

На правах рукописи

Усачов  
Александр Евгеньевич

**Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий в пакете VP2/3 с приложениями к фундаментальным и прикладным задачам аэромеханики и теплофизики**

Специальность: 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**  
Диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете гражданской авиации (Санкт-Петербург) на кафедре механики

Научный консультант: доктор физико-математических наук,  
профессор С.А. Исаев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Г.М. Кобельков

доктор физико-математических наук,  
профессор Т.Г. Елизарова

доктор физико-математических наук,  
профессор Ю.Н. Григорьев

Ведущая организация: Институт автоматизации проектирования  
РАН

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 002.024.03 в актовом зале Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (125047, Москва, Миусская пл., 4).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета по защите диссертаций д.ф.-м.н. Н.В. Змитренко.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук:

Н.В. Змитренко.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Выдающиеся достижения научно-технического прогресса в мире во многом обусловлены впечатляющим развитием и широким использованием вычислительных, компьютерных систем и пакетных технологий, предназначенных для численного моделирования физико-технических, тепловых, химических и других процессов. Так, на индустриальном этапе вычислительной аэрогидродинамики (CFD) в последние десятилетия разработаны и активно совершенствуются «тяжелые» пакеты коммерческого типа, такие как Fluent, CFX, ANSYS, FlowVision и др., а также свободного доступа типа OPEN FOAM, основанные на конечно-объемном подходе к решению управляющих уравнений неявными факторизованными методами на структурированных и неструктурированных сетках. Как правило, чтобы обеспечить высокую точность численных прогнозов, необходимо задавать сильное сгущение сеток в областях больших градиентов определяющих параметров, в том числе применять адаптивные, подстраиваемые под решение задачи сетки. Однако реализованные в существующих пакетах традиционные подходы к построению указанных сеточных структур приводят к чрезмерным затратам вычислительных ресурсов и резкому увеличению времени расчетов. Также следует отметить затруднения в конструировании моноблочных сеток в сложных многосвязных областях, а также снижение точности на сгенерированных сильно скошенных косоугольных сетках. Устранить или, во всяком случае, сильно смягчить указанные трудности позволил развиваемый последние полтора десятка лет альтернативный подход на основе многоблочных вычислительных технологий (МВТ), в котором применяются блоки пересекающихся разномасштабных сеток, в том числе с неструктурированными вставками. Расчетная область в этом случае разбивается совокупностью сеток относительно простой топологии, линейные масштабы которых согласованы с масштабами улавливаемых характерных структурных элементов задачи. Таким образом, обеспечивается приемлемая точность решения задачи не только в пристеночных зонах, но и в окружающем пространстве. МВТ реализуются в пакете VP2/3 (скорость-давление, двумерная и трехмерная версии), предназначенном для решения фундаментальных, прикладных и эксплуатационных задач вихревой аэродинамики и теплофизики. Акцент в исследованиях делается на триаде актуальных проблем, согласованных с Планом фундаментальных научных исследований РАН на 2008-2012гг.: вихревая динамика (турбулентность) + сопряженные задачи (теплообмен) + внешняя среда (мезомасштабные модели). Особое внимание в численном моделировании турбулентности и отображении нестационарных отрывных и вихревых потоков уделяется решению нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS), замкнутых с помощью дифференциальных моделей переноса сдвиговых напряжений Ментера и вихревой вязкости

Спаларта-Аллмареса. В круг решаемых задач входят разнообразные тестовые задачи, как правило, имеющие экспериментальные аналоги, исследовательские задачи вихревой интенсификации теплообмена, обтекания тел с вихревыми ячейками, мезомасштабные задачи аэродинамики окружающей среды, в том числе задачи архитектурно-строительной аэродинамики. Работа выполнялась по проектам РФФИ в областях численного моделирования (96-01-00298, 99-01-00722, 02-01-01160, 05-01-00162, 08-01-00059, 11-01-00039) и фундаментальных основ инженерных наук (96-02-16356, 99-02-16745, 02-02-17562, 05-02-16184, 08-08-00065, 11-08-00062), по проекту Еврокомиссии VortexCell2050 в рамках Framework6. Диссертация связана с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники РФ (п.п. 7. Транспортные, авиационные и космические системы; 8. Энергетика и энергосбережение), с основными направлениями технологической модернизации экономики России (5. Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения), с разработкой критических технологий РФ (19. Технологии производства программного обеспечения; 28. Технологии создания новых видов транспортных систем и управления ими; 32. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии).

**Цель работы** заключается в решении актуальных проблем численного моделирования в естественных науках, в частности современной вычислительной аэродинамики и теплофизики.

1. Разработать и верифицировать факторизованные, основанные на концепции расщепления по физическим процессам, неявные конечно-объемные алгоритмы решения нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (URANS) и энергии для расчета пространственных отрывных течений вязкой жидкости и сжимаемого газа, а также вихревого теплообмена.
2. Развить многоблочные вычислительные технологии (MBT), базирующиеся на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках с неструктурированными вставками; реализовать и верифицировать их в среде пакета VP2/3 (скорость-давление, двумерная и трехмерная версия).
3. Провести сравнительный анализ полуэмпирических дифференциальных моделей турбулентности (в том числе, переноса сдвиговых напряжений MSST Ментера, как стандартных (1993 и 2003 гг), так и модифицированной с учетом поправки на кривизну линий тока (подход Лещинера-Роди-Исаева) и вихревой вязкости SA Спаларта-Аллмареса с поправкой Спаларта-Шура) для расчета отрывных турбулентных течений несжимаемой вязкой жидкости.
4. Оценить применимость модифицированной MSST - модели и MBT для расчета до- и сверхзвукового обтекания тел с отрывом потока.
5. Обосновать применимость подхода URANS к моделированию двумерных

- и пространственных периодических отрывных течений.
6. Разработать и обосновать использование эффективных дискретных моделей для различных типов неизотермических вихревых течений с учетом периодичности, согласованности условий на входной границе, изменения физических свойств жидкости.
  7. Выполнить фундаментальные численные исследования смерчевой интенсификации теплообмена при отрывном обтекании поверхности с лунками и управления обтекания тел с активными вихревыми ячейками с распределенным и сосредоточенным отсосом.
  8. Синтезировать математические и дискретные микро-и мезомасштабные модели динамики окружающей среды в приложении к прогнозированию ветрового воздействия на строительные сооружения, к расчетам вентиляции и кондиционирования помещений с учетом турбулентных процессов, температурной стратификации и влажности в рамках многоблочных структурированных с наложением, частично подвижных сеток.
  9. Создать оригинальные упрощенные математические модели, базирующиеся на эмпирических данных и одномерных физических моделях (учитывающих условия на колесе ветротурбинной установки, поршневой эффект движения автомобилей в тоннеле).

#### **Научная новизна работы.**

1. Разработаны оригинальные алгоритмы многоблочных вычислительных технологий, реализованных в пакете VP2/3 гидродинамического и теплофизического профиля и позволяющие отобразить разномасштабные физические особенности в многосвязных областях сложной геометрии на совокупности сеток соответствующего масштаба, с их частичным наложением, как структурированных, так и неструктурированных, в том числе с подвижными элементами.
2. МВТ объединены с обобщенной для расчета несжимаемых и сжимаемых течений неоднородной жидкости (в том числе, с переменными в зависимости от температуры физическими свойствами) процедурой коррекции давления SIMPLEC применительно к управляющим уравнениям в приращениях зависимых переменных на согласованных центрированных сетках с введением в монотонизатор Рхи-Чоу релаксационного коэффициента, равного 0,1.
3. Обоснована приемлемость модифицированной MSST (2003) с учетом влияния кривизны линий тока на вихревую вязкость с дополнительной константой 0,02 в подходе Роди-Лещинера-Исаева для расчета двумерных и пространственных отрывных течений, в том числе периодических.
4. Обобщены на пространственный случай и численно обоснованы оригинальные процедуры коррекции градиента давления и среднемаассовой температуры при использовании периодических граничных условий.

5. Разработаны и апробированы оригинальные подходы к заданию входных граничных условий в набегающем потоке на основе предварительного решения параболизированных уравнений, позволяющие избежать скачков в поле давления, характерных для фиксированных профилей скорости.
6. Распространена на пространственный случай и верифицирована оригинальная трактовка временных периодических процессов вихреобразования на основе осреднения полей, рассчитанных на периоде колебаний составляющей интегральной нагрузки.
7. Оценка точности и эффективности МВТ и пакета VP2/3, приемлемости модифицированной MSST модели подтверждена решением разнообразных тестовых двумерных и трехмерных задач: циркуляционного течения в квадратной каверне с подвижной крышкой; отрывных течений в двумерном поворотном канале с круговой каверной; периодического обтекания кругового цилиндра, полуцилиндра и профиля NASA0015 (2D), куба в узком канале и на плоскости, а также круговой каверны в прямоугольном канале (3D); конвективного теплообмена в узком канале с однорядными лунками – для несжимаемых сред; симметричного отрывного до-и сверхзвукового обтекания цилиндра, шара, каплевидного тела, цилиндра с выступающим соосным диском – для сжимаемых сред; ламинарного и турбулентного конвективного теплообмена при движении масла в пакете круговых труб (2D). Результаты расчетов сопоставлены с аналогичными численными прогнозами, полученными с использованием пакета Fluent и различных полуэмпирических моделей турбулентности, и с экспериментальными данными Жукаускаса, Мартинуццы, Кастро, Гувернюка и Зубина, Михалева и др. на экспериментальных установках ЦАГИ, ИМех МГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, университета в Саутгемптоне и др.
8. Впервые обнаружен эффект 4,5 - кратного увеличения теплоотдачи в узком канале с нанесенными однорядными лунками при использовании масляного теплоносителя.
9. Обосновано преимущество овальных лунок по сравнению со сферическими аналогами при вихревой интенсификации теплообмена в микро- и макроканалах с нанесенными на стенки лунками.
10. Впервые исследован кризис сопротивления толстого профиля с вихревыми ячейками при интенсификации циркулирующих в них потоков за счет отсоса. Определены критические числа Маха.
11. С использованием МВТ и, в частности, упрощенных одномерных моделей решены мезомасштабные задачи вентиляции автомобильных тоннелей и архитектурно-строительной аэродинамики высотных сооружений, практические задачи вентиляции салонов перспективных самолетов, проектирования ветродвигателей.

#### **Практическая ценность работы.**

1. Построены математические модели течений вязкой жидкости и газа на базе многоблочных вычислительных технологий со встраиваемыми

- физическими моделями различных эффектов, позволяющие описывать сложные сопряженные задачи (поршневой эффект от движения в тоннеле, работу ветрового колеса в диффузорном ускорителе и т. д.).
2. Проведено численное моделирование трехмерных нестационарных турбулентных течений, возникающих при вентиляции отдельных частей автодорожных тоннелей (Лефортовский тоннель, Краснопресненский тоннель). Разработаны способы повышения эффективности естественной вентиляции автодорожных тоннелей. Предложена математическая модель моделирования поршневого эффекта движения автомобилей в автодорожном тоннеле на базе одномерных подходов. Построена и применена математическая модель расчета концентрации загрязняющих веществ в воздухе при его движении в автодорожных тоннелях.
  3. Выполнены численные исследования течений воздуха в кабине пилотов и салоне эксплуатируемых (Ту-204, Ту-214, Ил-96) и перспективных пассажирских самолетов (SSJ-95, MC-21) при их вентиляции. Выработаны подходы по оптимизации потоков воздуха при вентиляции салонов и повышению комфортности пассажиров.
  4. Проведено численное моделирование и выявлены основные закономерности течений вблизи ветроэнергетических установок с диффузорным ускорителем.
  5. Выполнено численное моделирование ветрового воздействия на высотные здания и сооружения. Рассчитаны поля ветрового потока в окрестности проектируемого микрорайона «ЭКО».

**На защиту выносятся:**

1. Многоблочные вычислительные технологии, предназначенные для отображения разномасштабных физических особенностей в многосвязных областях сложной геометрии на множественных сетках соответствующего масштаба, с частичным наложением, структурированных и неструктурированных.
2. Дискретизация исходных уравнений, записанных в приращениях зависимых переменных (включающих декартовы составляющие скорости-давление) в криволинейных неортогональных координатах, на центрированном шаблоне с расположением величин зависимых переменных в центре расчетной ячейки моноблочной сетки. Подход к решению системы уравнений глобальными итерациями в рамках концепции расщепления по физическим процессам с использованием процедуры согласованной коррекции давления (SIMPLEC) с регуляризацией Рхи-Чоу на центрированной сетке при выборе параметра релаксации равным 0,1. Выбор различных схем аппроксимации конвективных членов уравнений переноса на гранях контрольного объема для структурированных и неструктурированных сеток для расчета до- и сверхзвуковых потоков в том числе со скачками уплотнения. Увеличение коэффициента диффузионного переноса в неявной части уравнений, позволяющем избежать высокочастотных осцилляций в решении.

3. Модификация модели переноса сдвиговых напряжений MSST (2003) с учетом влияния кривизны линий тока на вихревую вязкость с дополнительной константой 0,02 в подходе Роди-Лешцинера-Исаева применительно к до- и сверхзвуковым отрывным двумерным течениям и трехмерным несжимаемым течениям, в том числе нестационарным, вихревым потокам.
4. Результаты сравнительного анализа дифференциальных моделей турбулентности и обоснование преимущества модифицированной MSST.
5. Разработка оригинальных упрощенных математических моделей, базирующихся на эмпирических данных и одномерных физических моделях (условия на ветровом колесе ветротурбинной установки, поршневой эффект движения автомобилей в тоннеле).
6. Результаты всесторонней верификации основанного на МВТ специализированного пакета VP2/3 с помощью баз данных тестовых задач для CFD (ERCRAFT, Исследовательским центра Льюиса NASA), имеющихся надежных экспериментальных данных (ЦАГИ, НИИ Механики МГУ, Жукаускас А., Краснов Н.Ф. и др.) и данных специально поставленных экспериментов (Гувернюк С.В. (НИИ Механики МГУ), Кастро Я. (Университет Саутгемптона, Великобритания)) в широком диапазоне изменения определяющих параметров.
7. Оригинальные процедуры коррекции градиента давления и среднемассовой температуры при использовании периодических граничных условий (2D и 3D) применительно к теплообмену в неоднородных средах.
8. Оригинальный подход к заданию входных граничных условий на основе предварительного расчета пограничного слоя, позволяющий избежать типичных скачков в решениях, характерных для фиксированных профилей скорости.
9. Разработка основанного на использовании периодических граничных условий подхода к анализу предельных характеристик канального течения и теплообмена при расположении на стенке поверхностных углублений и возвышений.
10. Результаты фундаментальных численных исследований нестационарных неизотермических течений вблизи поверхности с находящимися на ней лунками, обтекания тел с активными вихревыми ячейками. Численное обоснование физических механизмов вихревой интенсификации тепломассообменных процессов при обтекании криволинейных пространственных рельефов и значительного улучшения характеристик обтекания объектов различной геометрии при организации вблизи них крупномасштабных вихревых структур.
11. Синтез математических и дискретных мезомасштабных моделей динамики окружающей среды в приложении к прогнозированию ветрового воздействия на строительные сооружения, к расчетам вентиляции и кондиционирования помещений с учетом турбулентных



процессов, температурной стратификации и влажности в рамках многоблочных структурированных с наложением, частично подвижных сеток.

12. Результаты численного решения ряда задач, имеющих большое прикладное значение в авиационной промышленности, ветроэнергетике и транспорте. Результаты численных исследований турбулентных течений внутри пассажирских салонов самолетов эксплуатируемых (Ту-204, Ту-214, Ил-96) и перспективных (SSJ, MC-21) при их вентиляции. Результаты численных исследований трехмерных нестационарных турбулентных течений, возникающие при вентиляции элементов автодорожных тоннелей (Лефортовский и Краснопресненский тоннели).

#### **Апробация работы**

Изложенные в диссертации материалы докладывались на XI, XII, XIII, XIV, XV, XVI школах - семинарах "Современные проблемы аэрогидродинамики" под рук. акад. Черного Г.Г. Буревестник, Туапсе, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2010 гг.; Пятой, Шестой, Седьмой, Восьмой, Девятой, Десятой и Одиннадцатой Международных школах-семинарах «Модели и методы аэродинамики». Евпатория 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 гг.; Второй, Третьей, Четвертой и Пятой Российских национальных конференциях по теплообмену МЭИ, Москва 1998, 2002, 2006, 2010 гг.; III, IV, V, VI Минских Международных Форумах по Тепло- и Массообмену Минск 1996, 2000, 2004, 2008 гг.; "Всероссийской конференции. Свободное программное обеспечение – 2010 г. (СПО-2010)" Санкт-Петербург, 2010 г.; Второй научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы» МГСУ, Москва 2009 г.; Международной конференции «Параллельные вычислительные технологии», ПАВТ г. Нижний Новгород 2009 г.; Второй, Третьей и Четвертой Международных конференциях «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» МЭИ, Москва 2005, 2008 и 2011 гг.; West-East High Speed Flow Field Conf., Moscow, 2007 г.; Конференции «Авиационные технологии XXI века: новые рубежи авиационной науки» в рамках Международного авиационно космического салона МАКС 2001 г., Научные чтения по авиации памяти Н.Е. Жуковского, Москва 2003 г.; Международной конференции «Тихонов и современная математика» Москва, 2006 г.; X юбилейной международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. Секция. В. Численные методы механики жидкости и газа. Переяславль-Залесский. М: МГИУ, 1999 г.; XXVII Сибирском теплофизическом семинаре, посвященном 90-летию акад. С.С.Кутателадзе. Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2004 г.; XVI Международной школе-семинаре по численным методам механики вязкой жидкости. Новосибирск. 1998 г.; Fourth ECCOMAS CFD Conf. Athens, Greece, 1998; 8th Int. Symposium on Flow Visualization. Sorrento. 1998; 2nd East European Conf. on Wind Engineering. Prague, 1998; 7th Int. Conf. Computational Fluid Dynamics. Beijing,

China, 1997; XIII Int. Conf. on Methods of Aerophysical Research. Novosibirsk, 2007; IXX, XX, XXI, XXII научно-технической конференции по аэродинамике. ЦАГИ, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012 гг.; семинаре ВЦ РАН под руководством проф. Кобелькова Г.М. 2009 г.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 65 печатных трудов, в том числе 30 статей в списке ВАКа.

**Личный вклад автора.** Результаты, представленные в работе, в основном получены автором, однако многие исследования выполнялись при участии соавторов и являлись частью исследовательских и хозяйственных программ лаборатории фундаментальных исследований СПбГУ гражданской авиации, а также НИМК ЦАГИ.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения. Общий объем диссертации 302 стр., в том числе 152 рисунков и 8 таблиц, расположенные по тексту, а также список литературы, включающий 209 наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обосновывается актуальность и практическая значимость рассматриваемого научного направления; формулируются цели исследования, дается представление о структуре диссертации и о внедрении полученных в ней результатов.

В **первой главе** обсуждаются состояние и тенденции разработки пакетных технологий аэрогидродинамического и теплофизического профиля с акцентом на моделирование турбулентных и нестационарных вихревых течений. Генезис диссертации связывается с работами научных школ численного моделирования физико-технических процессов в энергетике и на транспорте С.А. Исаева, промышленной аэродинамики и турбулентности А.С. Гиневского, к которым принадлежит автор. Ретроспектива его публикаций последних двадцати пяти лет позволяет проследить не только эволюцию интересов автора, но и проиллюстрировать развитие CFD на индустриальном этапе. На рубеже тысячелетия автор включился в работу по созданию специализированных «тяжелых» пакетов прикладных программ и продолжает активную деятельность в этом направлении.

1.1. Предвестником работы стали численные расчеты турбулентных струй, двумерных стационарных и осциллирующих, вихревых и отрывных, внешних и внутренних течений несжимаемой вязкой жидкости, в том числе с помощью разработанного на основе концепции расщепления по физическим процессам, конечно-объемного, неявного, факторизованного метода решения уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса, а также с использованием диссипативной двухпараметрической модели Лаундера-Сполдинга [1-5].

1.2. Опыт расчетов пространственных задач вихревой гидромеханики и теплофизики на персональных компьютерах средней мощности, полученный в девяностых годах прошлого века с помощью развитой методологии на

моноблочных сетках [4,6-16], а также применение «тяжелых» пакетов типа PHOENIX, FLOW3D, FLUENT и др. высветили ряд проблем численного моделирования течений со сложной, разномасштабной структурой в многосвязных областях, таких как зависимость точности прогнозов от густоты сеток, от скошенности сеточных линий, низкая вычислительная эффективность расчетов на нерациональных сетках. Этот же временной период был отмечен интенсивной разработкой математических моделей, в особенности, моделей турбулентности (Ментера и Спаларта-Аллмареса).

1.3. Разработка пакетов прикладных программ основывается на принципах модульного программирования с обязательным сервисным обеспечением. На современном этапе применяются системы объектно-ориентированного программирования. Применительно, прежде всего, к многосвязным областям последовательно реализуется концепция повышения точности численных прогнозов на основе перехода от моноблочных сеток к многоблочным, структурированным аналогам с их частичным наложением. Развиваемые многоблочные вычислительные технологии (МВТ) воплощаются в специализированном (нацеленном на решение конкретных задач) пакете VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D). Интерактивное введение совокупности локальных сеток простой топологии позволяет с приемлемой точностью разрешить разномасштабные, структурные элементы решаемых задач и практически обеспечить сеточную независимость. Предлагаемый подход к генерации сеточных структур позволяет резко сократить количество необходимых расчетных ячеек и повысить вычислительную эффективность пакетных технологий. Диссертация содержит информационные материалы по МВТ, каталогу использованных математических моделей и граничных условий, их тестированию и анализу опыта применения для решения фундаментальных и прикладных задач [17-65].

Во **второй главе** представляются наиболее употребительный подход к моделированию нестационарных отрывных течений неоднородной жидкости, основанный на URANS, каталоги использованных моделей турбулентности и граничных условий на стенке для теплообмена.

2.1. Запись исходных уравнений движения вязкой, в общем случае, неоднородной среды (уравнений Навье-Стокса для ламинарного режима и уравнений Рейнольдса для турбулентного режима) осуществляется в обобщенных криволинейных координатах относительно зависимых переменных, включающих декартовы составляющие скорости. Уравнения состояния записываются для несжимаемой и сжимаемой среды. Помимо сред с постоянными физическими свойствами (вода, воздух) рассматриваются масляные среды с зависящими от температуры свойствами (задаются табличным образом).

2.2. Используемые для замыкания уравнений Рейнольдса модели турбулентности включают в себя двухпараметрическую диссипативную  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, однопараметрическую модель вихревой вязкости Спаларта-Аллмареса (SA) и новую (предложенную Ментером в 2003г)

зональную модель переноса сдвиговых напряжений (MSST), которая хорошо зарекомендовала себя в приложении к типичным пристеночным течениям, в том числе с отрывом потока. Последняя  $k-\omega$  MSST модель представляет обобщение двух известнейших в практике инженерных расчетов моделей турбулентности: высокорейнольдсовой  $k-\varepsilon$  - модели Лаундера-Сполдинга (включающейся в зонах сдвига вдали от стенки) и низкорейнольдсовой  $k-\omega$  - модели Саффмена-Вилкокса (задействованной в пристеночной области). При конструировании зональной модели переноса сдвиговых напряжений используются идеи, заложенные в модель турбулентности Джонсона-Кинга. Вместо модуля завихренности (версия MSST 1993г.) в выражении для вихревой вязкости используется модуль тензора скоростей деформации. Модели модифицируются для учета влияния кривизны линий тока на характеристики турбулентности. Широко применяется подход Лещинера-Роди с функциональной зависимостью  $f_c$  от турбулентного числа Ричардсона  $Ri_t$  с дополнительной полуэмпирической константой  $C_c$  [ $f_c=1/(1+C_c Ri_t)$  ], на которую умножался коэффициент турбулентной вязкости  $\mu_t$ , где следуя С. Исаеву и В. Харченко величина  $C_c=0,02$ .

2.3. Постановка сопряженных задач динамики твердого тела и гидродинамики окружающей среды выполнена на примере моделирования вращающейся лопасти ветряка.

2.4. Обсуждаются граничные условия, в частности, постановка граничных условий на твердой стенке для различных моделей турбулентности, на входных и выходных проточных границах расчетной области.

В **третьей главе** иллюстрируются развитые многоблочные вычислительные технологии применительно к решению задач вихревой гидродинамики и теплообмена. Разработка МВТ обусловлена преимущественно численными исследованиями обтекания тел с вихревыми ячейками, которые стимулировали проведение моделирования разномасштабных течений на совокупности Н- и О- образных сеток с их частичным пересечением. Такой подход позволил использовать сетки простой топологии для описания довольно сложных объектов с многосвязными областями и одновременно корректно отображать разнообразие структурные элементы течения.

3.1. Особенности разработанного неявного факторизованного алгоритма:

а) система исходных уравнений (в общем случае состоящая из уравнений неразрывности, изменения количества движения, энергии и состояния с их замыканием уравнениями модели турбулентности) записывается в дельта-форме в криволинейных, согласованных с границами расчетной области координатах относительно приращений зависимых переменных; б) центрированный расчетный шаблон с привязкой всех зависимых переменных к центру ячейки используется для вывода дискретизированных уравнений в рамках конечно-объемного подхода для

структурированных и неструктурированных сеток; в) линейризованная система исходных уравнений решается с помощью согласованной, обобщенной (на сжимаемые и несжимаемые течения) процедуры коррекции давления SIMPLEC, основанной на концепции расщепления по физическим процессам и записанной в E - факторной формулировке; г) с целью снижения влияния численной диффузии в расчетах отрывных течений, в особенности чувствительных к ошибкам аппроксимации конвективных членов уравнений переноса, в явной части уравнений движения применяется одномерный аналог противопоточной схемы с квадратичной интерполяцией (QUICK) для дозвуковых течений и схемы Ван-Лиры для сверхзвуковых течений; д) дискретизация конвективных членов уравнений переноса характеристик турбулентности проводится по схеме Ван-Лиры; е) чтобы избежать ложных осцилляций при отображении течений с тонкими сдвиговыми слоями, в неявной части уравнений вводится механизм искусственной диффузии в сочетании с односторонними противопоточными разностями для представления конвективных членов; ж) для устранения немонотонности поля давления при дискретизации градиента давления по центрально-разностной схеме на центрированном шаблоне в блок коррекции давления введен монотонизатор, с эмпирическим сомножителем, определенным в ходе численных экспериментов на задаче обтекания цилиндра и шара и равным 0,1[4]; з) высокая эффективность расчетной процедуры для решения дискретных алгебраических уравнений обеспечивается применением метода неполной матричной факторизации; и) для более точного описания нестационарных процессов при аппроксимации нестационарного члена целесообразно использовать трехточечную схему Пейре второго порядка аппроксимации по времени; к) глобальные итерации на каждом временном шаге завершаются при условии достижения сходимости полей зависимых переменных с заданной приемлемой точностью и, таким образом, построен единый метод глобальных итераций для решения стационарных и нестационарных задач [7, 24]; л) следуя Ментеру, для низкорейнольдсовых моделей пристеночные функции сочетаются с условиями прилипания; м) развитые для двумерных задач оригинальные процедуры коррекции градиента давления и среднемассовой температуры распространяются на решение пространственных задач с периодическими граничными условиями [51-53]; о) конструирование расчетных сеток в подобластях осуществляется с помощью алгебраических и эллиптических алгоритмов, а необходимые для низкорейнольдсовых моделей турбулентности расстояния до омываемых стенок, следуя Ментеру, определяются на основе специально сконструированного уравнения Пуассона.

3.2. МВТ основывается на **автоматизированной интерактивной процедуре согласования простых по топологии накладываемых с пересечением структурированных сеток**, в том числе подвижных, настроенных на отображение многосвязных областей и разномасштабных характерных особенностей течения. Данный подход эквивалентен

использованию адаптивных неструктурированных сеток, но отличается от него существенно меньшими вычислительными ресурсами, т.е. более экономичен. Он также обеспечивает надлежащую точность без измельчения сеток, т.к. автоматически разрешает масштабы уловленных гидродинамических особенностей на интерактивно введенных сетках соответствующего масштаба. Так, например, хорошее разрешение пристеночной области течения за счет введения отдельной мелкой сетки позволило без существенных затруднений перейти на современные низкорейнольдсовы модели турбулентности, такие как MSST и SA. Наложенная мелкая сетка в ближнем следе за круговым цилиндром способствовала надлежащему разрешению нестационарной вихревой дорожки Кармана. Особое внимание уделяется воспроизводству мелкомасштабного течения около скругленной острой кромки (например, в канале с круговой каверной), в окрестности которой вводится специальная сетка соответствующего масштаба. Также с помощью отдельной сетки выделяется зона расположения развивающегося сдвигового слоя. Вообще говоря, количество вводимых сеток неограниченно и в пакете VP2/3 средствами объектно-ориентированного программирования осуществляется их автоматическое соединение и установление связей между ними. Безусловно, введение дополнительной сетки, связанной с той или иной гидродинамической (или физической) особенностью течения (поля характеристик), настройка ее на соответствующий масштаб осуществляются в ходе получения предварительного решения.

В МВТ объединяются многоярусные (с разрежением ячеек по мере удаления от омываемой стенки) и пересекающиеся (для отображения многосвязных подобластей) сетки. Различаются расчетные и связанные ячейки. В расчетных ячейках решаются исходные уравнения, а в связанных значения параметров определяются интерполяцией данных из других областей. Показано, что вполне приемлемой является неконсервативная, линейная интерполяция. Перед началом решения каждого уравнения рассчитываются переменные в связанных ячейках. Затем делается один итерационный шаг в каждой области. Последовательность просмотра областей значения не имеет. При переходе к следующей итерации (не глобальной, а для выбранного уравнения) определяются значения поправок для данной переменной. Предложенный алгоритм легко адаптируется к расчету течений на скользящих сетках.

3.3. На основе решения двумерных и пространственных нестационарных задач развивается и обосновывается **оригинальный подход к трактовке циклических процессов** на основе осреднения полей, рассчитанных на периоде колебаний поперечной интегральной нагрузки.

3.4. **Оригинальный подход** к заданию входных граничных условий на основе предварительного решения погранслойной задачи позволяет избежать типичных скачков в решениях, характерных для фиксированных профилей скорости.

**3.5. Структура специализированного пакета VP2/3** традиционная и объединяет в одной оболочке препроцессор, решатель и интерпретатор расчетных результатов. Фактически это библиотека задач с ответственными за вычислительный процесс общими модулями и индивидуальными блоками, как правило, служащими для обработки информации. Предварительная версия разработана в операционной среде DELPY, причем она до сих пор отчасти используется для представления результатов. Современная версия VP2/3 переписана в операционной среде C++ и распараллелена в рамках MPI подхода. Реализуется следующая архитектура параллельной версии программы.

На одном из процессоров запускается главный процесс, который содержит данные, общие для всей задачи, но не содержит сеточных данных. Он отвечает за обмен данными с диском и интерфейс с пользователем и компьютерными узлами. Каждый компьютерный узел выполняет одновременно один и тот же программный код со своим собственным набором данных. Для осуществления коммуникации с главным процессом и другими компьютерными узлами используется стандарт Message Passing Interface (MPI).

Обмен информацией между главным процессом и подобластями осуществляется в процессе решения неоднократно. При запуске задачи в каждой подобласти создаются локальные копии схемных параметров задачи (коэффициенты релаксации, параметры завершения локальных итераций и т.д.), а также характеристик материала. Это делается для того, чтобы уменьшить количество обращений к главному процессу в процессе расчета. При выполнении локальных итераций для каждого уравнения в конце итерации обновляются значения приращений в интерфейсных (связанных) ячейках, ответственных за передачу информации между областями.

**В четвертой главе** объединяются материалы по тестированию развитого многоблочного расчетного алгоритма, верификации пакета VP2/3, обоснованию приемлемости URANS для анализа периодических процессов (автоколебательных режимов). Тестирование VP2/3 проведено на комплексе задач, имеющих физические аналоги (акцент на компьютерные аналоги экспериментальных установок). При этом численные прогнозы сопоставляются не только с данными имеющихся экспериментов (ЦАГИ, ИМех МГУ, а также в базе данных ERCOFTAC), но и с результатами специально выполненных испытаний на лабораторных установках ИМех МГУ, МГТУ им. Н.Э.Баумана, СПбПУ, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, ИТФ СО РАН, CIRA (Италия), Университета Саутгемптона (Великобритания) и др. Отдельно следует отметить сравнительный анализ результатов, полученных с помощью различных пакетов VP2/3 и Fluent.

4.1. Разработанные факторизованные неявные алгоритмы с использованием SIMPLEC-метода для решения уравнений Навье-Стокса для *несжимаемой вязкой жидкости* на моноблочных сетках обосновывались и анализировались на традиционных тестовых задачах о циркуляционном

течении в квадратной каверне с подвижной крышкой [4,36], обтекания обращенной назад ступеньки [4], кругового цилиндра и шара с образованием дорожки Кармана [4]. Решены методические проблемы о влиянии обусловленной ошибками аппроксимации конвективных членов уравнений переноса численной диффузии с выбором противопоточной квадратичной схемы Леонарда в качестве базовой, подобраны коэффициенты релаксации, в том числе монотонизатор в коррекции Рхи-Чоу. Для течения в каверне получены решения при высоких числах Рейнольдса [36]. При этом показано, что гипотеза Бэтчелора о формировании в каверне крупномасштабного вихря, окруженного тонким пограничным слоем, не вполне справедлива, хотя интенсивность вихря с ростом числа  $Re$  стремится к асимптотическому значению. В угловых зонах каверны возникают множественные вторичные вихри, играющие роль направляющих, причем их развитие происходит даже при  $Re > 10^4$ .

Развитая методология для решения двумерных задач гидромеханики на моноблочных сетках распространена на пространственные аналоги, в частности на расчеты стационарного и нестационарного ламинарного обтекания луночного рельефа на согласованных с криволинейной стенкой декартовой и цилиндрической сетках [6,7,10,11,14,15], ламинарного обтекания продольного цилиндра с выступающим диском [12,13].

4.2. Предвестник МВТ разрабатывался для решения задачи обтекания тела (кругового цилиндра и профиля) с вихревой ячейкой в многосвязной расчетной области с наложением структурированных сеток [12,13,16]. Турбулентный режим течения описывался с использованием высокорейнольдсовой модели  $k$ - $\varepsilon$  с пристеночными функциями. Именно в расчетах турбулентных течений на цилиндрических сетках возникла трудность получения решения в приосевых ячейках, которая была преодолена за счет введения дополнительной прямоугольной сетки «заплатки». Также были введены многоярусные сетки, позволившие уточнить разрешение пристеночного течения, в частности в пограничном слое, и перейти к использованию низкорейнольдсовых моделей турбулентности, а дополнительные подробные сетки в ближнем следе за телом (в частности, цилиндром) способствовали отображению развивающихся вихревых дорожек [27,29,34]. МВТ легко распространяются на скользящие (подвижные) сетки [35].

Вихревая дорожка за круговым цилиндром рассчитывается при  $Re=140$ , причем детально сопоставляются результаты решения с использованием пакетов VP2/3 и Fluent, а также картины из атласа Ван-Дайка [23,30]. Показана эквивалентность развития полей завихренности и концентраций дыма. Расчеты ламинарного и турбулентного обтекания сферической лунки хорошо согласуются с данными испытаний в гидротрубе (М.Рабинович и др.) и на установке ИТФ СО РАН (В.Терехов и др.) [22].

4.3. Следующий крупный верификационный блок посвящен обоснованию выбора, апробации и верификации модели турбулентности



MSST. В двухчастном исследовании [38,39] циркуляционного стационарного турбулентного течения в квадратной каверне при  $Re=5 \times 10^4$  детально анализируются различные полуэмпирические модели турбулентности, сеточные структуры и пакеты (VP2/3 и Fluent). Результаты численных прогнозов сравниваются с экспериментальными данными Майлза. Показано существенное преимущество моделей MSST (образца 1993г) и SA (модифицированная версия) над моделями семейства  $k-\epsilon$  и моделью V2F. В [37] рассматривается нестационарное турбулентное обтекание кругового цилиндра в до- и закритическом режимах. В целом, на основе сравнения с многочисленными экспериментальными и расчетными данными по интегральным и локальным силовым нагрузкам (Игараши, Рошко, Бычков и др.) подтверждаются выводы [38,39] об адекватности моделей MSST и SA, а также приемлемость двумерного подхода к интерпретации вихревых процессов. Апробирована предложенная процедура анализа характеристик автоколебательного режима при их осреднении на периоде колебаний подъемной силы. В дальнейшем он был успешно применен для интерпретации пространственных циклических процессов.

Адекватность MSST подтверждена при решении задач конвективного теплообмена при стационарном обтекании неглубокой лунки на плоской стенке (эксперимент Сапожникова) [56,63]. Широкий круг тестовых расчетов с использованием MSST (версия 1993г) был выполнен для задач турбулентного обтекания траншей и лунок на плоской стенке [25,33]. Продемонстрировано хорошее согласие численных прогнозов с экспериментальными данными Леонтьева, Чудновского, Чоу и др. MSST (2003) с поправкой на кривизну линий тока ( $C_c=0,02$ ) верифицируется, рассчитывая эксперимент Кастро на установке Университета Саутгемптона (рис.1). Продольная составляющая скорости отнесена к максимальной скорости.

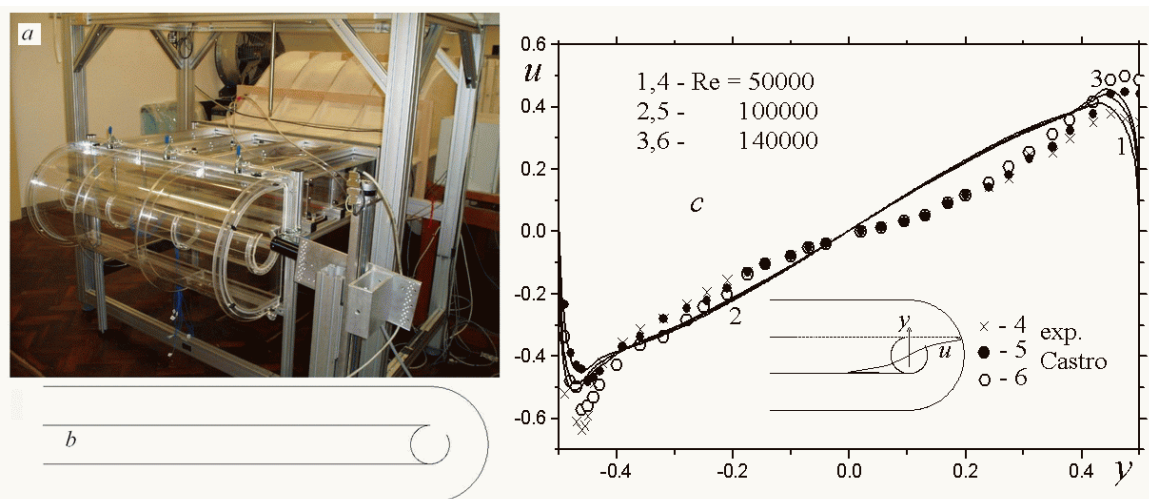


Рис.1 Экспериментальная установка в Саутгемптоне (а), компьютерная модель каверны в поворотном канале (б), сравнение расчетных (1-3) и экспериментальных (4-6) профилей скорости при различных числах Рейнольдса

4.4. Обобщенная процедура коррекции давления для расчета до- и сверхзвуковых отрывных течений сжимаемого вязкого газа и модель MSST [42,45,49,50,54] первоначально тестировались на классических задачах о взаимодействии падающей ударной волны с пограничным слоем и обтекания угла сжатия (сравнение с экспериментами Хорстмена). Однако пристеночные турбулентные течения с косыми скачками уплотнения вблизи криволинейных рельефов оказалось легче рассчитать, чем обтекание затупленных тел, для которых характерны прямые скачки высокой интенсивности.

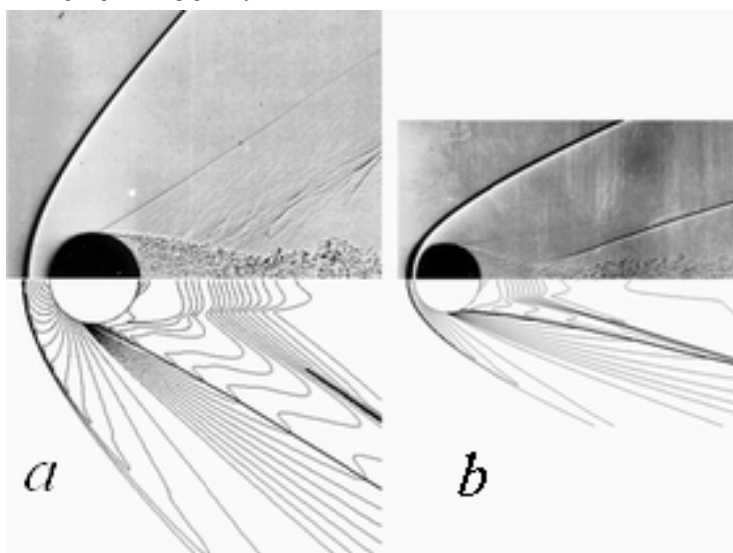


Рис.2 Сравнение ударно-волновой картины обтекания шара с нанесенными на рассчитанное поле давления скачками уплотнения ( $Re=10^5$ ) при  $M=1,53(a)$  и  $3(b)$ . Для  $a$ ) изобары от 0 до 0,75 нанесены с шагом 0,05, а от -0,15 до 0 - с шагом 0,01;  $b$ ) изобары от 0 до 0,9 нанесены с шагом 0,05, а от -0,06 до 0 - с шагом 0,005

Тестовые исследования сверхзвукового обтекания классических тел типа цилиндра, шара (рис.2), острого и притупленного конуса, а также каплевидного тела с юбкой, цилиндра с выступающим диском показали [43,64], что уравнение энергии следует записывать относительно полного теплосодержания, а для дискретизации конвективных членов уравнений использовать схему Ван-Лира, в том числе для определения плотности на гранях контрольного объема. Хорошее согласование по интегральным и локальным характеристикам, таким как распределение поверхностного давления, получено с экспериментальными данными ЦАГИ, ИМехМГУ, МГТУ (МВТУ) им. Н.Э.Баумана, ФТИ им.А.Ф.Иоффе. Сравнение на рис.2 рассчитанных и экспериментальных ударно-волновых картин обтекания шара при различных числах Маха и Рейнольдса демонстрирует приемлемое прогнозирование расположения скачков, в том числе слабых, висячих и хвостовых, отрывных зон, причем турбулентность проявляется только в следе за шаром, а ударные волны распространяются в невязкой области течения.

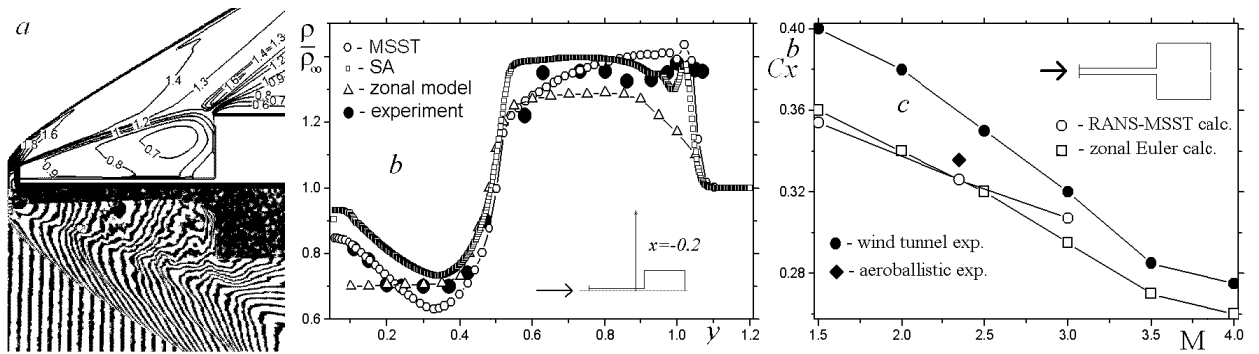


Рис.3 Сравнительный анализ рассчитанных с помощью различных моделей турбулентности (MSST, SA) полей плотности, отнесенных к плотности в набегающем потоке, и интерферограммы обтекания цилиндра с выступающим диском (a), профилей относительной плотности в сечении передней отрывной зоны (b), а также расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента волнового сопротивления (c).  $M=2,35$ ,  $Re=10^6$ ,  $L=1,4$  и  $d=0,233$

На основе сравнения с данными аэробаллистических испытаний, трубного эксперимента и численными прогнозами локальных и интегральных характеристик обтекания цилиндра с выступающим диском по модели SA (рис.3), упрощенной зональной модели (идеальный газ рассматривается везде, кроме априори заданного, развивающегося вдоль опорной, соединяющей острые кромки линии сдвигового слоя, в котором решаются уравнений Рейнольдса с замыканием по второй, конвективной модели Прандтля) обоснована приемлемость MSST (модифицированной с учетом поправки на кривизну линий тока) в широком диапазоне изменения числа Маха набегающего потока от 1,5 до 4 [64].

4.5. Обоснование приемлемости URANS для анализа периодических процессов (автоколебательных режимов) проводится на серии двумерных и трехмерных задач. Рассчитаны турбулентное обтекание профиля NACA0015 и полуцилиндра, причем сравниваются как интегральные, так и поверхностные силовые характеристики, осредненные по периоду колебаний подъемной силы. Перечень трехмерных задач содержит известную тестовую задачу обтекания кубика на стенке (эксперимент Кастро), в том числе в узком канале (эксперимент Мартинуцци) и две исследовательские задачи: о движении воздушного потока в канале с круговой поперечной каверной (эксперимент С.Гувернюка и М.Зубина в ИМех МГУ) и обтекание крыла в рабочей части трубы CIRA (эксперимент Донелли в CIRA, Италия). Первая тестовая задача входит в каталоги ECCOMAS. Куб находится в узком канале между параллельными стенками. С помощью распараллеленного решателя VP2/3 рассчитывается выход течения в канале на автоколебательный режим при  $Re=10^5$ . Возникает сложный циклический процесс вихреобразования, аналогичный вихревой дорожке Кармана за цилиндром. Осреднением по периоду колебаний поперечной силы, действующей на кубик ( $St=0,108$ ), получаем симметричные картины распределений давления спереди и сзади кубика. Профили продольной составляющей скорости, положения точек отрыва и присоединения потока распределения поверхностного давления удовлетворительно согласуются с данными экспериментов [45, 49, 54].

Расчеты нестационарного турбулентного течения в плоскопараллельном канале с круговой каверной выполнены при условиях, близких к экспериментальным. Число Рейнольдса выбрано равным  $2 \times 10^5$ . Толщина пограничного слоя на входе в канал – 0,175, а интенсивность турбулентности – 1%. Высота канала выбрана в качестве характерного размера.

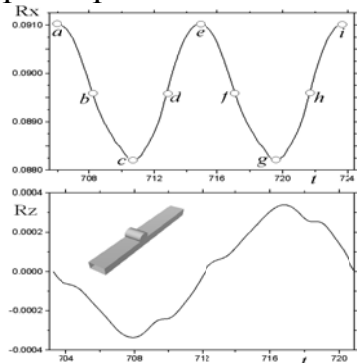


Рис.4 Периодическое изменение интегральных продольной и поперечной сил

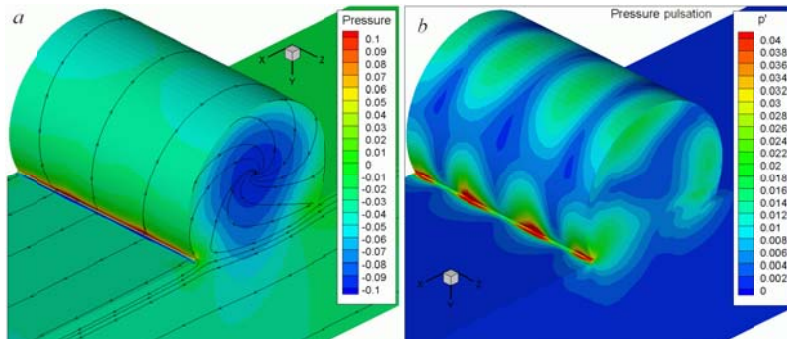


Рис.5 Осредненные по периоду поля статического (a) и пульсационного (b) давления

Бимодальное изменение продольной силы  $R_{xf}$  (рассчитанной по поверхности каверны), обусловленной трением, а также изменение продольной силы  $R_x$  в целом (рис.4) соответствует одномодальному поведению поперечной силы  $R_z$ , подобно поведению характеристик кубика в канале. Поперечные колебания воздушной среды в канале с круговой каверной характеризуются  $T=18$ , а продольные –  $T=9$ . Происходит попеременное формирование зон пониженного давления в левой и правой донных частях каверны по отношению к срединному продольному сечению канала. Колебания давления внутри каверны сопровождаются циклическими изменениями давления на стенках канала вниз по потоку от каверны. Очевидно, что они являются результатом воздействия отрывного течения в каверне на течение в канале.

Осредненное по периоду колебаний поле поверхностного давления в канале с круговой каверной представляется полностью симметричным относительно продольного срединного сечения канала (рис.5). На боковых стенках каверны формируются особые точки типа фокус, из которых жидкость смерчеобразными струями выносится к центру каверны. Взаимодействующие встречные струи в срединном сечении канала с каверной формируют картину циркулирующего потока с раскруткой жидких частиц от центра к периферии. Крупномасштабный вихрь создает зону пониженного давления, которая в центре каверны выходит в область канального потока. Рассмотренное ранее поведение поля давления на периоде колебаний  $R_{xf}$  объясняет картину осредненного поля пульсаций давления на рис.5, b. Обнаруживаются четыре придонных зоны повышенного уровня пульсаций давления: две у боковых стенок и две симметрично расположенных относительно срединной плоскости канала. Интересно

отметить, что площадь донной части каверны подразделяется на три равных части с повышенным уровнем пульсаций давления. Точно такая же картина складывается с поведением пульсаций давления в районе скругленной острой кромки каверны ниже по потоку.

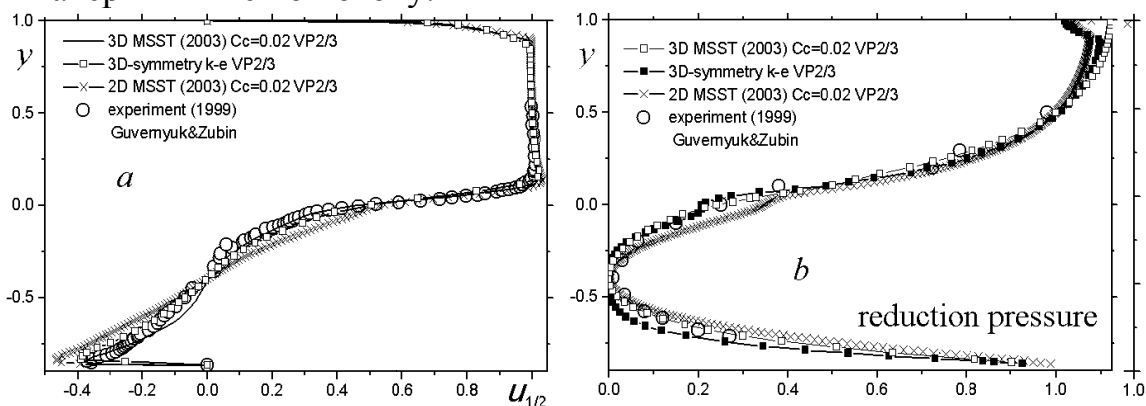


Рис.6 Сравнение расчетных и экспериментальных профилей скорости (a) и приведенного давления (b) в срединном сечении круговой каверны

Представленные на рис.6 результаты расчетов профилей горизонтальной скорости по двумерной и трехмерной модели RANS и URANS с использованием различных моделей турбулентности с учетом и без учета поправки на кривизну линий тока удовлетворительно согласуются с экспериментом. Однако более детальное рассмотрение зоны сдвигового слоя показывает, что некоторое преимущество имеет URANS с MSST при выборе  $C_c=0,02$ .

4.6. Подход к моделированию конвективного теплообмена в пакетах круглых труб на основе табличного задания характеристик неоднородных сред с переменными физическими свойствами типа масел (масло M20 и трансформаторное масло) верифицируется при сравнении численных прогнозов гидравлических потерь, суммарных и локальных тепловых потоков с экспериментальными данными Жукаускаса.

4.7. Задание входных граничных условий в пристеночном набегающем потоке - замена фиксированных граничных условий, вызывающих скачки давления, на решения погранслойных задач. Обоснование приемлемости периодических граничных условий и предельных характеристик проводится на задаче о вихревой интенсификации теплообмена в узких каналах с однорядным пакетом (плотностью 0,49) траншейных лунок (глубиной 0,2) при их расположении лесенкой ( $Re=2 \times 10^4$ ).

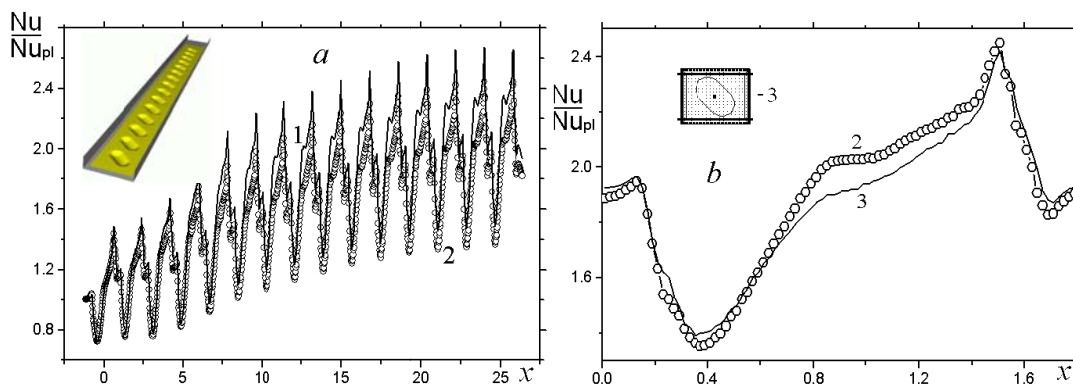


Рис.7 Осредненные по полосе с лунками относительные тепловые нагрузки в продольном направлении для пакета из 15 овальных лунок для однородного (1) и полностью развитого (2) профиля на входе (a), а также для периодического модуля (3) и ареала 14-ой овальной лунки

Рассматриваются два варианта с постановкой на входе в канал профиля однородного потока с толщиной пограничного слоя 0,15 и профиля полностью развитого течения в канале (рис.7, a). При различных входных потоках наблюдается мультипликативный эффект роста коэффициента теплоотдачи по продольной координате, причем имеет место насыщение к 12,13 лункам. Для выбранной 14 лунки, для которой теплогидравлические характеристики стабилизируются, суммарная теплоотдача оказывается вдвое выше, чем для гладкого канала при примерно таком же приросте гидравлических потерь. Распределения относительных тепловых нагрузок в ареале лунки довольно близко согласуются с аналогичными данными для периодического модуля (рис.7, b).

В пятой главе обсуждаются фундаментальные проблемы, решаемые с помощью МВТ: интенсификация теплообмена на луночных рельефах и управление обтеканием тел с помощью встроенных вихревых ячеек. Обосновываются новые формы поверхностных вихрегенераторов в виде отличных от сферических овальных лунок. Дается оценка влияния отсоса на обтекание тел с вихревыми ячейками в широком диапазоне углов атаки, чисел Рейнольдса и Маха с акцентом на анализ кризисных явлений.

5.1. Численное исследование физического механизма смерчевой интенсификации теплообмена при обтекании траншейных и луночных рельефов исследуется с 1992 г. Здесь анализируются “ударные” результаты, которые получены преимущественно методами численного моделирования.

- *Струйно-вихревая природа интенсификации теплообмена.* Идентификация струйно-вихревых структур пространственных отрывных течений, проведенная методами компьютерной визуализации в пристеночном слое около сферической лунки [6,7,10-16,56,63], выявила самоорганизацию на ее боковых склонах смерчеобразных струй, взаимодействующих с образованием симметричной картины с двумя вихревыми ячейками или несимметричной структуры с формированием моносмерчевого режима течения в лунке. Смерчеобразные закрученные струйные потоки начинаются

в особых точках типа фокус на картине растекания жидкости по криволинейной стенке.

- *Карты режимов.* Формирующиеся режимы обтекания лунки и совокупности лунок определяются большим количеством геометрических и режимных параметров, основными из которых в случае сферической лунки являются ее глубина, радиус скругления кромки, радиус кривизны образующей контура (в долях диаметра “пятна”), высота и ширина канала, число Рейнольдса, степень и масштаб турбулентности внешнего потока. Таким образом, задача проектирования рационального по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению рельефа является многопараметрической. В [18,19] анализируется влияние вязкости и глубины сферической лунки на структуру ее обтекания.

- *Бифуркация вихревой структуры течения и скачкообразный прирост теплоотдачи в ареале глубокой сферической лунки.* Один из замечательных результатов численного моделирования связан с обнаружением перестройки картины отрывного течения от симметричной к моносмерчевой при увеличении глубины сферической лунки [20-21], обуславливающей скачкообразный рост теплоотдачи внутри лунки и в следе за ней.

- *Обоснование теплогидравлической эффективности сферической лунки на стенке узкого канала.* Особенность лунок как вихревых интенсификаторов теплообмена состоит в том, что они не приводят к заметному росту гидравлических потерь. Для узкого канала показано, что теплоотдача от ареала со сферической лункой возрастает темпом, опережающим увеличение гидравлических потерь, т.е. их теплогидравлическая эффективность больше единицы (на 16%) [28].

- *Эффект синхронизации вихрей в пристеночном слое около рельефа из упорядоченных лунок.* Анализ картин растекания жидкости по стенке с пакетом упорядоченных лунок указывает на согласованность вихревых структур в пристеночном слое, причем по мере увеличения луночных рядов наблюдается мультипликационный эффект нарастания теплоотдачи [25,26, 59].

- *Конструирование траншейных лунок, обладающих повышенной теплоотдачей по сравнению со сферическими аналогами.* Поскольку моносмерчевые режимы обтекания глубоких сферических лунок оказываются предпочтительными по теплоотдаче от стенки, сконструированы формы лунок, генерирующих такие вихревые структуры. В [51] предлагаются овальные лунки, представляющие две разнесенные половинки сферической лунки, соединенные цилиндрической вставкой. Помимо длины вставки  $L$  вводится еще один геометрический параметр – угол наклона продольной оси лунки по отношению к набегающему потоку  $\varphi$ . Таким образом, расширяется набор параметров для оптимизации луночных рельефов. В [53,62] показано, что овальные лунки имеют значительные преимущества перед сферическими аналогами по тепловой и теплогидравлической эффективности. В отличие от сферических овальные

лунки, расположенные на стенке узкого микроканала способны интенсифицировать теплообмен примерно на 10%, причем за счет снижения гидравлических потерь теплогидравлическая эффективность возрастает еще выше – до 13%.

- *Тепловое проектирование луночных рельефов. Их предельные характеристики.* Тепловое проектирование луночных рельефов предлагается проводить на основе использования зигзагообразных овальных лунок со сглаженными краями [51]. Анализируются предельные теплогидравлические характеристики при рассмотрении периодического расчетного модуля, на границах которого задаются периодические граничные условия.

- *Вихревая интенсификация теплообмена в неоднородных средах.* Расчет теплообмена в периодическом модуле высотой 0,5, шириной 2 и длиной 1,5 (в долях диаметра пятна лунки глубиной 0,2) показал, что использование масляных сред в качестве теплоносителей в сочетании со сферическими лунками способствует интенсификации теплообмена в микроканалах, в то время как в воздушной среде они практически неэффективны (рис.8).

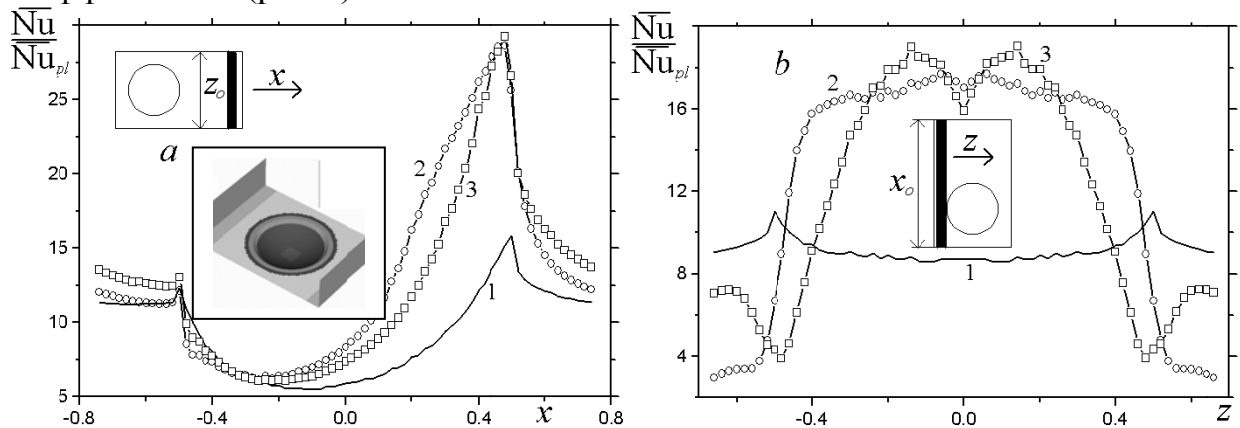


Рис.8 Отмасштабированные зависимости осредненных по полосам  $Nu/Nu_{pl}$  в продольном (а) и поперечном (б) направлениях. 1 – воздух ( $\times 10$ ); 2 – ТМ ( $\times 2$ ); 3 – М20.  $Re=308$

Для воздуха прикромочные полосы дают наибольший вклад в интенсификацию теплообмена, в то время, как центральная зона в пределах лунки обладает пониженным по сравнению с плоской стенкой теплосъемом. Для масел, напротив, центральная зона участка, содержащая сферическую лунку, ответственна за повышенные относительные тепловые нагрузки (8 раз – для ТМ и примерно 17 – для М20) [52,55,62].

5.2. Развитие МВТ и пакета VP2/3 в значительной мере обязано успешной разработке новой концепции управления обтеканием тел [12,13].

- *Идея вихревой ячейки.* Под вихревой ячейкой (ВЯ) в рамках обобщенной концепции понимаются каверны, траншеи, лунки, зазоры между разновеликими телами, в том числе с вмонтированными в них центральными телами. Рассматриваются как пассивные, так и активные ВЯ, в последних из которых на циркулирующий в ячейках поток оказывается энергетическое



воздействие (с помощью отсоса или движения части омываемого контура, в том числе вращения центрального тела [17]).

- *Способы интенсификации возвратного течения в ВЯ.* Топологически формализована конфигурация ВЯ с заданным эллиптическим контуром и вписанным в него центральным телом (ЦТ), форма которого может быть согласованной и несогласованной с выбранным контуром ячейки. Центральное тело служит для реализации механизма интенсификации циркулирующего в ячейке потока, при этом используется либо хорошо известный способ распределенного по поверхности отсоса, либо в случае цилиндрического тела его закрутка с постоянной угловой скоростью. Центральное тело может быть изъято и тогда интенсификация потока в ячейке производится за счет сосредоточенного (щелевого) отсоса или теоретически с помощью движения участка контура. В качестве параметра воздействия на циркулирующий поток выбирается скорость отсоса или при вращении ЦТ касательная скорость на поверхности цилиндра в долях скорости набегающего потока, а в качестве интегрального управляющего фактора выступает коэффициент расхода  $C_q$ , обезразмеренный по характерным масштабам скорости и длины.

- *Учет энергетического воздействия.* Эффективность энергозатратного метода управления обтеканием тел с помощью ВЯ оценивается с помощью введения дополнительного сопротивления, определяемого мощностью, потребной для реализации распределенного или сосредоточенного отсоса, а также вращения ЦТ.

- *Размещение ВЯ на объекте.* ВЯ монтируется в выбранном объекте (в качестве теста рассмотрен цилиндр при симметричном режиме обтекания). ВЯ может быть несколько. Их размеры подбираются эмпирически, хотя они составляют малые доли от характерных масштабов тел. К геометрическим параметрам ВЯ добавляются размеры окна и координаты его центра на контуре тела, а также радиусы скругления переходов от контура ячейки к образующей тела. Таким образом, формируется омываемая поверхность тела с криволинейными пазами – ВЯ. ВЯ целесообразно располагать в окрестности мест отрыва на контуре тела. Цель функционирования системы ВЯ – изменение картины обтекания тела и, как следствие, улучшение его аэродинамических характеристик.

- *Физический механизм управления с помощью ВЯ.* Пассивные ВЯ неэффективны. Максимальная скорость возвратного потока в них не превышает 50% от скорости невозмущенного потока. В активных ВЯ скорость циркулирующего потока одного порядка и выше скорости внешнего течения.

- *Снижение лобового сопротивления тел с ВЯ.* Расположение активных ВЯ на контуре кругового цилиндра позволяет уменьшить длину отрывной зоны в следе и снизить лобовое сопротивление вдвое. Скругление задней острой кромки контура ВЯ способно уменьшить его величину примерно на 10%.

- *Увеличение подъемной силы и повышение аэродинамического качества.* Для толстых профилей, характерных для летательных аппаратов интегральной компоновки (ЭКИП), расположение на тыльной стороне системы активных ВЯ приводит к практически безотрывному их обтеканию.  $C_y$  достигает величин порядка 2,5, а аэродинамическое качество превышает 20. Обнаружен эффект суперциркуляции, т.е. создания дополнительной подъемной силы непосредственно в ВЯ.

- *Сравнение толстых профилей.* Обнаружена эквивалентность по аэродинамическому качеству (порядка 20) толстого профиля аппарата ЭКИП и равного по толщине геттингеновского профиля при одинаковом коэффициенте расхода отсасываемого в вихревых ячейках воздуха ( $C_q$  порядка 0,02).

- *Влияние угла атаки.* Для толстого профиля с вихревыми ячейками достигнут высокий уровень коэффициента подъемной силы –  $C_y > 1$  в широком диапазоне углов атаки от  $-30^\circ$  до  $25^\circ$ .

- *Влияние сжимаемости.* Показано существование критических чисел Маха набегающего потока, при которых наблюдаются кризисные явления при обтекании тел с вихревыми ячейками [44,47].

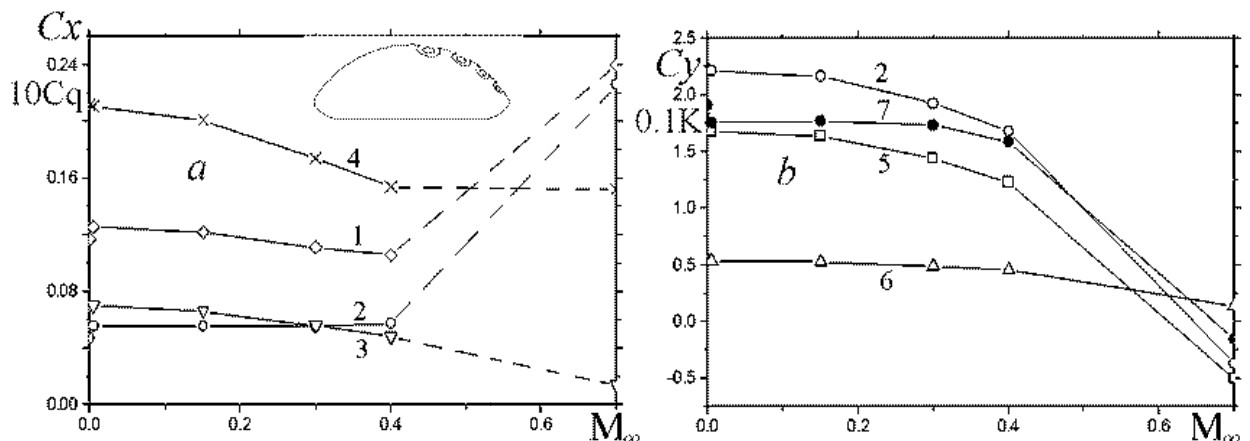


Рис.9 Зависимость коэффициентов сопротивления (а) и подъемной силы (b) и их компонентов для профиля ЭКИП, аэродинамического качества (b) и коэффициента расхода (а) от  $M_\infty$ . 1-  $C_{xint}$ ; 2 -  $C_x$ ;  $C_y$ ; 3 -  $C_{xadd}$ ; 4 -  $10 \times C_q$ ; 5 -  $C_{ypri}$ ; 6 -  $C_{ycell}$ ; 7 -  $0,1 \times K$

Эффект двукратного снижения лобового сопротивления кругового цилиндра с вихревой ячейкой при коэффициенте расхода  $C_q$  отсасываемого в ней воздуха 0,015 оказывается ограниченным критическим числом Маха 0,5. Расширить диапазон критических чисел Маха  $M_\infty$  оказалось возможным за счет роста  $C_q$  до величины 0,05, хотя эффективность управления обтеканием существенно уменьшается (примерно до 25%). Обнаружено, что работоспособность вихревых ячеек на толстом профиле также ограничена числом Маха порядка 0,5 (рис.19).

В **шестой главе** рассматриваются прикладные задачи внешней и внутренней аэромеханики и теплообмена, в решении которых МВТ играет существенную роль: а) разработка упрощенных инженерных моделей, инкорпорированных в поля течения (условия на колесе ветроустановки, учет

поршневого эффекта при движении автомобиля в тоннеле) [31,58]; б) синтез мезомасштабных моделей аэродинамики окружающей среды в приложении к проблемам вентиляции автомобильных тоннелей и оценки нагрузок на высотные сооружения [57]; в) численное моделирование процессов вентиляции в кабинах и салонах ЛА [32,41,59-61].

Приведен пример решения мезомасштабной прикладной задачи - трехмерное нестационарное ветровое обтекание комплекса зданий микрорайона в рамках конечно-объемного решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (URANS). В качестве модели замыкания выбирается MSST. За характерный линейный размер была принята величина  $L=50$  м. Характерная площадь равна площади вертикального сечения здания, выполненного параллельно его стороне. Таким образом, число Рейнольдса рассчитанное для скорости 10м/с составило  $Re=3,5 \cdot 10^7$ . Предполагается, что при таких числах Рейнольдса течение автомодельно по числам Рейнольдса. Расчетная область имеет следующие размеры: до входной границы расстояние 500м, до выходной границы расстояние 1200м, до боковых границ 500м. Общее число расчетных точек в многоблочных сетках 1250000. На рис.10 показаны вихревые картины обтекания комплекса зданий при различных направлениях ветра. Обращает на себя внимание генерация мощных подковообразных вихрей, дополненных закрученными струйными потоками внутри микрорайона. Вихревая картина имеет сходные черты с обтеканием препятствия при наличии в нем вентиляционных каналов.

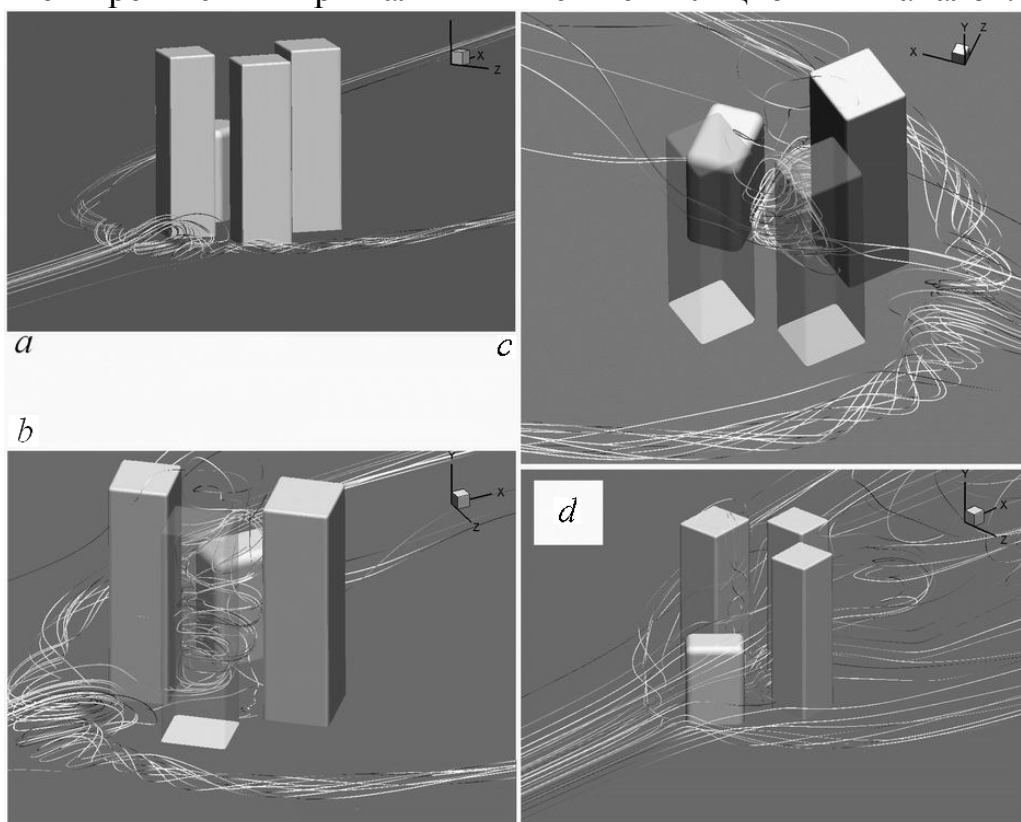


Рис.10. Вихревые картины обтекания комплекса зданий микрорайона при различных направлениях ветра: а, б - север-г; в – запад-восток; г – юго-восток – северо-запад

**Заключение** содержит выводы и обсуждение направлений развития. За последнее десятилетие решен широкий круг фундаментальных, прикладных и эксплуатационных задач вихревой аэрогидромеханики и теплофизики, собрана обширная библиотека специализированных моделирующих комплексов, имеющая общие каталоги математических моделей и методов решения уравнений с учетом разнообразных дифференциальных моделей турбулентности. Основанный на МВТ распараллеленный вычислительный комплекс VP2/3 может быть положен в основу при разработке пилотного образца универсального пакета открытого типа – отечественного аналога международного пакета OPEN FOAM – для решения задач аэрогидромеханики и теплофизики.

### **ВЫВОДЫ**

1. **Разработана и реализована концепция** специализированного пакета открытого типа, предназначенного для решения сложных задач аэрогидромеханики и вихревого теплообмена и основанного на выделении ядра - решателя с набором определяющих режимных и схемных параметров, а также приложений - библиотеки задач.

2. **Базовая расчетная методология развивается** с 80-х гг прошлого века и основывается на концепции расщепления по физическим процессам - последовательном поблочном решении методом глобальных итераций линеаризованных исходных уравнений (NS - Навье-Стокса и/или U(RANS) осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с замыканием последних дифференциальной моделью турбулентности), записанных в приращениях зависимых переменных (естественных переменных) в криволинейных косоугольных координатах. Развита обобщенная процедура коррекции давления (SIMPLEC) для несжимаемых и сжимаемых течений с введением на неразнесенных сетках с расположением параметров в центрах ячеек (структурированных и неструктурированных) регуляризатора Рхи-Чоу с определенным на основе тестовых расчетов коэффициентом релаксации, равным 0,1. Используется стандартный каталог рабочих сред с постоянными свойствами, таких как, например, воздух, вода, расширяется на случай сред с переменными свойствами, заданными в табличном виде, таких, как различные масла (трансформаторное масло, масло M20).

3. **Предложены, верифицированы и применены оригинальные многоблочные вычислительные технологии (МВТ)**, базирующиеся на решении управляющих уравнений по описанной в п.2 методологии, основанные на использовании разномасштабных пересекающихся и ярусных структурированных сеток сравнительно простой топологии. Подход позволяет отобразить с надлежащей точностью разномасштабные структурные элементы рассматриваемых течений вязкого газа и жидкости, причем, хорошо улавливаются зоны высоких градиентов определяющих параметров, а также он существенно экономит вычислительные ресурсы и практически снимает проблему построения криволинейных сеток сложной

топологии, характерную для практически всех пакетов. Показано, что по точности MBT эквивалентны адаптивным сеткам.

4. **Разработан, верифицирован и применен** основанный на MBT и не уступающий "тяжелым" пакетам типа FLUENT, CFX, OPEN FOAM специализированный комплекс VP2/3 (скорость-давление, двумерная и трехмерная версия) аэрогидродинамического и теплофизического профиля, нацеленный на численное моделирование многомерных отрывных стационарных и нестационарных, ламинарных и турбулентных, внутренних и внешних течений вязкой несжимаемой жидкости и вязкого сжимаемого газа, а также конвективного теплообмена в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса (от 40 до  $10^7$ ), Маха (от 0 до 4) и Прандтля (от 0,7 до 15000), в том числе со скачками уплотнения.

5. **Обоснована модификация модели турбулентности переноса сдвиговых напряжений MSST**, учитывающая влияние кривизны линий тока в рамках подхода Роди-Лещинера-Исаева с выбранной при решении тестовых задач константой  $C_s=0,02$  в зависимости коэффициента турбулентной вязкости от турбулентного числа Ричардсона. При сравнительном анализе полуэмпирических дифференциальных моделей турбулентности (в том числе, переноса сдвиговых напряжений MSST Менстера, как стандартных (1993 и 2003 гг), так и модифицированных с учетом поправки на кривизну линий тока (MSST подход Менстера-Смирнова) и вихревой вязкости SA Спаларта-Аллмареса (с поправкой Спаларта-Шура) доказана приемлемость этой модели для расчета до-и сверхзвуковых отрывных течений с теплообменом при решении широкого спектра тестовых двумерных и трехмерных задач. Результаты расчетов сопоставлены с аналогичными численными прогнозами, полученными с использованием пакета Fluent с набором различных полуэмпирических моделей турбулентности, и с экспериментальными данными Жукаускаса, Мартинуццы, Кастро, Гувернюка и Зубина, Михалева и др. на экспериментальных установках ЦАГИ, ИМех МГУ, ФТИ им.А.Ф. Иоффе, университета в Саутгемптоне и др. **Доказана приемлемость подхода URANS** для расчета периодических отрывных течений и вихревого теплообмена. Распространена на пространственный случай и верифицирована оригинальная трактовка временных периодических процессов вихреобразования на основе осреднения полей, рассчитанных на периоде колебаний составляющей интегральной нагрузки. **Обобщены на пространственный случай и численно верифицированы** оригинальные процедуры коррекции градиента давления и среднемассовой температуры при использовании периодических граничных условий на примере вихревого теплообмена в узком канале с однорядными лунками. **Разработаны и численно обоснованы** оригинальные подходы к заданию входных граничных условий в набегающем потоке на основе предварительного решения параболизированных уравнений, позволяющие избежать скачков в поле давления, характерных для фиксированных профилей скорости.

6. Основанный на МВТ пакет VP2/3 позволил получить ряд фундаментальных и практических результатов:

а) **впервые обнаружен эффект 4,5** - кратного увеличения теплоотдачи в узком канале с нанесенными однорядными сферическими лунками при использовании масляного теплоносителя;

б) **обосновано преимущество овальных лунок** по сравнению со сферическими аналогами при вихревой интенсификации теплообмена в микро- и макроканалах с нанесенными на стенки лунками.

в) **впервые численно исследован кризис сопротивления** толстого профиля (ЭКПП) с вихревыми ячейками при интенсификации циркулирующих в них потоков за счет отсоса. Критические числа Маха не превышают 0,4-0,5;

г) **построены зональные математические модели** течений вязкой жидкости и газа со встроенными упрощенными физическими моделями различных эффектов, позволяющие описывать сложные сопряженные задачи (поршневой эффект от движения автомобилей в тоннеле, работу ветрового колеса в диффузорном ускорителе и т. д.);

д) **синтезированы математические и дискретные мезомасштабные модели** динамики окружающей среды в приложении к прогнозированию ветрового воздействия на строительные сооружения, к расчетам вентиляции помещений с учетом турбулентных процессов, температурной стратификации в рамках многоблочных структурированных с наложением, частично подвижных сеток;

е) получены **важные результаты решения задач авиации, ветроэнергетики и транспорта** (расчеты вентиляции пассажирских салонов самолетов эксплуатируемых (Ту-204, Ту-214, Ил-96) и перспективных (SSJ, MC-21), элементов автодорожных тоннелей (Лефортовский и Краснопресненский тоннели).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Усачов А.Е. Интегральный и численный методы расчета неизотермических турбулентных струй в спутном потоке // Промышленная аэродинамика. М.: Машиностроение, 1987. Вып. 34. - с.161-171.
2. Усачов А.Е. Численное моделирование турбулентного течения вблизи вынужденно и свободно колеблющихся призматических цилиндров // Препринт ЦАГИ. 1991. №24. - 12с.
3. Усачов А.Е. Численное моделирование осесимметричных струй с использованием дифференциальной модели турбулентности // Промышленная аэродинамика. М.: Машиностроение, 1991. Вып. 36. - с.124-132.
4. Исаев С.А., Усачов А.Е. Численное моделирование отрывных течений в задачах внутренней аэродинамики // Промышленная аэродинамика. М.: Машиностроение, вып.4(36). 1991. - с. 43-75.
5. **Усачов А.Е. Моделирование турбулентного течения вблизи вынужденно и свободно колеблющихся прямоугольных призм // Изв. РАН. Сер. механика жидкости и газа, 1995. №1. - с.45-50.**
6. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачов А.Е. Численное исследование вихревого механизма интенсификации теплообмена в окрестности поверхности с лункой // Труды

- III Минского Международного Форума “Тепло-массообмен-ММФ-96”: Т.1. Конвективный теплообмен. Ч.1. 1996. - с.33-36.
7. **Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачов А.Е. Методологические аспекты численного моделирования динамики вихревых структур и теплообмена в вязких турбулентных течениях// Известия РАН. Энергетика, 1996. №4. - с.140-148.**
  8. Chetverushkin B.N., Isaev S.A., Usachov A.E. Numerical analyses of the effects of drag reduction and head stability for bluff bodies with organized flow separation // Proceedings of 7th Int. Conf. Computational Fluid Dynamics, Beijing, China, Sept.15-19, 1997. - p.667-672.
  9. Исаев С.А., Усачов А.Е., Четверушкин Б.Н. Некоторые проблемы решения задач аэродинамики конечно-разностными методами на параллельных вычислительных системах // Препринт ЦАГИ, №101, М.: ЦАГИ, 1997. - 9с.
  10. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачов А.Е., Фролов Д.П. Численное моделирование ламинарного пространственного обтекания лунки потоком вязкой несжимаемой жидкости (Вихревая динамика и теплообмен)// Препринт Института высокопроизводительных вычислений и баз данных, СПб.: 1997, №6. - 22с.
  11. **Исаев С.А., Леонтьев А.И. Усачов А.Е. Численное исследование механизма вихревой интенсификации теплообменных процессов в окрестности поверхности с лункой // Инженерно-физический журнал, 1998. Т.71. №3. - с.484-490.**
  12. Isaev S.A., Baranov P.A., Usachov A.E., Frolov D.P. Numerical identification of two- and three dimensional organized vortex structures // Proceedings of 8th Int. Symposium on Flow Visualization, Sorrento, Sept. 1-4, 1998. - p.217.1-217.8.
  13. Isaev S.A., Baranov P.A., Usachov A.E., Frolov D.P. Numerical analysis of two - and three dimensional organized vortex structures // Proceedings of Fourth ECCOMAS CFD Conf. Athens, Greece, September 7-11, 1998. Vol.1. Pt.2. - p.768-774.
  14. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачов А.Е., Фролов Д.П. Численное исследование струйно-вихревого механизма интенсификации теплообмена в окрестности сферической лунки на плоскости при обтекании ее потоком несжимаемой вязкой жидкости с учетом влияния асимметрии формы, естественной конвекции и нестационарных процессов // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: МЭИ, 1998. - с.121-124.
  15. **Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачов А.Е., Фролов Д.П. Идентификация самоорганизующихся струйно-вихревых структур при численном моделировании ламинарного течения и теплообмена в окрестности несимметричной уединенной лунки // Известия РАН. Энергетика, 1999. №2. - с.126-136.**
  16. Усачов А.Е., Исаев С.А., Четверушкин Б.Н., Леонтьев А.И. Численный анализ влияния крупномасштабных вихревых структур на характеристики ламинарных и турбулентных течений // Актуальные проблемы акустики, гидродинамики и промышленной аэродинамики. Труды ЦАГИ, 1999. Вып. №2634. - с.375-382.
  17. **Баранов П.А., Исаев С.А., Усачов А.Е. Численный анализ влияния вращающихся кормовых цилиндров на нестационарный след за удлиненным телом // Инженерно-физический журнал, 2000. Т.73. №3. - с.606-613.**
  18. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А., Усачов А.Е. Численное исследование смерчевой интенсификации теплообменных процессов при обтекании рельефов с вогнутостями // Труды IV Минского международного форума по теплообмену (22-26 мая 2000г.). Т.1. Конвективный теплообмен, 2000. - с.507-514.
  19. Isaev S.A., Leontiev A.I., Usachov A.E. Numerical simulation of essential features of three-dimensional separated flows // Proceedings of 4<sup>th</sup> Asian Computational Fluid Dynamics Conference. September 18-22, 2000 Mianyang, China. - p.12-14.

20. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А., Усачов А.Е. Бифуркация вихревого турбулентного течения и интенсификация теплообмена в лунке // Доклады РАН. 2000, Т.373. №5. - с.615-617.
21. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А., Метов Х.Т., Усачов А.Е. Численный анализ влияния вязкости на вихревую динамику при ламинарном отрывном обтекании лунки на плоскости с учетом ее асимметрии // Инженерно-физический журнал, 2001. Т.74. №2. - с.62-67.
22. Исаев С.А., Пышный И.А., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Верификация многоблочной вычислительной технологии при расчете ламинарного и турбулентного обтекания сферической лунки на стенке канала // Инженерно-физический журнал, 2002. Т.75. №5. - с.122-124.
23. Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Расчет нестационарного обтекания кругового цилиндра в рамках многоблочных вычислительных технологий // Инженерно-физический журнал, 2002. Т.75. №5. - с.115-121.
24. Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Численное моделирование нестационарного турбулентного обтекания автомобильного профиля вблизи подвижного экрана // Инженерно-физический журнал, 2002. Т.75. №6. - с.94-99.
25. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Баранов П.А., Пышный И.А., Усачов А.Е. Численный анализ вихревой интенсификации теплообмена в канале с пакетом глубоких сферических лунок на одной из стенок // Доклады РАН, 2002. Т.386. №5. - с.621-623.
26. Isaev S.A., Baranov P.A., Leontiev A.I., Usachov A.E. Numerical investigation of tornado enhancement of heat and mass exchange processes in flow past projections in concave surfaces // Heat Transfer Research, 2002. Vol.33. N1-2. - p.47-55.
27. Исаев С.А., Пышный И.А., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Численное моделирование организованных и самоорганизованных отрывных течений в рамках многоблочных вычислительных технологий // В кн.: Международная научно – практическая конференция "Третьи Окуневские чтения". Материалы докладов. В 2 томах. Т. 1. Баллистика.- СПб.: БГТУ, 2002. - с. 204 -208.
28. Исаев С.А., Пышный И.А., Харченко В.Б., Усачов А.Е. Численное моделирование смерчевого теплообмена на рельефах с лунками // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: МЭИ, 2002. - с.110-113.
29. Исаев С.А., Пышный И.А., Снегирев А.Ю., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Многоблочные вычислительные технологии решения фундаментальных, прикладных и эксплуатационных задач энергетики и транспорта // Научный Вестник Академии гражданской авиации. Серия: Проблемы безопасности полетов и эксплуатации воздушного транспорта / Под ред. Г.А.Крыжановского и Е.А.Куклева, 2003. №1. - с.50-58.
30. Баранов П.А., Жданов В.Л., Исаев С.А., Харченко В.Б., Усачов А.Е. Численное моделирование нестационарного ламинарного обтекания кругового цилиндра с перфорированным кожухом // Известия АН. Механика жидкости и газа, 2003. №2. - с.44-55.
31. Исаев С.А., Баранов П.А., Усачов А.Е., Митрофович В.В., Колосов А.Д., Пономарев М.В. Численное моделирование турбулентного течения внутри ветродвигателя с учетом сил на рабочем колесе // Инженерно-физический журнал, 2003. Т.76. №6. - с.45-48.
32. Усачов А.Е. Численное моделирование турбулентного течения воздуха при вентиляции пассажирского салона самолета // Сборник статей по аэродинамике малых скоростей и промышленной аэродинамике. 85 лет ЦАГИ, 2003. - с.73-84.



33. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Усачов А.Е. Анализ вихревого теплообмена при обтекании траншеи на плоскости с помощью многоблочных вычислительных технологий и различных полуэмпирических моделей турбулентности // *Инженерно-физический журнал*. 2004. Т.77. №6. С.152-161.
34. Исаев С.А., Лысенко Д.А., Усачов А.Е., Харченко В.Б. Многоблочные вычислительные технологии решения задач гидравлики и аэромеханики // *Гидравлика (наука и дисциплина): Материалы науч.-теор.конф.* СПб: СПбГПУ, 2004. - с.105-107.
35. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии решения задач гидравлики и аэромеханики // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, 2005. №1(39). - с.48-59.
36. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачов А.Е. Моделирование ламинарного циркуляционного течения в квадратной каверне с подвижной границей при высоких числах Рейнольдса с помощью пакетов VP2/3 и FLUENT // *Инженерно-физический журнал*, 2005. Т.78. №4. - с.163-179.
37. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачов А.Е. Сравнительный анализ пакетов VP2/3 и FLUENT при расчете нестационарного обтекания кругового цилиндра с использованием моделей турбулентности Спаларта-Аллмареса и Ментера // *Инженерно-физический журнал*, 2005. Т.78. №6. - с.148-162.
38. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачов А.Е. Комплексный анализ моделей турбулентности, алгоритмов и сеточных структур при расчете циркуляционного течения в каверне с помощью пакетов VP2/3 и FLUENT. Часть 1. Влияние схемных факторов // *Теплофизика и аэромеханика*, 2005. Т.12. №4. - с.587 – 608.
39. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Лысенко Д.А., Усачов А.Е. Комплексный анализ моделей турбулентности, алгоритмов и сеточных структур при расчете циркуляционного течения в каверне с помощью пакетов VP2/3 и FLUENT. Часть 2. Оценка адекватности моделей // *Теплофизика и аэромеханика*, 2006. Т.13. №1. - с.63 – 73.
40. Баранов П.А., Исаев С.А., Леонтьев А.И., Усачов А.Е. Численное моделирование снижения аэродинамического нагрева рельефа со сферическими и сотовыми лунками при сверх-и гиперзвуковых скоростях // *Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена.* М.: Издательский дом МЭИ, 2006. - с. 158 – 161.
41. Усачов А.Е., Королев Е.Г., Исаев С.А., Баранов П.А. Расчет вентиляции открытых проемов автодорожных тоннелей на базе методов численного моделирования // *Метро и тоннели*, 2006. №6. - с. 46-48.
42. Isaev S.A., Kharchenko V.B., Mikhalev A.N., Snegirev A.Yu., Usachov A.E. Numerical simulation of turbulent separated flows in the framework of multiblock computational technologies // *Proceedings of XIII Int. Conf. on Methods of Aerophysical Research.* Novosibirsk, 2007. Part 1. - p.118 – 123.
43. Исаев С.А., Михалев А.Н., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Моделирование турбулентного обтекания каплевидного тела с конической юбкой // *Журнал технической физики*. 2007. Т.52. №8. С.29-35.
44. Баранов П.А., Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Численное моделирование турбулентного обтекания вязким газом цилиндра с круговой вихревой ячейкой при отсосе с поверхности центрального тела // *Известия АН. Механика жидкости и газа*, 2007. №6. - с.34-45.
45. Исаев С.А., Баранов П.А., Кудрявцев Н.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Харченко В.Б. 10-летний опыт развития многоблочных вычислительных технологий в пакете VP2/3 применительно к решению задач аэрогидромеханики и теплообмена // *Актуальные*

- аспекты физико-механических исследований. Механика. Киев, Наук. Думка, 2007. - с.116-134.
46. Isaev S.A., Sudakov A.G., Usachov A.E., Baranov P.A. Numerical simulation of sub-, trans- and supersonic flow around bodies with vortex cells in the framework of multiblock computational technologies // Proceedings of West-East High Speed Flow Field Conf., Moscow, 2007. - 6p.
  47. **Исаев С.А., Баранов П.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Численный анализ влияния сжимаемости на турбулентное, симметричное обтекание вязким газом цилиндра с круговой вихревой ячейкой // Инженерно-физический журнал, 2008. Т.81. №2. - с.330-337.**
  48. **Жукова Ю.В., Исаев С.А., Липницкий Ю.М., Усачов А.Е. Численный анализ механизма снижения лобового сопротивления катящегося колеса при организации впереди него кругового вихря // Инженерно-физический журнал, 2008. Т.81. №3. - с. 475-479.**
  49. Баранов П.А., Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Ретроспективный анализ десятилетней разработки многоблочных вычислительных технологий в пакете VP2/3 теплофизического и гидродинамического профиля // Труды 6 Минского Международного Форума по Тепло- и Массообмену. Минск, 2008. Т.1. 10с (лазерный диск).
  50. Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Моргунов В.Н. Проблемы и тенденции развития вычислительных технологий для решения задач аэромеханики // Сб. материалов Всероссийской НТК «Фундаментальные основы баллистического проектирования». СПб: БГТУ, 2008. Т.2. - с.118-119.
  51. Баранов П.А., Исаев С.А., Клюева О.Г., Усачов А.Е. Анализ вихревой интенсификации теплообмена в узком канале с однорядными овальными лунками // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Материалы третьей Международной конференции, М.: МЭИ, 2008. Рег. № 0320802185. Секция 3. Теплообмен и гидродинамика для поверхностей с луночными рельефами. Доклад №17, - 17с.
  52. Исаев С.А., Готовский М.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Интенсификация теплообмена при ламинарном движении неоднородных сред в узких каналах со сферическими лунками // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Материалы третьей Международной конференции, М.: МЭИ, 2008. Рег. № 0320802185. Секция 3. Теплообмен и гидродинамика для поверхностей с луночными рельефами. Доклад №13. - 8с.
  53. Исаев С.А., Леонарди Э., Тимченко В., Усачов А.Е. Вихревая интенсификация теплообмена в микроканалах с овальными лунками // Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Материалы третьей Международной конференции, М.: МЭИ, 2008. Рег. № 0320802185. Секция 4. Термогидродинамика на микро- и наномасштабах. Доклад №10. - 10с.
  54. **Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Усачов А.Е., Стрижак С.В., Лоханский Я.К., Гувернюк С.В. Разработка, верификация и применение основанного на многоблочных вычислительных технологиях распараллеленного пакета открытого типа VP2/3 для решения фундаментальных, прикладных и эксплуатационных задач аэромеханики и теплофизики // Вестник ЮУрГУ. Серия "Математическое моделирование и программирование", 2009. № 17 (150). Вып. 3. - с. 59-72.**
  55. **Исаев С.А., Леонтьев А.И., Готовский М.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Интенсификация теплообмена при ламинарном движении неоднородных сред в узких каналах со сферическими лунками // Тепловые процессы в технике, 2009. №3. - с.82-88.**
  56. **Исаев С.А., Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Можайский С.А., Усачов А.Е. Численный анализ влияния физической вязкости на вихревой**

- теплообмен при ламинарном и турбулентном обтекании нагретой пластинки с неглубокой сферической лункой // Инженерно-физический журнал, 2009. Т.82. №5. - с.847-857.**
57. Егорычев О.О., Исаев С.А., Гувернюк С.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Разработка и применение многоблочных вычислительных технологий и мезомасштабных моделей окружающей среды для решения задач строительной аэродинамики // Сб. трудов Второй научно-практической конференции «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы», М., МГСУ, 2009. - с.127-138.
58. Виноградов Е.С., Грибков С.В., Маслов Л.А., Митрофьевич В.В., Онин А.Ю., Павлихин Д.С., Усачов А.Е. Исследования энергетических характеристик ветроэнергетической установки аэродинамической трубе // Труды ЦАГИ. Промышленная аэродинамика, 2009. Вып. 2684. - с. 44-51.
59. Усачов А.Е., Исаев С.А., Баранов П.А. Численное моделирование течения воздуха при вентиляции отдельных участков автодорожных тоннелей //Труды ЦАГИ. Промышленная аэродинамика. 2009. Вып. 2684. С. 26-35.
60. Усачов А.Е. Исследование вентиляции пассажирских салонов современных самолетов на базе методов численного моделирования турбулентных течений // Полет, М.: Машиностроение, 2009. №11. - с.39-43.
61. **Усачов А.Е. Численное исследование системы вентиляции пассажирского салона перспективного самолета // Ученые записки ЦАГИ, 2009. Т. XL. №4. - с.56-62.**
62. **Isaev S.A., Leonardi E., Timchenko V., Usachov A.E. Vortical investigation of heat transfer in microchannels with oval dimples // Heat Transfer Research. 2010, Vol. 41. No. 4. - p. 413-424.**
63. Исаев С.А., Сапожников С.З., Митяков В.А., Митяков А.В., Можайский С.А., Усачов А.Е. Численное и физическое исследование влияния вязкости на конвективный теплообмен при обтекании сферической лунки умеренной глубины на плоской пластинке // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.2. Вынужденная конвекция однофазной жидкости, М.: Издательский дом МЭИ, 2010. - с.135-138.
64. **Исаев С.А., Липницкий Ю.М., Михалев А.Н., Панасенко А.В., Усачов А.Е. Моделирование сверхзвукового турбулентного обтекания цилиндра с соосными дисками // Инженерно-физический журнал, 2011. Т.84. №4. - с. 511-524.**
65. **Isaev S.A., Leontiev A.I., Zhukova Yu.V., Baranov P.A., Gotovskii M.A., Usachov A.E. Numerical simulation of vortex heat transfer enhancement in transformer oil flow in a channel with one-row spherical dimples // Heat Transfer Research, 2011. Vol. 42. Issue 7. - p. 613-628.**