. Серед них: сейсмологія, геофізика та інженерна геологія (прогнозування сейсμοактивності, розвідка запасів нафти та газу, профілювання поверхні землі); обробка електричних сигналів (електричні лінії затримки, електричні фільтри, електричні кодери, електричні декодери, електричні конвольвери, електричні осцилятори, електричні частотні модулятори, електричні фазові модулятори); ехолокація; дефектоскопія та неруйнівний контроль (контроль дефектів, властивості пластин та шарів, визначення зовнішніх та залишкових напружень, перевірка якості адгезивного склеювання, визначення інших властивостей матеріалів, нелінійний ультразвуковий неруйнівний контроль); хімічне зондування; акустична мікроскопія; пристрої на об'ємних приповерхневих хвилях; акустоелектричні застосування (підсилювачі, корелятори, оптичні фотоприймачі); акустооптичні застосування (оптичні дифракційні решітки, оптичні дефлектори, оптичні модулятори, оптичні фільтри); ультразвукові двигуни; очистка поверхні (очистка від мікрочастинок, очистка від радіоактивного забруднення (дезактивація)); тач-скрін технологія; мікрофлюїда (мікрогідродинаміка) (струменевий друк, молекулярна біологія, діагностика *in vitro*, лабораторії на чипі); біоакустика тварин.

Впродовж довгого часу після відкриття хвиль Релея, їх застосування було пов'язано майже виключно з сейсмологією. Цей тип сейсмічних хвиль має найнижчу швидкість, низьку частоту, малий коефіцієнт згасання, довгу тривалість існування та високу амплітуду. Таким чином, вони можуть реєструватися на великих відстанях, на відміну від об'ємних хвиль, що мають вищу частоту, а отже, згасають швидше.

Серед усіх застосувань, найширшим є обробка електричних сигналів. Пристрої на поверхневих хвилях є найбільш затребуваними в різноманітних системах зв'язку, наприклад, це теле- та радіомовлення (кабельне, супутникове), пакетування каналів, мобільне телебачення; комунікаційні системи (GSM, CDMA, W-CDMA UMTS, WiMAX, WiFi, Ethernet, базові станції, пейджери, бортова та наземна апаратура супутникових систем, радіорелейні системи і т.д.); навігаційні та вбудовані інформаційні системи GPS; системи військового, авіаційного та космічного призначення.

Останнім часом, швидких темпів набирають розробки в сфері інтелектуальних транспортних системи (ITS: безключовий доступ та запалювання, контроль тиску в колесах, слідування за дорогою і т.д.); вдосконалених охоронних систем; різноманітних датчиків та сенсорів; медичного устаткування (у тому числі, бездротові системи

зчитування життєвих показників: тиску, серцебиття, рівня цукру в крові, рівня ліків в організмі і т.д.).

Поверхневі хвилі широко використовуються в неруйнівному контролі матеріалів та конструкцій. Основне їх застосування пов'язане з можливістю виконувати роль носіїв інформації в пристроях обробки електричних сигналів в сучасних системах зв'язку. Це пристрої фільтрації, частотної та фазової модуляції, кодування, декодування та т.і.

Хімічний сенсор на поверхневих хвилях був розроблений для виявлення та ідентифікації хімічних речовин. Під час його використання відбувається порівняння вихідних параметрів (маси, провідності та в'язкопружності) тонкої плівки, що є конструкційним елементом цього сенсора при потраплянні на неї молекул хімічних елементів середовища.

Фокусування акустичного променя на поверхні може породжувати поверхневі хвилі, які взаємодіють з особливостями поверхні та, на високих частотах, можуть бути використані для отримання детальної акустичної картини – акустична мікроскопія.

Поверхневі хвилі, що поширюється вздовж поверхні п'єзоелектричного кристалу, супроводжується електричним полем, що дає можливість акустичним сигналам взаємодіяти з електронами в напівпровідниках. Ця властивість використовується у підсилювачах, кореляторах та оптичних фотоприймачах.

В акустооптичному діапазоні, поверхнева хвиля, що поширюється вздовж поверхні певних матеріалів, змінює коефіцієнт відбиття матеріалу. Це робить можливою взаємодію акустичного сигналу зі світлом. Застосування включає оптичні дифракційні решітки, дефлектори, модулятори та фільтри.

Ультразвуковий двигун – це тип приводу, що використовує механічні вібрації в ультразвуковому діапазоні як рушійну силу. В результаті, можна створити мікромеханічні двигуни, що можуть швидко виконувати зміни положення об'єкта з точністю до нанометрів. Ще однією перевагою ультразвукових двигунів є те, що вони мають малу швидкість (але великий обертальний момент), малий розмір, працюють тихо, до того ж на них не впливають потужні магнітні поля (на відміну від традиційних електричних двигунів), а отже, вони можуть використовуватись в застосуваннях типу створення та обробки магнітно-резонансного зображення та поїздів на магнітній підвісці.

Нелінійна поверхнева хвиля, що збуджується лазером, використовується для створення локальних прискорень поверхні. Цей принцип застосовується для зняття мікрочастинок з поверхні тонких напівпровідникових пластин у вакуумі, вимірювання сил зчеплення між мікрочастинками та візуалізації розподілу імпульсів поверхневих акустичних хвиль.

Одна з технологій виробництва тач-скрінів теж основана на використанні властивостей поверхневих хвиль. Приймачі фіксують зміну акустичної енергії, а мікроконтролер обчислює положення точки дотику. Такий екран дає можливість відслідкувати не лише координати точки дотику, а і силу натиску, завдяки тому, що ступінь поглинання акустичних хвиль залежить від величини тиску в точці дотику. Головним недоліком таких екранів є збої в роботі в присутності вібрацій чи під час впливу акустичними шумами, а також при забрудненні екрану.

У зв'язку з актуальною безпековою ситуацією в Україні та світі, більшість нових застосувань пов'язані з різноманітними системами моніторингу та контролю пересування об'єктів, охоронними системами з можливістю не лише фіксувати перевищення рівня допустимих вібрацій, а і достатньо точно встановлювати координати порушника (крокуючої людини або транспорту).

Цей список застосувань не є вичерпним, та постійно поповнюється.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОИСТЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

Д.И.Черний*, А.А.Воскобойник**, В.А.Воскобойник**

* Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

*Institute of Telecommunication & Global Information Space, NAS, Kyiv, Ukraine

**Institute of Hydromechanics, NAS, Kyiv, Ukraine

Предположение о том, что в мелких, криволинейных каналах может реализовываться плоскопараллельное слоистое течение, для достаточно широкого спектра чисел Рейнольдса, получило свое теоретическое [2,4-7] и экспериментальное [1] подтверждение. При практическом рассмотрении течений в мелководных акваториях основной интерес представляют поверхностное и осредненное по глубине течение. В результате лабораторных экспериментов пролучена серия возможных вариантов установившихся и переходных режимов струйного течения в криволинейном канале - модельной акватории Керченского пролива. Результаты экспериментальных исследований (Рис.1-Рис.6) согласуются с результатами комп'ютерного моделирования и данными полученными ранее другими авторами [3].

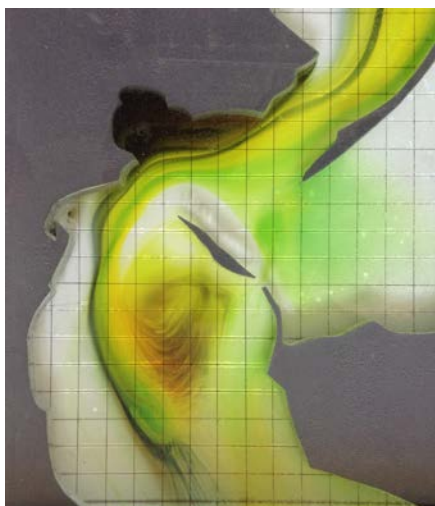


Рис.1

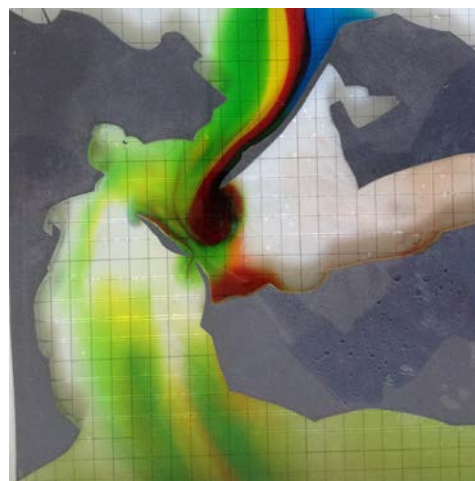


Рис.2

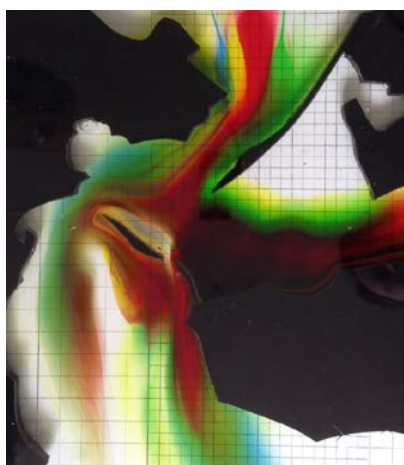


Рис.3

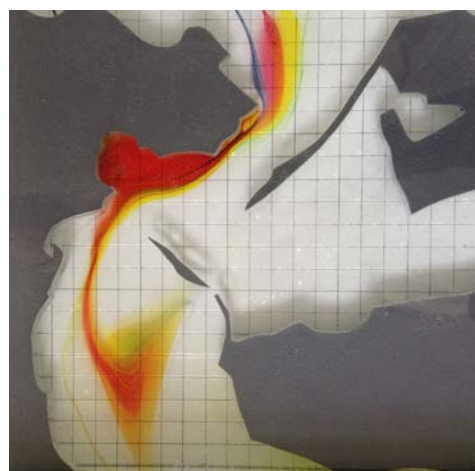


Рис.4



Рис.5

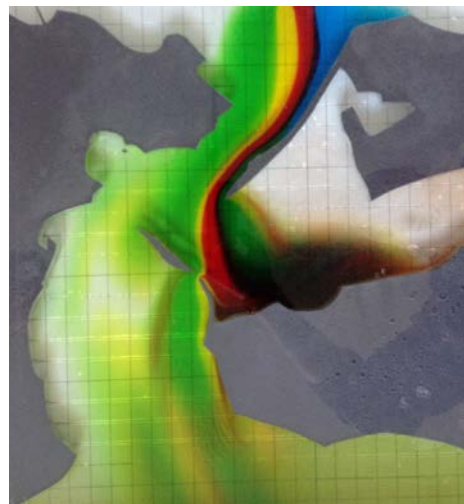


Рис.6

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А.Воскобойник, В.А.Воскобойник, С.А.Довгий, В.Г.Мальцев, В.М.Пархисенко, Д.И.Черний. Моделирование вязких слоистых и почти слоистых течений// VIII Міжнародна конференція імені академіка І.І.Ляшка "Обчислювальна та прикладна математика". - Київ, 8-9 жовтня 2015р., Матеріали конференції, Київ- 2015р., с.34.
2. Довгий С.А., Черний Д.И. Вихревые модели циркуляционных течений в проливах. // VIII Международная школа-семинар “МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АЭРОДИНАМИКИ” посвященная 90-летию Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (Крым-Евпатория, 4-13 июня 2008), Москва «МЦНМО» 2008, с.53-54.
3. Иванов В.А., Фомин В.В. Математическое моделирование динамических процессов в зоне море-суша./ НАН Украины, Морской гидрофизический институт, Севастополь- 2008г. - 363с.
4. Черний Д.И. Интеграл типа Коши-Лагранжа для нестационарных течений типа Hele-Shaw.// Труды XIV Международного симпозиума «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики» (МДОЗМФ-2009).- Часть 1, Харьков-Херсон, 2009, с. 185-187.
5. Stanislav A. Dovgiy, Dmytro I. Cherniy A Circulation Flow in Sea Strait Simulation// Тези науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка», м. Київ, 30 вересня - 01 жовтня 2008р., Інститут гідромеханіки НАН України, с.20-21.
6. Cherniy D.I., Dovgiy S.A. The vortex model of circulation flow in sea channel // “150 Year of Vortex Dynamics”, IUTAM Symposium, Lyngby & Copenhagen, Denmark Technical University, Oktober 12-16, 2008.
7. Cherniy D., Dovgiy S., Meleshko V. The Vortex Model of a Viscid Wall's Layer // IUTAM Symposium on "Vortex Dynamics: Formations, Structure and Function", Abstract Book, March 10(Sun)-14(Thu), 2013, Centennial Hall, Kyushu University School of Medicine, Fukuoka, Japan, p.p. 126-127.

МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ ИНЕРЦИОННОЙ И НЕИНЕРЦИОННОЙ КОМПОНЕНТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ ОРНИТОПТЕРА

А. В. Шеховцов

Институт гидромеханики НАНУ, Киев, Украина

Пусть известно физическое нестационарное поле скорости вблизи тонкого машущего крыла. Покажем, что этого достаточно для нахождения инерционной и неинерционной компонент аэродинамических сил крыла.

Из обобщенной формулы Коши-Лагранжа [1], для перепада коэффициента давления в точке $\vec{r}$ произвольного сечения крыла, следует:

$$\Delta C_p(\vec{r}, t) = 2 \left[\vec{\gamma} \times \vec{n} \cdot \left(\vec{U} - \frac{d\vec{r}}{dt} \right) + \frac{\partial'}{\partial t} \left(\int_{\sigma_1} \vec{\gamma}_0 \times \vec{n} \cdot \delta \vec{r}_0 + \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}} \vec{\gamma} \times \vec{n} \cdot \delta \vec{r}_0 \right) \right], \quad (1)$$

где $\vec{n}$ - вектор нормали к крылу; $\vec{\gamma}$ - вектор плотности суммарного вихревого слоя крыла; $\vec{\gamma}_0$ - вектор плотности свободного вихревого слоя в момент его схода с крыла; $\vec{r}_1$ - радиус-вектор передней кромки крыла; σ_1 - свободный вихревой слой, сошедший с передней кромки крыла.

Учитывая, что вектор абсолютной скорости $\vec{U}$ для точек вихревого слоя – это полусумма его предельных значений:

$$\vec{U}(\vec{r}, t) = (\vec{U}_+ + \vec{U}_-) / 2, \quad (2)$$

а вектор плотности вихревого слоя $\vec{\gamma}$ выражается через разность предельных значений вектора скорости среды:

$$\vec{\gamma}(\vec{r}, t) = \vec{n} \times (\vec{U}_+ - \vec{U}_-), \quad (3)$$

формулу (1) для перепада коэффициента давления можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \Delta C_p(\vec{r}, t) = & (\vec{U}_+ - \vec{U}_-) \cdot \left(\vec{U}_+ + \vec{U}_- - 2 \frac{d\vec{r}}{dt} \right) - \\ & - 2 \frac{\partial'}{\partial t} \int_{\sigma_2} (\vec{U}_{0+} - \vec{U}_{0-}) \cdot \delta \vec{r}_0 - 2 \frac{\partial'}{\partial t} \int_{\vec{r}}^{\vec{r}_2} (\vec{U}_+ - \vec{U}_-) \cdot \delta \vec{r}_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vec{r}_2$ - радиус-вектор задней кромки сечения крыла, σ_2 - свободный вихревой слой, сошедший с задней кромки крыла, а индексы «0+» и «0-» при скоростях означают, что предельные значения нужно брать для участков свободного вихревого слоя в момент его схода с крыла.

Первое слагаемое в уравнении (4) – это неинерционная компонента перепада коэффициента давления (сумма вихревой и циркуляционной):

$$\Delta C_{pV+C}(\vec{r}, t) = (\vec{U}_+ - \vec{U}_-) \cdot \left(\vec{U}_+ + \vec{U}_- - 2 \frac{d\vec{r}}{dt} \right). \quad (5)$$

Для ее нахождения нужно знать мгновенные переносные скорости $d\vec{r}/dt$ всех расчетных точек $\vec{r}$ сечения крыла, а также иметь поле скоростей для определения предельных значений скорости по разные стороны сечения крыла.

Второе слагаемое в (4) – это инерционная компонента перепада коэффициента давления, зависящая от скорости изменения циркуляции свободного вихревого слоя, сошедшего с задней кромки сечения крыла:

$$\Delta C_{pI(V)}(\vec{r}, t) = -2 \frac{\partial'}{\partial t} \int_{\sigma_2} (\vec{U}_{0+} - \vec{U}_{0-}) \cdot \delta \vec{r}_0. \quad (6)$$

Третье слагаемое в (4) – это инерционная компонента перепада коэффициента давления, зависящая от скорости изменения циркуляции суммарного вихревого слоя на промежутке от задней кромки сечения крыла до расчетной точки:

$$\Delta C_{pI(C)}(\vec{r}, t) = -2 \frac{\partial'}{\partial t} \int_{\vec{r}}^{\vec{r}_2} (\vec{U}_+ - \vec{U}_-) \cdot \delta \vec{r}_0. \quad (7)$$

Зная компоненты коэффициента перепада давления во всех расчетных точках сечения крыла, можно найти компоненты коэффициента нормальной силы сечения крыла для расчетного момента времени.

В дискретном виде уравнение (4) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \Delta C_p(\vec{r}_k, t_i) \approx & \{U_{+x}(\vec{r}_k(t_i), t_i) - U_{-x}(\vec{r}_k(t_i), t_i)\} \left\{ U_{+x}(\vec{r}_k(t_i), t_i) + U_{-x}(\vec{r}_k(t_i), t_i) - 2 \frac{d x_k(t_i)}{dt_i} \right\} + \\ & + \{U_{+y}(\vec{r}_k(t_i), t_i) - U_{-y}(\vec{r}_k(t_i), t_i)\} \left\{ U_{+y}(\vec{r}_k(t_i), t_i) + U_{-y}(\vec{r}_k(t_i), t_i) - 2 \frac{d y_k(t_i)}{dt_i} \right\} - \\ & - \frac{2}{t_i - t_{i-1}} \{U_{+x}(\vec{r}_N(t_i), t_i) - U_{-x}(\vec{r}_N(t_i), t_i)\} \Delta x_N + \{U_{+y}(\vec{r}_N(t_i), t_i) - U_{-y}(\vec{r}_N(t_i), t_i)\} \Delta y_N - \\ & - \frac{2}{t_i - t_{i-1}} \sum_{j=k}^{N-1} \left[\{U_{+x}(\vec{r}_j(t_i), t_i) - U_{-x}(\vec{r}_j(t_i), t_i)\} \Delta x_j + \{U_{+y}(\vec{r}_j(t_i), t_i) - U_{-y}(\vec{r}_j(t_i), t_i)\} \Delta y_j - \right. \\ & \left. - \{U_{+x}(\vec{r}_j(t_{i-1}), t_{i-1}) - U_{-x}(\vec{r}_j(t_{i-1}), t_{i-1})\} \Delta x_j - \{U_{+y}(\vec{r}_j(t_{i-1}), t_{i-1}) - U_{-y}(\vec{r}_j(t_{i-1}), t_{i-1})\} \Delta y_j \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

При этом частную производную в последнем слагаемом уравнения (4) желательно брать как производную параболы, которой нужно интерполировать по трем точкам t_i, t_{i-1}, t_{i-2} циркуляцию скорости по контуру, охватывающему участок сечения крыла от $\vec{r}$ до $\vec{r}_2$, синхронизировав все для момента времени t_{i-1} .

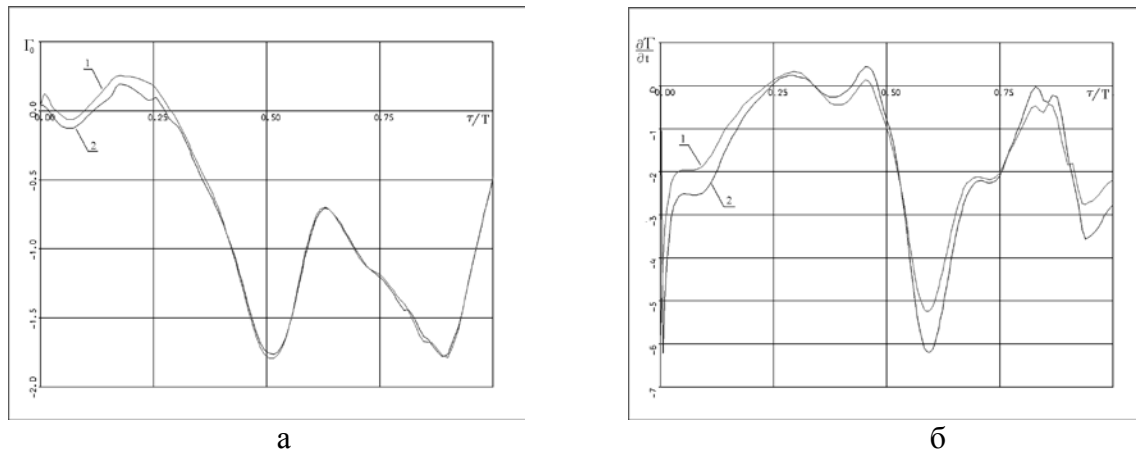


Рис.1 Мгновенная циркуляция (кривая 1 на рис.1,а) [2] и частная производная по времени от циркуляции (кривая 1 на рис.1,б). Кривые 2 – УМДВ [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Shekhovtsov A.V. A Method for Evaluation of an Unsteady Pressure Field in a Mixed Potential-Vortical Domain Adjacent to the Rotating Wing // International Journal of Fluid Mechanics Research. – 2002. – Vol. 29, № 1. – P. 111-123.
2. Sergey Shkarayev, Gunjan Maniar, Alexander V. Shekhovtsov Experimental and Computational Modeling of the Kinematics and Aerodynamics of Flapping Wing // Journal of Aircraft. – 2013. – Vol. 50, № 6. – P. 1734–1747.
3. Dovgij S.A., Shekhovtsov A.V. An Improved Vortex Lattice Method for Nonstationary Problems // Journal of Mathematical Sciences. – 2001. – Vol. 104, № 6. – P. 1615-1627.

TURBULENT BOUNDARY LAYER OVER SURFACE WITH MICROPOROUS SECTION

D.O. Danevskyi¹, E.O. Shkvar²

¹National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,
Institute of Physics and Technology, Kyiv, Ukraine

²Zhejiang Normal University, College of Engineering & College
of Vocational and Technical Education, Jinhua, China

Many active methods of turbulent flow control and skin drag reduction were the subject of detailed researches during the last decades, however there is one method which evidently was not deeply studied and researched relatively to its practical implementation. This method is a gas blowing (or injection) into the boundary layer. Researches of this technology were started in mid-1950's but the intensity of these investigations was greatly slowed down by a large number of researchers who used to think that additional energy consumption of this process realization would be too high for any practical applications. A concept of this method is a gas blowing to the external flow through the set of small orifices, normally or tangentially, with the blowing velocity which is small enough relative to the external flow velocity. In the 90's Hwang (NASA) proposed a modified blowing technology through the porous wall which is currently known as micro-blowing technique (MBT). Using term “micro” we assume that size of orifices or pores is much smaller than boundary layer thickness. The idea of this modification is a substantial decreasing in the characteristic size of orifices which leads to essential decreasing of surface roughness with its negative disturbing influence and, obviously, to friction drag with energy consumption decreasing. Hwang has shown that even in the case of small relative slot sizes and low blowing velocities an essential growth in skin drag reduction could be attained. Hwang also established that porous materials which were traditionally used for this technology had a high enough effective roughness. Evidently in this case one of the most important problems is to find for the given set of conditions the optimal blowing parameters to reach necessary skin friction and, as a result, energy consumptions reduction, so this case needs to be studied more thoroughly. The most effective way for this studying and solving the optimization task is mathematical simulation of the mentioned above type of modified turbulent shear flow.

The aim of this research is to develop the corresponding and reliable mathematical model of the turbulent shear flow on a permeable surface with micro-blowing. The structure of the current version of the elaborated model includes parabolic form of Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) system of equations of incompressible fluid, closed by combined algebraic-differential turbulence model adapted to the blowing factor accounting.

Micro-blowing impact is taken into account by appropriate boundary condition on the streamlined surface. Conducted computations demonstrate an adequate reproduction of flow peculiarities in the range of the mean normal injection velocity through the wall from 0 to 0.12 m/s. Results of comparison with Prof. Kornilov V.I. recent experimental data (2015) have shown the presence of satisfactory correspondence level for the practical applications (maximum relative error doesn't exceed 7%) (Fig.1-3).

Conclusion. At the current stage of the described above research direction the effect of microblowing through the section of a streamlined flat plate has been elaborated. Further researches will be focused on the improvement of the developed model in the direction of clarification of the turbulence model applied to the investigated microblowing method of flow control and its generalization into gradient boundary layers, developing over curvilinear streamlined surfaces.

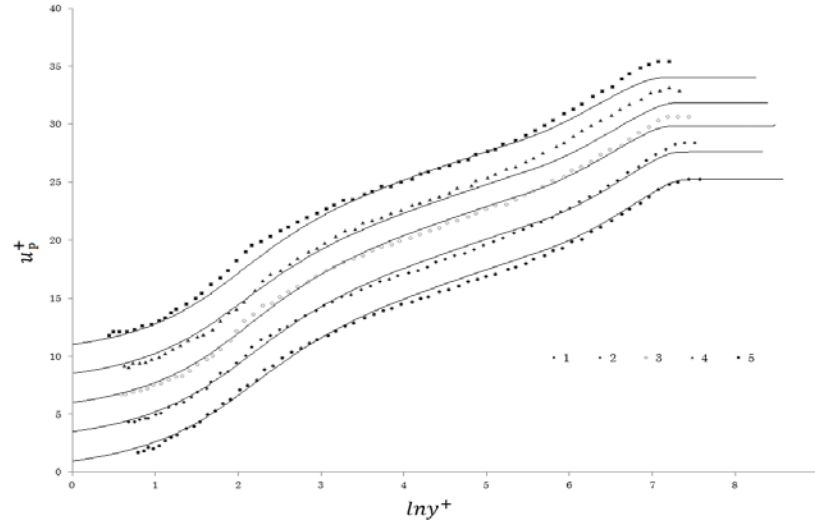


Fig. 1. Velocity profiles in semi-log coordinates of wall law without microblowing (1) and for different values of blowing parameter (2...5 – $C_b = V_w/U_\infty = 0.001; 0.0023; 0.003; 0.004$): circles – Kornilov's experimental data, lines – numerical predictions (each series of comparison is shifted respectively previous in 2.5 along vertical direction)

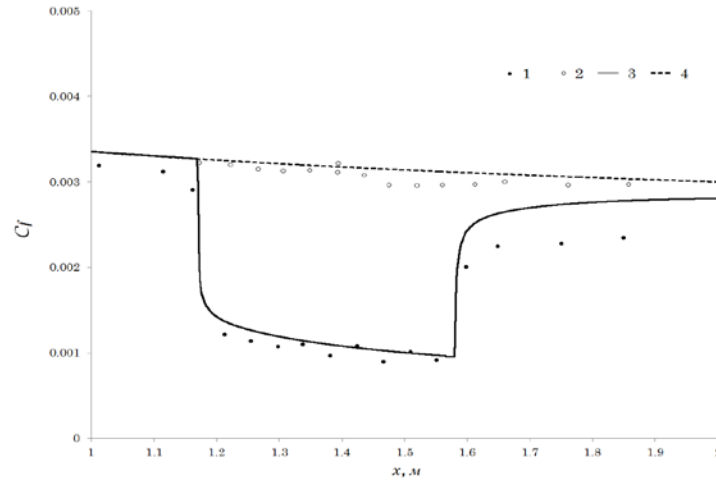


Fig. 2. Dependence $C_f = f(x)$ in cases of microblowing absence (1 – experiments, 4 – predictions) and presence for $C_b = V_w/U_\infty = 0.002755$ (2 – experiments, 3 – predictions)

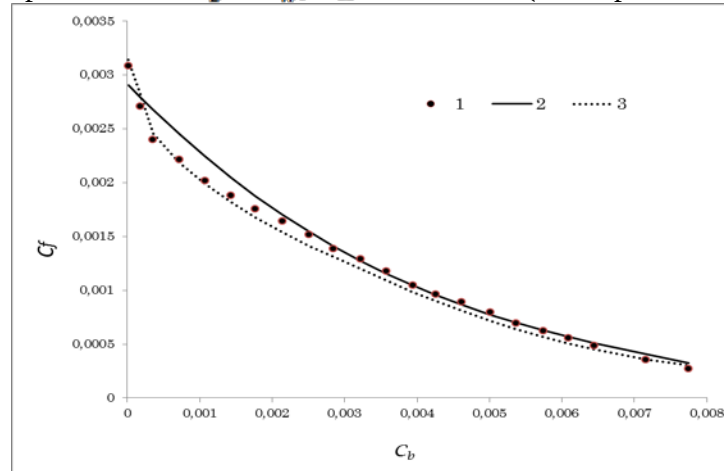


Fig. 3. Dependence $C_f = f(C_b)$ for the porous section of streamlined surface: circles (1) – experimental data, lines (2, 3) – different approaches of turbulence model damping parameter approximations

TURBULENT WALL FLOW CONTROL BY MEANS OF REGULAR HETEROGENEOUS HEATING

O.Yu. Strelyayev ¹, E.O. Shkvar ²

¹National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,
Institute of Physics and Technology, Kyiv, Ukraine

²Zhejiang Normal University, College of Engineering & College
of Vocational and Technical Education, Jinhua, China

The problem of streamlined surfaces shape optimization in the transport sector and in energetics has been solved by mankind for a century and at the present stage of development further improvement of industrial plants and their parameters or technology in this way can't be considered as effective. But the significant way to increase their effectiveness can be based on general principles of fluid mechanics, associated with deliberate action on the structural features of the turbulence exchange mechanism in shear flows. That is why the authors have investigated the ability of the turbulent flow over streamlined surface, heterogeneously heated by regularly spaced longitudinal thin heating elements, and resulting anisotropic regular longitudinal vortex structure in the near-wall region, inhibit under certain conditions the development of turbulence, contributing reduction of friction drag (Fig. 1).

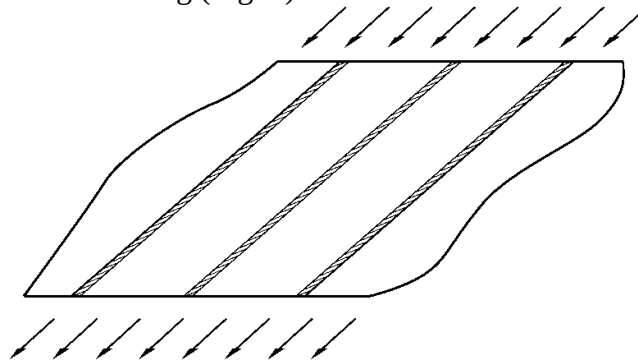


Fig. 1. The geometry of a flat plate with non-uniform heating

To investigate the influence of heterogeneity on the structure of turbulence in the wall region the numerical simulations of the flow on a flat plate with regular longitudinal non-heating elements were carried out. Due to regularity the considering problem is symmetric in the lateral direction so to reduce simulation area and increase the performance of the computer calculations, we can investigate only the near-wall region between two heating elements. A numerical simulation of a turbulent flat plate shear flow with non-uniform heating was conducted by authors using the software package ANSYS Fluent 15.0 and transition-SST turbulence model. In the numerical simulation were set geometric parameters of the computational domain, in particular the length of the plate was taken to be 1.5 m, width - 0.03 m, and the height of the calculated area - 0,125 m. To create non-uniform heating effect heating elements were placed on the each side of a plate m in the longitudinal direction in its entire length, a thickness of each of them are 0.005 m, and a pitch of 0.02 m on a width of plate. Aluminum was taken as the material of the plate and heating elements, and water was chosen as a streamlined fluid. In the A numerical simulation of non-uniform heating the incoming flow rate was assumed to be 1, 4, 8 m/s, while the temperature of the heating elements was varied in the range from 288.15 K to 343.15 K, and temperature of the stream itself, and the plate was taken equal to 288, 15 K.

Main research results are presented as a graphical dependence by Fig. 2, illustrating the sharp decline of the friction drag coefficient in the range of temperatures between 313.15 K and 333.15 K. The value of the friction drag coefficient is close to the minimum at 318.15 K and remained virtually unchanged until the 328.15 K, after which very rapidly back to the values that

approximately correspond to flow without heating plate. The positive effect of this method usage enables 4.53% gain in the value of friction drag coefficient.

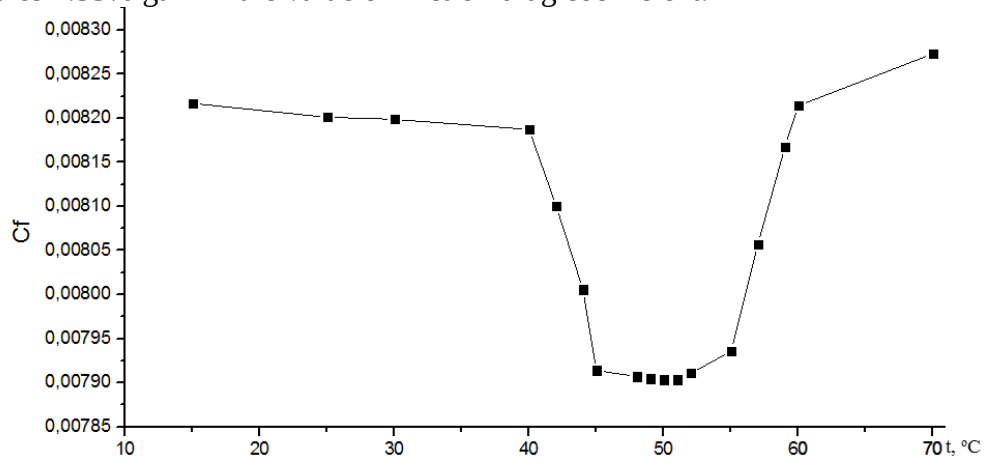


Fig. 2. Dependence of the frictional drag versus temperature at a speed of oncoming flow 1 m / s

Also it was found that friction drag coefficient starts to increase at a temperature of heaters 303.15 K and oncoming flow velocity equals 4 or 8 m/s (Fig. 3). This fact means there is a negative effect of the use of non-uniform thermal effects in that range of operating conditions, so the investigated drag reduction mechanism is very sensitive to parameters both of turbulent flow and wall heating regimes.

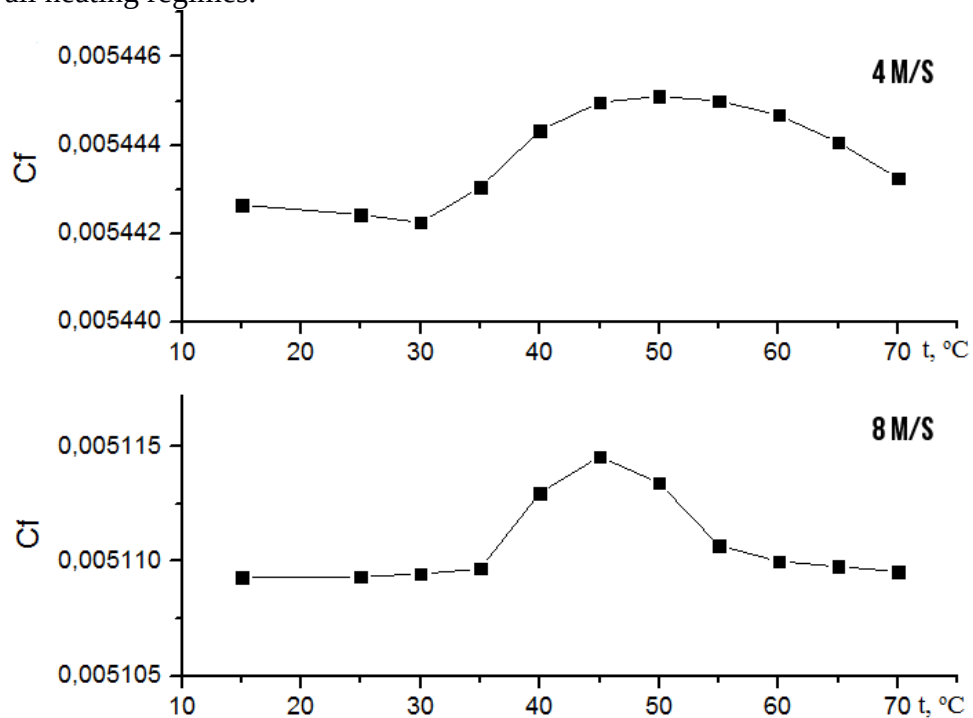


Fig. 3. Dependence of the frictional drag versus temperature at a speed of oncoming flow 4 and 8 m/s

The results of this investigation showed that non-uniform heating of a streamlined surface modifies mechanism of turbulence exchange and, as a result, the properties of a whole flow. Therefore, for the anticipated operating conditions of the drag reduction method it is necessary to select the appropriate value of the heating temperature and the optimal step between the heaters, what is possible to effectively carry out on the basis of the developed methodology.

PARALLEL CUDA-BASED COMPUTING TECHNIQUES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF SCALING THE TURBULENT SHEAR FLOWS MODELING

S.S. Tovkach¹, E.O. Shkvar²

¹National Aviation University, Kyiv, Ukraine

²Zhejiang Normal University, College of Engineering & College of Vocational and Technical Education, Jinhua, China

The effective functioning of high-speed transport vehicles streamline is tightly accompanied by the flow separation prevention and drag reduction and, as a result, implementation of flow control methodology. In this way the efficiency of flow control is strongly dependent on reliability and sophistication level of turbulence modeling together with accuracy and resolution of the applied numerical methods. Because of all these factors significantly increase computing time together with the other important requirements to computational resources (processors productivity and memory utilization), the parallel computing techniques is a powerful key to successful development of perspective flow control directions and strategies. At the present stage the perspectives in turbulent flow modeling methodology can be connected with further development and implementation of parallel realizations of Large Eddy Simulation (LES) method [1,2]. The developer teams of the most popular modern CFD-oriented multifunctional software packages like ANSYS, PHOENICS, OpenFOAM continuously elaborate the parallel computation techniques support.

The simplest ways of the parallel computations realization can be based on:

1) Symmetric Multiprocessing (SMP) that allow to divide the whole volume of computational work into several threads usually less or equal to the total number of processor cores of the applied computer; 2) usage the Message Passing Interface (MPI), which gives the ability to separate the computations into processes, occupying different computer nodes of distributed computer system with cluster architecture.

In addition the massive-parallel techniques, based on GPU-oriented computations can be applied separately or together with two mentioned above strategies of parallelization.

The goal of this research is to analyse the newest MPI & GPU-oriented perspective direction of improving the scaling efficiency of parallel computations in turbulent flows modeling on GPU-based computing clustering systems equipped with NVIDIA Compute Unified Device Architecture (CUDA) graphics accelerators.

Numerical modeling in general is a mathematical model of investigating process, including a system of governing equations expressing conservation laws of modelled quantities together with appropriate computer-aided method for its solving and corresponding algorithm and software of this method implementation. The efficiency of the last factor strongly determines the success and accuracy of numerical modeling generally. Achieving the grows of computational efficiency on the base of CUDA-based massive-parallel technologies together with CUDA aware MPI support is a principal strategy of the provided research. In particular in case of LES method its realization requires developing the parallel versions of the following principal structural elements: 1) the turbulence structure separation into "large" and "small" vortices (filtering procedure); 2) the solving of a system of partial differential equations, whereby large vortices are resolved accurately; 3) the half-empirical description of "small" vortices and their interaction with large ones that are modelled; 4) the correct realization and usage of periodic boundary conditions. The enhanced requirements to computational performance are caused by necessity to make all these operations on each very small time step and on 3D spatial grid, whose resolution, number and dimensions of cells are determined by modelled turbulent flow geometry

and regime parameters. All these factors have been accounted and accurately realized in the elaborated CUDA & CUDA aware MPI-based numerical algorithm. The scaling of computer performance efficiency has been analysed with the help of GPU cluster system, containing 4 GPUs GeForce GTX 680, which were installed in a six-core CPU Intel I7-3960x system [1,2].

The obtained results demonstrate substantial growth of computation effectiveness scaling on a multiple GPU clustering system in case of increasing both the number of applied GPU and dimension of the solved problem (fig. 1.). In case when number of grid nodes in one direction M is ($M \geq 400$) and the number of GPU doesn't exceed 3, dependence of acceleration vs. applied GPU number is so close to linear, but if we use all 4 GPUs of clustering system the growth of acceleration is slowing down due to delays caused by increasing the transmitted information between GPU [2].

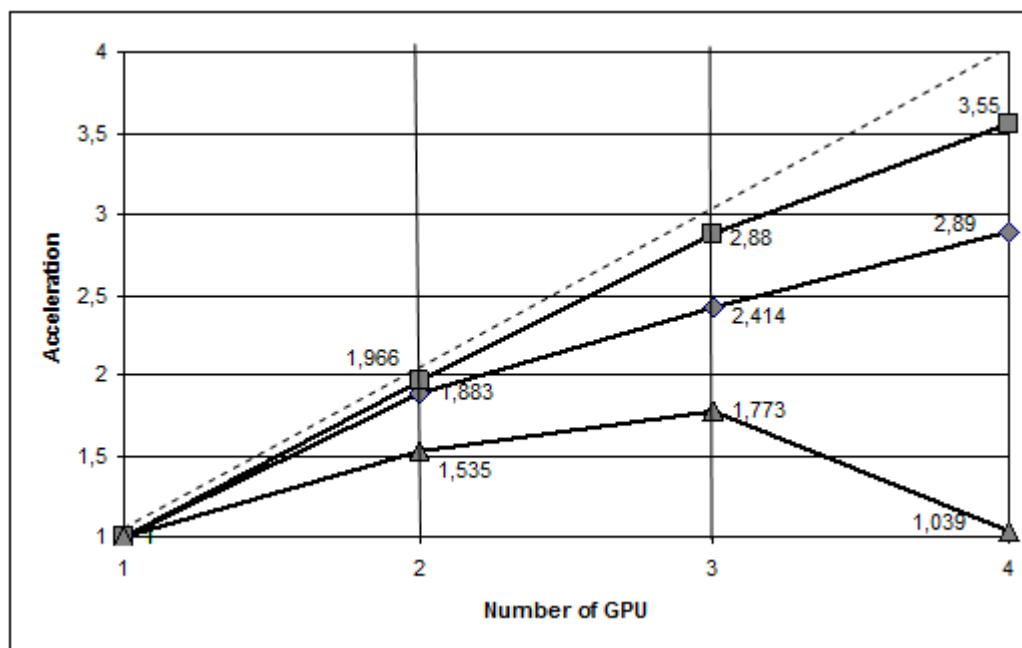


Fig. 1. Dependence the acceleration computing of number of GPU

Δ – $M = 100$; $\diamond$ – $M = 200$; $\square$ – $M = 400$.

Conclusion. The GPU-oriented approach of improving the parallel computation efficiency scaling, based on CUDA & CUDA aware MPI programming tools for turbulent shear flows modeling with the use of LES method has been investigated and analyzed. It helps to better understand and optimize the phenomena of parallel algorithms to solve the governing equations of turbulence unstable exchange processes in shear motion of a fluid.

Development of technology for reliable and high-resolution predictions of turbulent flow properties – a powerful perspective to ensure effective simulation of turbulent flows and develop the perspective methods of their adaptive control. In particular, the CUDA Jetson embodiment is supposed to be a real-time controlling part of such flow control systems with distributed sensitive elements and actuators in a certain section of the streamlined surface.

REFERENCES

1. Шквар Є.О. Інтегрована гібридна технологія паралельних обчислень / Є.О. Шквар // Інтегровані технології та енергозбереження: щоквартальний науково-практичний журнал. – Харків: НТУ (ХПІ). – 2010. – № 1. – С. 86–99.
2. Шквар Є.О. Ефективність паралельного розв'язання рівняння Пуассона на обчислювальних системах з кількома графічними прискорювачами / Є.О. Шквар // Вісник Черкаського університету: сер. Прикладна математика. Інформатика. – 2013. – № 18 (271). – С. 3–10.

[illegible]

Друк трафаретний (різографія). Наклад 100 прим.
Надруковано в Інституті гідромеханіки НАН України.
03680, Київ – 180, Желябова, 8/4.