

На правах рукописи



ЗАЙЦЕВ Дмитрий Кириллович

Численное решение задач гидрогазодинамики и теплообмена
с использованием блочно-структурированных сеток.

Программный комплекс SINF

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре гидроаэродинамики.

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор
Смирнов Евгений Михайлович

Официальные оппоненты:

Емельянов Владислав Николаевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Плазмогазо-
динамика и теплотехника» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова

Ткаченко Игорь Вячеславович,
доктор технических наук, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и
морской акустики СПбГМТУ

Усачов Александр Евгеньевич,
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
НИМК ЦАГИ

Ведущая организация:

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Защита состоится «15» июня 2016 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.13 на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корпус 1, ауд. _____.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.13
доктор технических наук, профессор



Григорьев Борис Семенович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена математическому (численному) моделированию разнообразных течений жидкости и газа в модельных конфигурациях и в условиях сложной геометрии реальных технических устройств. Для проведения расчетов в диссертации разработаны соответствующие математические модели и численные методы, которые реализованы в виде комплекса программ SINF (Supersonic-to-INcompressible Flows), ориентированного на решение широкого круга задач гидрогазодинамики и теплообмена. Помимо гидродинамического решателя (солвера), в состав программного комплекса (ПК) SINF входят средства для создания расчетных сеток, визуализации результатов расчета, их статистической обработки и др. Таким образом, ПК SINF имеет все атрибуты современного гидродинамического программного комплекса широкого профиля.

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В настоящее время необходимость численного моделирования течений жидкости и газа для самых разнообразных приложений не вызывает сомнений. В практику разработки многих современных высокотехнологичных устройств прочно вошли оптимизационные и поверочные гидродинамические расчеты, направленные на отработку аэродинамики конструкции, выявление источников потерь, анализ тепловых и механических нагрузок, определение эффективности, оценку работоспособности в нештатных ситуациях и т.д. Для проведения такого рода расчетов применяются как специализированные, так и универсальные гидродинамические (CFD) коды. Среди наиболее известных – пакеты Fluent и CFX компании ANSYS, пакеты Star-CD и Star-CCM+ компании CD-adapco, свободно распространяемый пакет OpenFOAM. Из отечественных разработок можно упомянуть пакеты FlowVision (компания ТЕСИС, г. Москва), ЛОГОС (РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров), Gas Dynamics Tool (GDT Software Group, г. Тула). Развитые гидрогазодинамические коды (преимущественно внутреннего использования) имеются также в ряде научных центров России; среди них – коды SigmaFlow, VP2/3, NTS, EWT, HSFLOW, CFS3D, NOISEtte, CABARET и др.

Двадцать лет назад, когда начиналась разработка ПК SINF, ситуация в области вычислительной гидродинамики была совершенно иной. Ни универсальных CFD кодов, ни генераторов сеток, ни развитых средств визуализации результатов гидродинамического расчета в России фактически не было. Ввиду весьма ограниченных вычислительных ресурсов была распространена практика решения задачи в упрощенной постановке (например, на основе параболизированных уравнений), часто с применением специальных систем координат и/или аналитических преобразований, отображающих расчетную область на прямоугольник. По сути, это означало разработку специальной численной схемы и отдельной компьютерной программы едва ли не для каждой конкретной проблемы. Ориентация ПК SINF на решение полных уравнений Навье-Стокса с использованием многоблочных структурированных сеток, а также наличие в составе комплекса необходимых средств пре- и пост-процессинга, позволили уже в

1990-е годы (т.е. до начала активного проникновения коммерческих CFD кодов в промышленные, научные и учебные центры России) оперативно и с высоким качеством решать широкий круг практических задач гидрогазодинамики и теплообмена в условиях реальной геометрии промышленных устройств. Это в немалой степени способствовало расширению сотрудничества с промышленными предприятиями и повышению доверия практиков к результатам гидродинамических расчетов, что в свою очередь давало стимул к дальнейшему совершенствованию и развитию ПК SINF, который в итоге занял достойное место в ряду известных в мире CFD кодов внутреннего использования. Вышеизложенное подтверждает актуальность и практическую востребованность представляемой работы.

Целями работы являются: разработка математических моделей, численных схем и алгоритмов, предназначенных для моделирования различных классов течений жидкости и газа, их реализация в виде комплекса программ SINF и решение с его помощью практических и методических задач гидрогазодинамики и теплообмена. Исходя из этого, в диссертации решены следующие основные **задачи**:

- разработка и внедрение в (исходно одноблочный) гидродинамический код SINF технологии проведения расчетов на многоблочных сетках;
- разработка программных средств для создания расчетных сеток и визуализации результатов расчета;
- внедрение в код SINF широкого спектра современных моделей турбулентности;
- отработка и совершенствование численных схем и алгоритмов для повышения эффективности кода, уточнения аппроксимаций, снижения требований к качеству расчетной сетки;
- разработка и внедрение дополнительных математических моделей и численных методов для расширения классов решаемых задач (нестационарные и сверхзвуковые течения, сопряженный теплообмен, двухфазные потоки, изменяемая геометрия расчетной области и др.);
- систематическое тестирование всех элементов математической модели ПК SINF путем сравнения результатов решения модельных задач с аналитическими решениями, с результатами расчетов других авторов/кодов, с экспериментальными данными;
- проведение с помощью разработанного ПК методических и исследовательских расчетов течения и теплопереноса в модельных конфигурациях и в проточных частях реальных технических устройств.

Научная новизна

В 90-е годы в России фактически отсутствовал опыт разработки универсальных программных средств, обеспечивающих возможность проведения трехмерных гидрогазодинамических расчетов применительно к реальной геометрии технических устройств. В ходе представляемого диссертационного исследования базовые численные схемы, алгоритмы и составляющие математической модели ПК SINF были отобраны из

множества вариантов, протестированы, доработаны для большей эффективности и/или надежности кода. Совокупность заложенных в ПК SINF математических моделей и вычислительных технологий может рассматриваться как значимый научный результат.

В диссертации предложен ряд оригинальных элементов численной методик, в частности:

– эффективный алгоритм обеспечения баланса массы в низкоскоростных потоках, основанный на комбинации метода искусственной сжимаемости и метода SIMPLEC;

– модифицированные граничные условия и обобщенные пристенные функции, обеспечивающие снижение зависимости результатов расчета турбулентных течений от густоты сетки в пристенной области;

– метод аппроксимации уравнений гидродинамики, обеспечивающий существенное снижение требований к густоте сетки при расчете течений жидкости со свободной поверхностью по методу VOF по сравнению с традиционными схемами;

– эффективный безытерационный алгоритм деформации структурированной сетки в соответствии с перемещением ограничивающих поверхностей для проведения расчетов в областях с изменяющейся геометрией.

Посредством численного моделирования впервые показано (и впоследствии подтверждено экспериментально), что значимый эффект энергоразделения в вихревой трубе (эффект Ранка) может иметь место при ламинарном режиме течения; данный результат имеет принципиальное научное значение, поскольку считалось, что за этот эффект ответственны, главным образом, турбулентные структуры. Также обнаружено, что при натекании потока жидкости на препятствие возможно образование обширных отрывных зон в придонной области течения, которые приводят к значительным искажениям формы свободной поверхности, наблюдаемым в эксперименте.

Существенно новыми являются представленные в работе результаты многочисленных расчетов течения и теплопереноса в элементах технических устройств, выполненных с помощью ПК SINF по заказам промышленных предприятий и научных организаций. Эти расчеты позволили провести глубокий анализ структуры сложных трехмерных течений, оценить аэродинамическую эффективность исследуемых устройств, а в ряде случаев послужили основой для выработки конкретных предложений по изменению геометрии проточной части для снижения потерь давления.

Практическая значимость и использование результатов работы

Разработан универсальный гидродинамический программный комплекс (ПК) SINF для численного моделирования ламинарных и турбулентных течений жидкости и газа в областях сложной геометрии, в том числе с учетом эффектов плавучести, в условиях сопряженного теплообмена, в неподвижной и вращающейся системе отсчета, в областях с подвижными границами, при наличии свободной поверхности и др.

С помощью разработанного ПК решены разнообразные методические и практические задачи гидрогазодинамики и теплообмена по заказам промышленных и научных организаций (Кировский завод, Ленинградский Металлический завод, ОАО «Теплоэнер-

госсервис», АОЗТ «Энерготех», ВНИПИЭТ, СПБАЭП, РФЯЦ-ВНИИЭФ, General Electric, Motor Turbo Union и др.). Проведены циклы фундаментальных исследований по грантам Российского фонда фундаментальных исследований (96-01-00764, 98-02-18127, 05-02-17189, 06-08-01334, 08-08-00400, 08-08-00977, 11-08-00590, 12-08-01208) и Российской программы поддержки ведущих научных школ (НШ-1389.2003.8, НШ-376.2006.8, НШ-5917.2008.8). Расчетные исследования с помощью кода SINF легли в основу десяти защищенных кандидатских диссертаций (две из них выполнены под непосредственным руководством автора) и нескольких десятков магистерских работ.

Специализированный код ПГС-ТК, созданный по заказу СПБАЭП на базе ПК SINF, используется для моделирования процессов тепло- и массопереноса в защитной оболочке энергоблока АЭС при анализе эффективности работы системы пассивного отвода тепла с целью оценки безопасности АЭС в условиях возможной аварии.

Упрощенная учебная версия ПК SINF – интегрированный пакет FLOS – внедрена в учебный процесс и широко используется в СПбПУ для выполнения студентами вычислительных лабораторных работ, а также для проведения научных исследований в рамках бакалаврской и магистерской подготовки.

Методология и методы исследования

Для решения задач гидрогазодинамики и теплообмена в диссертации применяется метод математического моделирования, основанный на численном интегрировании системы дифференциальных уравнений в частных производных, в общем случае трехмерных и нестационарных, выражающих общие законы сохранения массы, импульса и энергии в потоке вязкой жидкости или газа. В случае турбулентного движения для замыкания уравнений привлекаются современные полуэмпирические RANS модели или вихререзающие подходы.

В качестве инструмента исследования выступает разработанный в рамках диссертации гидродинамический программный комплекс (ПК) SINF, в котором аппроксимация определяющих уравнений выполнена по методу конечного объема с ориентацией на использование многоблочных структурированных расчетных сеток. Код SINF тщательно протестирован на ряде модельных задач, для которых в литературе имеются экспериментальные и/или расчетные данные других авторов. Методология исследования также включает проведение предварительной методической проработки решаемых задач (в частности, для проверки независимости решения от используемой расчетной сетки и временных шагов), что обеспечивает адекватность моделирования и, соответственно, достоверность получаемых результатов.

Положения, выносимые на защиту

1) Разработка совокупности математических моделей для описания различных классов течений жидкости и газа, таких как:

– до- и сверхзвуковые течения газа и несжимаемой жидкости, в общем случае турбулентные, нестационарные, неизоэнтальпические, в неподвижной и вращающейся системе отсчета, с эффектами плавучести;

- тепломассоперенос в условиях свободной и смешанной конвекции многокомпонентной парогазовой среды при наличии конденсации;
- течения с дисперсными частицами;
- течения в областях с изменяющейся геометрией;
- течения жидкости со свободной поверхностью.

2) Разработка численных схем и алгоритмов, с помощью которых сформулированные математические модели реализованы в виде комплекса программ SINF для решения широкого круга задач гидрогазодинамики и тепломассообмена в областях сложной геометрии с использованием блочно-структурированных расчетных сеток. Среди оригинальных элементов разработанной численной методики:

- эффективный алгоритм обеспечения баланса массы в низкоскоростных потоках, основанный на комбинации метода искусственной сжимаемости и метода SIMPLEC;

- метод постановки граничных условий (обобщенные пристенные функции), обеспечивающий снижение зависимости результатов расчета турбулентных течений от густоты сетки в пристенной области;

- метод аппроксимации конвективной части уравнений гидродинамики, обеспечивающий более высокую точность расчета течений жидкости со свободной поверхностью в методе VOF по сравнению с традиционными численными схемами;

- эффективный безытерационный алгоритм деформации структурированной сетки для проведения расчетов в областях с изменяющейся геометрией;

- алгоритм разбивки блочно-структурированной сетки на подблоки для проведения вычислений в параллельном режиме на заданном числе процессоров.

3) Разработка средств пре- и постпроцессинга для программного комплекса SINF, обеспечивших эффективное использование комплекса задолго до появления в России доступных аналогов.

4) Комплексное численное моделирование с помощью разработанного ПК SINF сложных трехмерных течений в проточных частях турбомашин (входной тракт, регулирующие клапаны, лопаточные решетки, выхлопной патрубков и др.) с целью оценки их аэродинамической эффективности; анализ структуры течения и предложения по изменению геометрии проточной части для снижения потерь давления.

5) Исследовательские расчеты течения и теплопереноса в модельных конфигурациях и в элементах реальных технических устройств (колебание тел в потоке, вентиляция сухого хранилища отработанного ядерного топлива, тепломассоперенос и конденсация в защитной оболочке энергоблока АЭС и др.); в частности, посредством математического (численного) моделирования:

- впервые показано, что значимый эффект энергоразделения в вихревой трубе (эффект Ранка) может иметь место при ламинарном режиме течения;

- обнаружено, что при натекании потока жидкости на препятствие возможно образование обширных отрывных зон в придонной области течения, которые приводят к значительным искажениям формы свободной поверхности, наблюдаемым в опытах.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается:

– обоснованным использованием математической модели, основанной на фундаментальных законах сохранения массы, импульса и энергии в потоке жидкости или газа, с привлечением хорошо апробированных моделей турбулентности;

– всесторонним тестированием разработанного кода на ряде модельных задач путем сравнения получаемых с помощью ПК SINF результатов с аналитическими решениями, с результатами расчета по другим кодам (в частности, ANSYS Fluent), с эталонными расчетами и экспериментальными данными других авторов;

– тщательной методической проработкой решаемых задач, включающей проверку степени зависимости получаемого решения от используемой расчетной сетки, модели турбулентности и т.д.

Апробация результатов

Основные результаты работы докладывались на: 3-м Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 1996); 2nd Int. Symposium on Finite Volumes for Complex Applications (1999, Duisburg, Germany); международных научно-технических конференциях «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования» (Харьков, 2000, 2006); ICHMT International Symposium on Heat Transfer in Gas Turbine Systems (2000, Cesme, Turkey; 2009, Antalya, Turkey); всероссийской конференции «Закрутка потока для повышения эффективности теплообменников» (Москва, 2002); 7th Int. Conference on Advanced Computational Methods in Heat Transfer (2002, Halkidiki, Greece); 5th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (2003, Praha, Czech Republic); 4th, 5th, 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS, 2004, Jyväskylä, Finland; 2008, Venice, Italy; 2012, Vienna, Austria); всероссийской научно-технической конференции «Параллельные вычисления в задачах математической физики» (Ростов-на-Дону, 2004); XV и XVI школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Калуга, 2005; Санкт-Петербург, 2007); European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS, 2005, Moscow); IX всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006); международных научных конференциях «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ, Челябинск, 2007; Санкт-Петербург, 2008); Int. Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics (Parallel CFD, 2007, Antalya, Turkey); 5th Baltic Heat Transfer Conference (2007, St. Petersburg); 13th Int. Symposium on Flow Visualization (ISFV, 2008, Nice, France); 5-й и 7-й международной научной конференции по механике «Поляховские чтения» (Санкт-Петербург, 2009, 2015); 6th Int. Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD, 2010, St.Petersburg); XIV международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование» (Саров, 2012); Int. Conference on Supercomputing in Nuclear Applications (2013, Paris, France); 6-й Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6, Москва, 2014); межотраслевой научно-практической

конференции «Суперкомпьютерные технологии в промышленности» (Санкт-Петербург, 2014); 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD, 2014, Barcelona, Spain); XVI международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров» (Новороссийск, 2014); 16th Int. Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF, 2015, Budapest, Hungary).

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора

По материалам диссертации опубликовано 46 работ, в том числе 20 работ в изданиях из Перечня ВАК. Список публикаций дан в конце автореферата.

Вклад автора в создание большинства компонентов ПК SINF является определяющим. Выносимые на защиту оригинальные элементы численной методики разработаны лично автором. Большая часть представленных в диссертации расчетов (за исключением явно указанных в тексте случаев) также выполнены лично автором или при его непосредственном участии.

Структура и объем работы

Диссертации состоит из введения, пяти глав и заключения. В приложении к работе приведены формулировки реализованных в ПК SINF моделей турбулентности. Общий объем диссертации 261 стр., в том числе 121 рисунок и 10 таблиц; список литературы включает 212 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы. В частности, обоснована актуальность темы исследования, показана научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** дано общее описание программного комплекса (ПК) SINF как единой системы, состоящей из многих взаимосвязанных элементов, представлены основные компоненты комплекса, очерчен вклад автора в их разработку.

Основным элементом гидродинамического программного комплекса является его вычислительный модуль, обеспечивающий численное интегрирование определяющих уравнений. Ведь именно гидродинамический решатель (солвер), в меру реализованных в нем математических моделей и численных методов, определяет круг решаемых задач, качество получаемого решения, а также время расчета и необходимые вычислительные ресурсы. Однако не менее важную роль для эффективного использования комплекса играет наличие в его составе необходимых средств пре- и постпроцессинга, которые обеспечивают создание расчетных сеток, а также визуализацию и анализ получаемых результатов. ПК SINF включает все эти три компонента, что дает основания говорить именно о комплексе взаимосвязанных и взаимодополняющих программ.

Вычислительная часть комплекса SINF (Supersonic-to-INcompressible Flows) представлена, в первую очередь, одноименным расчетным кодом, который обеспечивает численное интегрирование полных (без упрощений) трехмерных уравнений Навье-

Стокса, дополненных той или иной полуэмпирической моделью турбулентности, с применением блочно-структурированных расчетных сеток. Это позволяет проводить с помощью кода SINF моделирование до- и сверхзвуковых течений вязкого газа или несжимаемой жидкости, в общем случае нестационарных, неизотермических, турбулентных, развивающихся в областях сложной геометрии в неподвижной и/или вращающейся системе отсчета.

Для расширения круга решаемых с помощью ПК SINF задач, на основе базового кода SINF разработаны дополнительные расчетные модули, в которых реализованы специализированные математические модели и численные методы, а именно:

- код SINF-PCF (Particles in Carrier Flow) для моделирования турбулентных двухфазных потоков с дисперсными частицами (метод пробных частиц);

- код SINF-ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) для моделирования течений в областях с подвижными границами (включая решение задач аэроупругости) с использованием метода деформируемых сеток;

- код SINF-FS (Free Surface) для моделирования нестационарных течений жидкости со сложной динамикой свободной поверхности (плескание жидкости в баке, обрушение «дамбы», набегание волны на препятствие и т.п.) по методу VOF;

- код ПГС-ТК (Паро-Газовая Смесь – Течение и Конденсация), созданный по заказу СПбАЭП для решения задач свободной и смешанной конвекции парогазовой смеси при наличии конденсации пара (с ориентацией на моделирование процессов тепломассопереноса в защитной оболочке энергоблока АЭС).

Отработка базовых алгоритмов, используемых в ПК SINF для построения структурированных расчетных сеток, «вписанных» в реальную геометрию обтекаемых поверхностей, была осуществлена в 1990-х годах, главным образом при создании автором интерактивного двумерного генератора сеток MIG (Mesh Interactive Generator) [17]. Впоследствии, в 2000-2003 гг., усовершенствованная многоблочная версия этого генератора была интегрирована в препроцессор учебного гидродинамического пакета FLOS.

Наряду с сеточными генераторами в состав препроцессорной части ПК SINF входят утилиты для манипуляций с сетками без изменения расстановки узлов; среди наиболее востребованных – интерактивная утилита GROT (Grid Operation Tool) для элементарных алгебраических операций с сетками (сдвиг, масштабирование, зеркальное отражение и др.) и утилита ParUtil, обеспечивающая автоматизированную подготовку задачи для проведения параллельного расчета. В частности, утилита ParUtil по разработанному автором алгоритму разрезает крупные блоки исходной сетки на более мелкие и группирует их с таким расчетом, чтобы обеспечить по возможности равномерную загрузку заданного числа процессов, не допуская при этом неоправданного увеличения размера межблочных границ и появления слишком мелких блоков.

В качестве примера работы разработанного алгоритма на рисунке 1 показана разбивка двухблочной сетки с помощью утилиты ParUtil для запуска задачи на 16 процессорах. Блоки исходной сетки имеют размер 100×50 и 50×25 ячеек (рисунок 1а). В резуль-

тате разбивки получено 17 блоков (рисунок 1б), наименьший из которых имеет размер 18×7 ячеек (32% средней загрузки одного процесса). Фактическая загрузка процессов не превышает 103% от средней; 14 из 16 процессов имеют загрузку не ниже 98%.

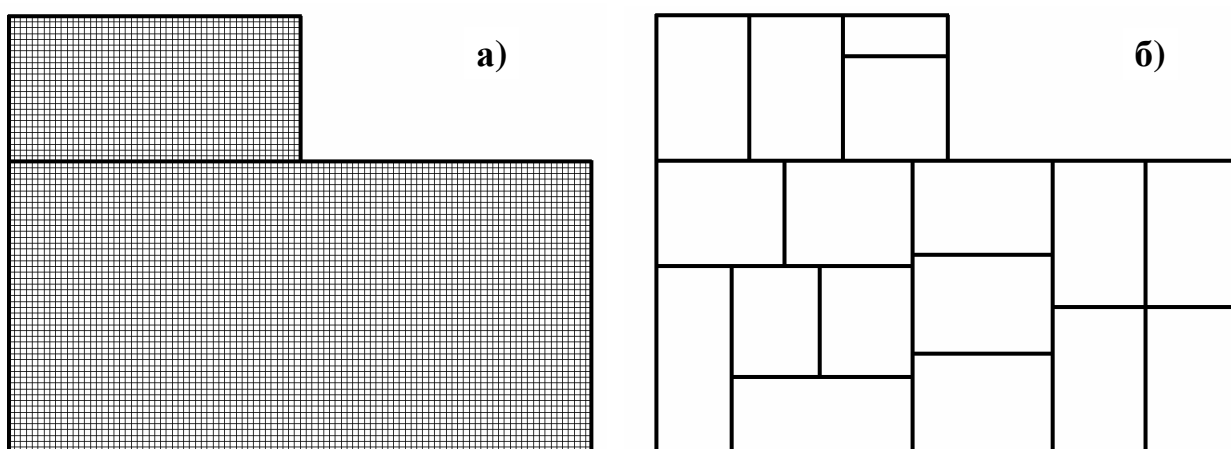


Рисунок 1 – Разбивка сетки на более мелкие блоки с помощью утилиты ParUtil

Посстпроцессорная часть ПК SINF представлена системой визуализации FLAG (Flow Analysis Graphics) для экспресс-анализа заданных на блочно-структурированной сетке скалярных и векторных полей, а также утилитами для статистической обработки результатов нестационарных расчетов. Визуализатор FLAG был создан автором в 1993-1994 гг., сразу после появления первой версии кода SINF; в 2001 г. визуализатор приобрел современный Windows-интерфейс. Система FLAG позволяет строить изолинии и/или делать цветовую заливку скалярных полей, а также показывать векторы, сеточные линии и/или границы блоков расчетной сетки; имеется возможность масштабирования изображения (в т.ч. аффинного) и его оцифровки. По сути, это – перечень основных опций любого современного визуализатора. В большинстве случаев, перечисленных возможностей системы FLAG вполне хватает для экспресс-анализа результатов расчета. Для получения более сложных презентационных картин течения в настоящее время используется коммерческий визуализатор TecPlot; записать данные в соответствующем формате можно из утилиты FLAG или прямо из кода SINF.

В «полной» версии ПК SINF все его компоненты существуют в виде отдельных приложений, а для использования расчетных кодов требуется «ручное» редактирование управляющих файлов. Чтобы облегчить начинающим пользователям работу с ПК SINF, а также обеспечить возможность начального освоения студентами современной технологии проведения гидродинамических расчетов, создана упрощенная (с ограниченным набором опций математической модели и численных схем) учебная версия ПК SINF с Windows интерфейсом – интегрированный пакет FLOS (*Flow Studio*). В настоящее время пакет FLOS широко используется в СПбПУ для выполнения студентами вычислительных лабораторных работ, а также для проведения исследовательских расчетов при подготовке выпускных бакалаврских работ и магистерских диссертаций.

Во **второй главе** представлены математические модели ПК SINF. Реализованная в коде SINF базовая модель, описанию которой посвящен раздел 2.1, ориентирована на моделирование течений вязкой жидкости или газа (от несжимаемых до сверхзвуковых), в общем случае турбулентных, нестационарных, неизотермических, развивающихся в неподвижной и/или вращающейся системе отсчета, что позволяет решать множество востребованных практикой задач гидрогазодинамики и теплообмена. Основу математической модели составляют общие уравнения баланса массы, импульса и энергии в потоке жидкости с переменной плотностью – уравнения Навье-Стокса (Рейнольдса), замкнутые с помощью той или иной полуэмпирической модели турбулентности.

Предусмотрены три варианта уравнения состояния: а) жидкость с постоянной плотностью, б) жидкость с почти постоянной плотностью и заданным коэффициентом теплового расширения (учет эффектов плавучести в приближении Буссинеска) и в) совершенный газ (уравнение Менделеева-Клапейрона). Зависимость коэффициентов вязкости и теплопроводности от температуры учитывается степенной функцией (в предположении постоянства числа Прандтля). Теплоемкость считается постоянной.

При записи уравнений движения из действующей на поток объемной силы явно выделяется ее потенциальная часть F_h (сила тяжести и/или центробежная сила) и вводится редуцированное давление $p^* = p - p_h$, которое является избыточным по отношению к гидростатическому давлению p_h , отвечающему равновесию жидкости с характерной плотностью ρ_h в потенциальном поле сил F_h ($\nabla p_h = \rho_h F_h$). Преимуществом такой формы записи является то, что в численном решении не нужно итерационно выстраивать поле гидростатического давления p_h , перепады которого во многих случаях значительно превышают перепады избыточного давления p^* . Также в коде SINF внедрена модель анизотропного «пористого тела» с линейным или квадратичным сопротивлением, позволяющая учесть воздействие на поток разного рода «полупроницаемых» препятствий (решеток, фильтров и т.п.), течение сквозь которые не разрешается на используемой расчетной сетке; введение соответствующего объемного источника в уравнение энергии обеспечивает, в рамках этой модели, учет нагрева жидкости при ее протекании сквозь теплообменник.

В зависимости от решаемой задачи в коде SINF могут использоваться (по выбору пользователя) различные (математически эквивалентные) формы записи уравнения баланса энергии. В частности, при рассмотрении низкоскоростных течений газа предпочтительным является уравнение баланса статической энтальпии $h = C_p T$. Для сверхзвуковых потоков со скачками уплотнения используется уравнение баланса полной энтальпии $H = h + V^2/2$, которая не претерпевает разрыва на скачке. Если расчет ведется в быстровращающейся системе отсчета (например, для рабочего колеса турбины), рекомендуется явно учесть работу центробежной силы, включив ее потенциал в полную энтальпию (ротальпию) $H^R = H - (\omega \times r)^2/2$. В коде SINF также предусмотрена возможность решения тепловой задачи в сопряженной постановке, с учетом

теплопроводности в твердом теле; в этом случае для тех блоков расчетной сетки, которые являются «твердыми», решается только уравнение теплопроводности.

Для учета эффектов турбулентного перемешивания в коде SINF реализован набор (более 10) дифференциальных полуэмпирических RANS моделей турбулентности, включая одну из наиболее популярных на сегодня модель $k-\omega$ SST. В дополнение к стандартным формулировкам имеется возможность включения в модели турбулентности часто используемых модификаций, таких как поправка Като-Лаундера для предотвращения нефизичной генерации турбулентности в областях с преобладанием деформации сжатия/растяжения (например, в окрестности точки торможения потока), поправка на кривизну линий тока и вращение системы отсчета и др. Также в коде SINF реализовано несколько гибридных RANS/LES моделей (включая известный метод DES), которые у стенки ведут себя как «базовая» RANS модель, а при удалении от стенки автоматически трансформируются в «подсеточную» LES модель.

Для постановки граничных условий на ограничивающих поток стенках в коде SINF, наряду со стандартными высоко- и низкорейнольдсовыми формулировками, доступны разработанные автором модифицированные граничные условия [31] и «обобщенные» пристенные функции [20, 42], обеспечивающие снижение зависимости результатов расчета турбулентных течений от густоты сетки в пристенной области. В частности, один из вариантов таких «обобщенных» пристенных функций для модели $k-\omega$ SST имеет вид [20]:

$$k_1 = u_\tau^2 \left(\frac{1}{0.002 y^{+3.5}} + 0.3 \right)^{-1}, \quad \omega_1 = \frac{u_\tau^2}{\nu} \left[\left(\alpha_{vis} \cdot \frac{80}{y^{+2}} \right)^2 + \left(\frac{1}{0.3 \kappa y^+} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Здесь выражение для скорости диссипации ω_1 в первой пристенной точке является обобщением известной аппроксимации (Esch, Menter, 2003), в которой скомбинированы аналитические решения для вязкого подслоя и для «логарифмического» участка; дополнительный множитель $\alpha_{vis} = 0.7$ введен для уменьшения чувствительности результатов к значению y^+ . Выражение для кинетической энергии турбулентности k_1 тоже построено как комбинация «логарифмического» и «вязкого» участков; в качестве последнего, за неимением аналитического решения, задано распределение, полученное при численном решении задачи о пограничном слое на пластине с использованием «низкорейнольдсовых» граничных условий.

В разделе 2.2 представлены математические модели, реализованные в специализированных расчетных модулях программного комплекса SINF для расширения круга решаемых с его помощью задач.

Для моделирования течений жидкости со свободной поверхностью в специализированном коде SINF-FS [18, 19] использован метод VOF (Volume-Of-Fluid; Hirt, 1981), который, будучи относительно нетребовательным к вычислительным ресурсам, позволяет моделировать сложные течения с сильной деформацией свободной поверхности,

включая случаи слияния и разделения объемов, занимаемых жидкой и газовой фазами. Для определения текущего положения межфазной границы, перемещающейся по расчетной сетке, в методе VOF используется распределение маркер-функции C , представляющей собой объемную долю жидкости в ячейках сетки. Динамика маркер-функции C описывается уравнением конвективного переноса $dC/dt = 0$. В т.наз. одножидкостной формулировке метода VOF, используемой в ПК SINF, уравнения гидродинамики для системы жидкость-газ записываются как для единой среды с переменной плотностью, выражаемой через объемную долю жидкости C .

Моделирование газодисперсных потоков в коде SINF-PCF [13, 22] основывается на Лагранжевом описании дисперсной фазы (метод пробных частиц; Crowe, 1977). В рамках данного подхода рассчитываются траектории множества пробных частиц в несущем потоке, а поля параметров дисперсной фазы и слагаемые, описывающие межфазный обмен в уравнениях несущей фазы, определяются путем осреднения по всем частицам. Реализованная в ПК SINF математическая модель ограничена случаем стационарного течения газа с условно-сферическими частицами. Объемная доля дисперсной фазы считается достаточно малой (до 0.1%), чтобы пренебречь столкновениями частиц друг с другом. Воздействие турбулентности на частицы моделируется введением случайных флуктуаций скорости несущего потока в соответствии с локальными параметрами турбулентности (Gosman, Ioannides, 1983). Учет обратного влияния частиц на несущий поток достигается за счет глобальных итераций.

В отличие от других расчетных модулей ПК SINF, специализированный код ПГС-ТК [20, 40] разработан по заказу СПбАЭП для моделирования процессов тепло- и массопереноса в защитной оболочке (ЗО) энергоблока АЭС. С учетом особенностей течения в ЗО АЭС, математическая модель кода ПГС-ТК описывает транспорт многокомпонентной паро-газовой смеси с учетом эффектов температурной и концентрационной плавучести, объемной и поверхностной конденсации пара, стекания пленки конденсата, каталитического «выжигания» водорода и др. Течение считается низкоскоростным (существенно дозвуковым); капли конденсата считаются достаточно мелкими, чтобы пренебречь скоростной и температурной неравновесностью фаз; химические реакции отсутствуют. Для конденсации пара принято равновесное приближение, в рамках которого парциальное давление пара не может стать выше давления его насыщенных паров – «лишняя» влага конденсируется. Стеkanie пленки конденсата считается локально установившимся; капиллярные явления и касательные напряжения на межфазной границе не рассматриваются. В условиях повышения давления в объеме ЗО АЭС за счет нагрева и подачи пара и/или газа, для определения текущего уровня давления используется условие сохранения массы одного из компонентов смеси; обычно таким «стационарным» компонентом является воздух (или азот, если требуется моделировать «сжигание» кислорода в рекомбинаторах водорода).

В **третьей главе** представлены численные схемы и алгоритмы, разработанные для дискретизации исходной гидродинамической задачи и решения полученной системы алгебраических уравнений в ПК SINF.

В разделе 3.1 рассмотрены численные схемы, используемые в ПК SINF для аппроксимации определяющих уравнений математической модели. Аппроксимация выполнена по методу конечного объема, который в настоящее время используется в большинстве популярных гидродинамических пакетов. Контрольными объемами, для которых строится дискретный аналог уравнений гидрогазодинамики, служат ячейки блочно-структурированной расчетной сетки, «вписанной» в границы области течения. Уравнения записаны относительно декартовых компонент скорости.

При расчете низкоскоростных (дозвуковых) течений газа или несжимаемой жидкости, для вычисления конвективных потоков через грани ячеек применяются противопоточные схемы первого или второго (по выбору пользователя) порядка точности с регулируемой степенью противопоточности, с возможностью включения монотонизирующего ограничителя *minmod*. Для расчета диффузионных потоков используется гибридный подход, сочетающий конечно-разностную аппроксимацию производной вдоль индексной линии с градиентной поправкой на скошенность ячеек. В выражение для потока массы вводится стабилизирующая добавка (Rhie, Chow, 1983), препятствующая развитию «четно-нечетных» осцилляций давления. При использовании «хороших» расчетных сеток (не слишком скошенных, с плавно меняющимися шагами, без резких изломов сеточных линий) реализованные в ПК SINF численные схемы обеспечивают второй порядок точности решения, что подтверждено соответствующими тестами.

Для сверхзвуковых течений со скачками уплотнения в коде SINF реализована схема CUSP (Jameson, 1995; «скалярный» аналог известной схемы Roe), обеспечивающая разрешение скачков с единственной внутренней точкой. Для повышения точности аппроксимации применяется метод типа MUSCL; для предотвращения осцилляций решения в окрестности скачков используется ограничитель Ван-Лира, который в «опасных» местах понижает порядок точности схемы до первого.

При проведении расчетов на многоблочных сетках требуется обмен данными между блоками (стыковка) для обеспечения связности решения. В ПК SINF, который ориентирован на использование соприкасающихся (не накладывающихся друг на друга) блоков сетки, для организации стыковки используется оригинальный подход, основанный на использовании *виртуальных* блоков. А именно, для каждого сегмента стыковки организуется вспомогательный виртуальный блок, в который копируются данные из двух слоев приграничных ячеек каждого из стыкуемых блоков. Все вычисления, связанные с определением потоков на интерфейсе стыковки, проводятся внутри виртуального блока по тем же правилам, что и в обычных блоках; сосчитанные потоки вместе со значениями переменных на интерфейсе передаются в стыкуемые блоки и используются для расчета невязок. Тем самым обеспечивается сохранение консервативных свойств численной схемы и «прозрачность» межблочных границ. Помимо своей основной

функции – межблочного обмена – виртуальные блоки в коде SINF могут выполнять дополнительную обработку данных. В частности, доступна опция поворота векторов для обеспечения условий вращательной периодичности, а в случае нерегулярной стыковки (с обрывом сеточных линий на межблочной границе) проводится переинтерполяция данных с одной сетки на другую. Также в виртуальном блоке выполняется пересчет скоростей на интерфейсе, где соприкасаются неподвижные и движущиеся блоки сетки; при этом доступны традиционные для современных CFD кодов опции – полный учет относительного скольжения сеток, «замороженный» ротор и поверхность смещения.

В разделе 3.2 представлены алгоритмы, используемые в ПК SINF для решения системы алгебраических уравнений, полученной в результате дискретизации исходной задачи. Итерации организованы в форме метода установления; для нестационарной задачи процесс установления организуется на каждом шаге по физическому времени (метод «двойных временных шагов»). Продвижение по псевдовремени осуществляется с помощью неявной схемы первого порядка; для ускорения сходимости реализован локальный выбор шага по псевдовремени с учетом размера обрабатываемой ячейки и местных скоростей конвективного и диффузионного переноса. На каждом шаге по псевдовремени линеаризованная система уравнений для приращений искомых величин (давления, скорости, температуры и т.д.) решается с применением экономичного алгоритма скалярной или матричной прогонки (метод переменных направлений).

Для решения задач динамики несжимаемой жидкости и низкоскоростных течений газа в коде SINF реализованы три алгоритма «перевязки» давления и скорости, обеспечивающих в итоге выполнение уравнения неразрывности в сошедшемся решении, а именно: метод искусственной сжимаемости, метод типа SIMPLEC (коррекция давления на основании решения вспомогательного уравнения Пуассона), а также оригинальный алгоритм [6], в котором объединены оба метода. Как показывает опыт расчетов, по сравнению с методом SIMPLEC, комбинированный метод обеспечивает выигрыш по времени решения задачи до 30%, являясь при этом более надежным и универсальным.

Поскольку уравнение Пуассона для поправки давления (в методе SIMPLEC или в комбинированном методе) нужно решать на каждом шаге метода установления, данная часть алгоритма является наиболее затратной. С учетом этого, для решения уравнения Пуассона используется метод сопряженных градиентов, который является одним из самых эффективных методов решения систем линейных уравнений с симметричной положительно определенной матрицей.

Для расчета высокоскоростных потоков газа проводится регуляризация системы уравнений по методу масштабирования сжимаемости.

Раздел 3.3 посвящен распараллеливанию вычислений в ПК SINF. Распараллеливание выполнено на основе открытой библиотеки MPI в рамках концепции SPMD (Single Program Multiple Data) с декомпозицией задачи по блокам расчетной сетки [14]. При работе программы в параллельном режиме в каждом из запущенных процессов исполняется отдельный экземпляр кода SINF, который производит вычисления только

для «приписанных» к этому процессу блоков сетки. При этом организация вычислений внутри блока не зависит от того, в каком процессе обрабатывается данный блок, а большая часть межпроцессорного обмена данными с применением функций MPI естественным образом вписывается в процедуры стыковки блоков. Для уменьшения числа вызовов сравнительно медленных функций MPI и, соответственно, повышения эффективности распараллеливания, необходимые данные по стыковкам передаются из одного процесса в другой единым пакетом, а для пересылки используются неблокирующие процедуры MPI_ISEND и MPI_IRECV. По результатам одного из тестов (естественная конвекция в кубической полости, сетка 2 млн. ячеек), при использовании 64 ядер было достигнуто 48-кратное ускорение расчета (эффективность 0.75), что считается очень неплохим показателем для современных CFD кодов общего назначения.

В [разделе 3.4](#) представлены некоторые особенности численных методов, разработанных для специализированных расчетных модулей ПК SINF с учетом специфики реализованных в них математических моделей.

В коде SINF-ALE для моделирования течений в областях с подвижными границами использован метод деформируемых расчетных сеток [8, 12, 15]. Для дискретизации задачи используется т.наз. ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) формулировка – запись балансовых уравнений гидрогазодинамики для произвольного движущегося объема, в качестве которого фигурирует ячейка деформируемой по ходу расчета сетки. Нетривиальным моментом аппроксимации таких уравнений по методу конечного объема является способ вычисления скорости движения граней ячейки сетки, который должен быть согласован со способом аппроксимации поверхностных интегралов и производных по времени, чтобы обеспечить выполнение определенного кинематического тождества (т.наз. условие «сохранения пространства»). Нарушение данного требования приводит к появлению в уравнениях баланса массы, импульса и др. паразитных источников, обусловленных деформацией сетки, что чревато искажением численного решения.

Оригинальным элементом численной методики кода SINF-ALE является эффективный безытерационный алгоритм деформации структурированной сетки в соответствии с перемещением ограничивающих поверхностей. Разработанный алгоритм исходит из того, что в рассматриваемом блоке определен сегмент сетки, координаты всех узлов которого в данный момент времени известны. Векторы смещения остальных узлов сетки определяются посредством линейной интерполяции вдоль сеточных линий, идущих от выделенного сегмента к границам блока. В коде SINF-ALE предусмотрены различные виды предписанного движения сегмента (линейное смещение, вращение, гармонические колебания и др.). Также реализована возможность решения отдельных задач аэроупругости – с определением текущего положения сегмента на основании решения дополнительной задачи о движении или деформации рассматриваемого тела с учетом действующих на него гидродинамических нагрузок.

Важным элементом программной реализации метода VOF в специализированном коде SINF-FS, предназначенном для моделирования течений жидкости со свободной

поверхностью, является способ аппроксимации уравнения переноса маркер-функции. Использование обычных противопоточных схем приводит к сильному «размытию» межфазной границы из-за численной диффузии; для уменьшения данного нежелательного эффекта в литературе предложен ряд специальных «сжимающих» схем. По результатам тестирования [16], для реализации в коде SINF-FS была отобрана недавно предложенная схема M-CICSAM (Waclawczyk, 2008) в сочетании со схемой Кранка-Николсон: по сравнению с другими сжимающими схемами такая комбинация обеспечила наименее жесткие ограничения по густоте расчетной сетки и по шагу по времени.

Одним из оригинальных моментов численной методики кода SINF-FS является метод аппроксимации конвективной части уравнений гидродинамики. Поскольку плотность среды в окрестности границы жидкость-газ изменяется на несколько порядков, способ интерполяции плотности на грань ячейки при вычислении конвективных потоков может сильно влиять на их значения и, соответственно, на точность решения в целом, особенно на не слишком мелких расчетных сетках. В коде SINF-FS использован оригинальный метод [18], обеспечивающий существенное снижение требований к густоте сетки в окрестности межфазной границы благодаря частичной компенсации ошибок интерполяции плотности на грань:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \phi) = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \phi) - \phi \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \approx \rho_P \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_P + \frac{1}{Vol} \sum_m \rho_m Q_m^{vol} \phi_m - \frac{\phi_P}{Vol} \sum_m \rho_m Q_m^{vol}$$

Рисунок 2 демонстрирует эффективность данного метода на примере тестовой задачи о падении изначально круглого «пятна» жидкости под действием силы тяжести. Как можно видеть, предложенная схема аппроксимации конвективных слагаемых в уравнении движения (точечная линия 1), в отличие от других опробованных схем (линии 2 и 3), обеспечивает смещение «пятна» без нефизичных искажений его формы даже на сравнительно грубой расчетной сетке.

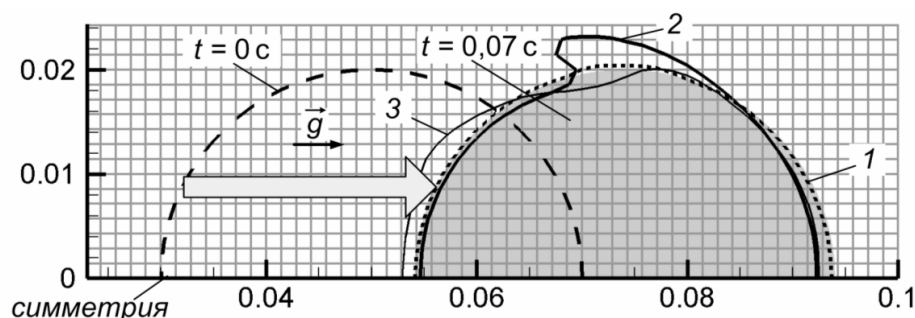


Рисунок 2 – Искажение формы падающего круглого пятна: 1 – расчет по предложенной схеме, 2,3 – другие схемы; фоновой заливкой показано неискаженное пятно

В целом, по результатам ряда тестов, реализованная в ПК SINF оригинальная численная методика расчета течений со свободной поверхностью менее требовательна к густоте расчетной сетки и шагу по времени, чем аналогичная (по назначению и возможностям) схема коммерческого пакета Fluent.

Четвертая глава посвящена тестированию ПК SINF. В общей сложности, матрица тестирования включает около 50 задач. В работе представлены наиболее важные тесты, среди которых расчеты стационарных и нестационарных, изотермических и неизотермических течений жидкости и газа (вплоть до сверхзвуковых скоростей), в том числе турбулентных, с эффектами плавучести и т.д. Результаты, полученные с помощью ПК SINF, сопоставляются с аналитическими или имеющимися в литературе «эталонными» численными решениями, с результатами расчетов по другим кодам (в частности, Fluent), с данными эксперимента. В совокупности, эти тесты обеспечивают достаточно полную и разностороннюю проверку всех основных элементов математической модели и численной методики ПК SINF.

Пятая глава посвящена применению ПК SINF для решения фундаментальных и прикладных задач гидрогазодинамики и теплообмена. Реализованные в ПК SINF математические модели и численные методы позволили уже в 90-е гг., задолго до широкого распространения в России коммерческих CFD кодов, проводить трехмерные гидродинамические расчеты для реальной геометрии технических устройств. При этом на всех этапах развития ПК SINF проводимые с его помощью исследования по уровню сложности и точности стояли в ряду лучших (для того времени) не только в России, но и в мире. В диссертации представлены лишь некоторые из этих расчетов, выполненные лично автором или при его непосредственном участии.

В разделе 5.1 приведены результаты ряда исследовательских расчетов течения и теплопереноса в относительно простых модельных конфигурациях, выполненных, главным образом, для лучшего понимания структуры моделируемых потоков и выявления присущих им особенностей и закономерностей.

Один из показательных примеров – моделирование эффекта энергоразделения в закрученном потоке газа [1, 2]. Расчеты проведены для вихревого устройства модельной конфигурации (см. рисунок 3а): газ из завихрителя подается в длинную круглую трубу через кольцевую щель в средней части трубы и симметрично растекается к ее концам. Задача решена в стационарной осесимметричной постановке; течение газа ламинарное. По результатам численного моделирования, при достаточном уровне закрутки потока на оси трубы возникает обширная зона рециркуляции; ниже по потоку восстанавливается однонаправленное течение с характерным М-образным профилем продольной скорости. Как можно видеть на рисунке 3б, по характеру изменения окружной скорости поток можно разделить на две части: у оси трубы имеет место почти квазитвердое вращение, а во внешней области окружная скорость изменяется по закону свободного (потенциального) вихря. Разгон газа в потенциальном вихре сопровождается почти изэнтропическим охлаждением (рисунок 3в), тогда как в вихревом ядре потока квазитвердое вращение создает условия для радиального выравнивания температуры газа за счет теплопроводности (рисунок 3в), а уменьшение окружной скорости при приближении к оси ведет к соответствующему снижению температуры торможения (рисунок 3г). В результате, температура торможения на оси трубы оказывается ниже, чем на входе,

т.е. имеет место эффект энергоразделения. В представленном варианте (на входе число Маха $M_{\text{вх}} = 0.5$) минимальная температура потока равна $T_{0,\text{min}} \approx 0.86 T_{0,\text{вх}}$, т.е. при нормальной входной температуре охлаждение газа составляет почти 50°K !

Хотя эффект энергоразделения в закрученном потоке газа (эффект Ранка) известен уже более 80 лет и широко используется на практике, представленный расчет показал (по-видимому, впервые в мире), что значимое энергоразделение может иметь место при ламинарном режиме течения; впоследствии этот вывод был подтвержден в специально спланированном эксперименте [1]. Данный результат имеет принципиальное научное значение, поскольку считалось, что за эффект энергоразделения в закрученном потоке газа ответственны, главным образом, турбулентные структуры.

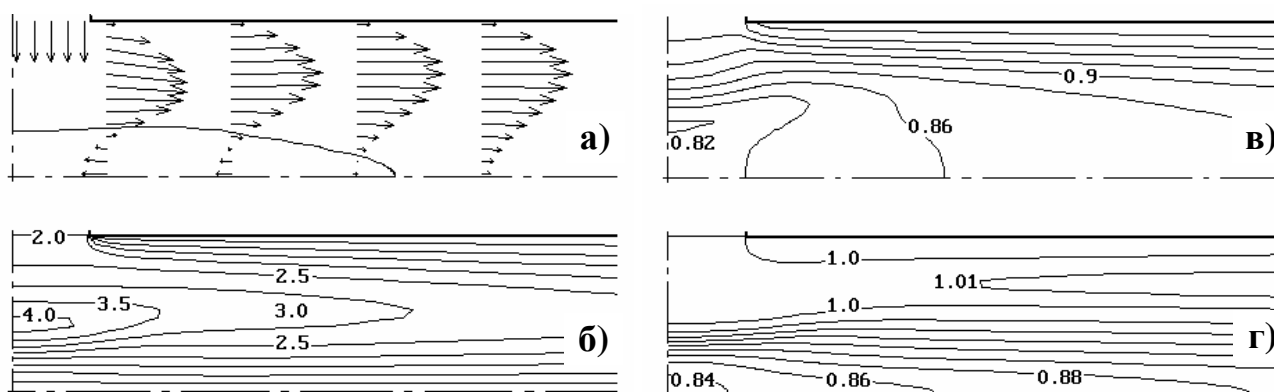


Рисунок 3 – Расчет закрученного течения газа в модельном вихревом устройстве: векторы скорости и граница зоны рециркуляции (а), изолинии окружной скорости (б), статической температуры $T/T_{0,\text{вх}}$ (в) и температуры торможения $T_0/T_{0,\text{вх}}$ (г)

Рисунок 4 иллюстрирует результаты моделирования поперечных автоколебаний упруго закрепленного круглого цилиндра с применением технологии деформируемых сеток (код SINF-ALE). Несмотря на двумерность геометрии, задача решалась в трехмерной постановке; расчетная сетка содержала 200 тысяч ячеек; сгущение сетки к поверхности цилиндра обеспечило нормированное расстояние до стенки $y^+ < 1$. Следуя условиям эксперимента (Williamson, 1981), относительная скорость потока $U^* = U/Df_n$ изменялась от 2 до 11 (соответственно, число Рейнольдса от 1200 до 7000), что обеспечило варьирование частоты схода вихрей вблизи собственной частоты колебаний цилиндра f_n . Мгновенная изоповерхность модуля завихренности, показанная на рисунке 4а, демонстрирует существенно трехмерную структуру вихревого следа за цилиндром. На рисунке 4б представлены данные по амплитуде колебаний цилиндра. Налицо вполне удовлетворительное согласие результатов трехмерного расчета и эксперимента, тогда как моделирование в рамках упрощенной двумерной постановки задачи (пунктирная линия) дает заниженную амплитуду резонансных колебаний и явно недооценивает ширину области захвата частоты.

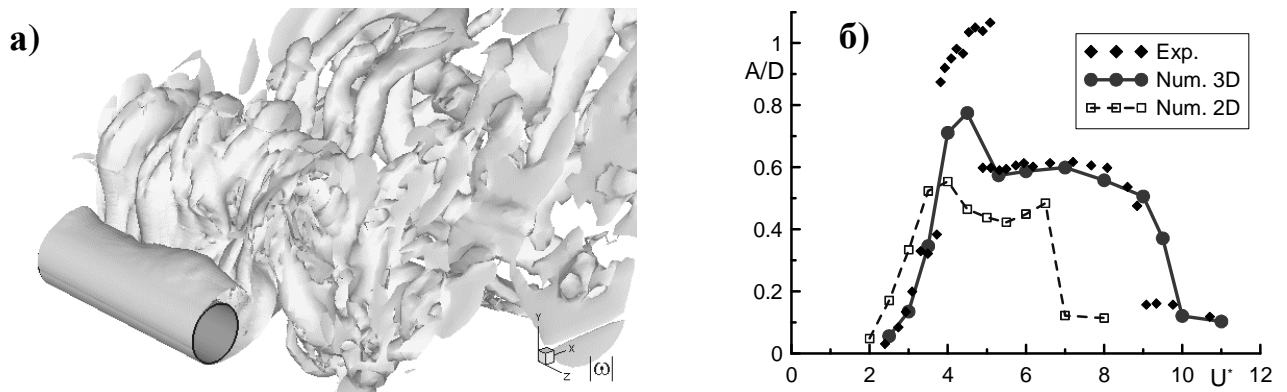


Рисунок 4 – Расчет автоколебаний упруго закрепленного цилиндра в потоке:
а) структура следа, б) амплитудная характеристика колебаний

В качестве примера применения ПК SINF для моделирования течений жидкости со свободной поверхностью, на рисунке 5 приведено решение модельной задачи о натекании потока, возникшего в результате обрушения «дамбы», на препятствие. Конфигурация моделируемого течения соответствует условиям эксперимента (Soares-Frazao, 2008). В начальный момент времени вода удерживается вертикальной перегородкой у торца длинного горизонтального канала прямоугольного сечения (затененная область на рисунке 5а). После того, как перегородка убирается, моделируя мгновенное разрушение «дамбы», жидкость устремляется к расположенному на дне канала препятствию в виде треугольной призмы, частично отражаясь и частично перетекая через него.

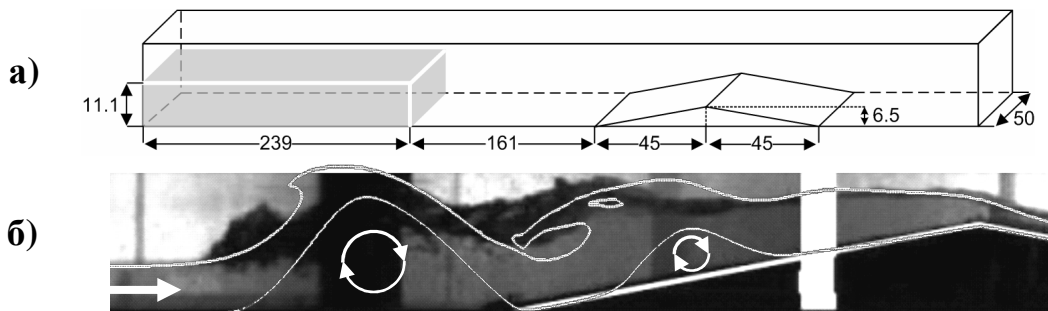


Рисунок 5 – Натекание потока на препятствие: а) схема (размеры в сантиметрах),
б) фотография течения и расчетное положение свободной поверхности при $t = 3.7$ с

На рисунке 5б полученная в результате двумерного расчета граница жидкости на момент времени $t = 3.7$ с после обрушения «дамбы» наложена на фотографию эксперимента. Как можно видеть, расчет неплохо воспроизводит наблюдаемую в опыте конфигурацию свободной поверхности, включая характерный «холм» слева от препятствия. Детальный анализ результатов численного моделирования показал, что «встречный» градиент давления, возникающий при натекании потока на препятствие, приводит к развитию обширных отрывных зон с попятным движением жидкости в пристенной области (см. рисунок 5б), которые и проявляются в виде «холмов» на свободной поверхности. В представленных расчетах [42, 46] описанный эффект (образование обширных отрывных областей в придонной области и, как следствие, появление «холмов» на свободной поверхности при натекании потока на препятствие) обнаружен впервые. При этом расчеты

[46], выполненные в трехмерной постановке, показали, что из-за трения о боковые стенки канала придонные отрывные зоны становятся существенно трехмерными; соответственно, неоднородной по ширине канала оказывается и форма свободной поверхности, которая на виде сбоку почти идеально соответствует фотографии эксперимента.

На рисунке 6 показаны результаты расчета течения газозвеси в модельной конфигурации устройства гомогенного смесеобразования [13], выполненные с помощью специализированного кода SINF-PCF (метод пробных частиц). Устройство состоит (см. рисунок 6а) из улиточного завихрителя, цилиндрической испарительной камеры, на горячих стенках которой под действием центробежных сил должны оседать и испаряться капли топлива, и двух отводящих каналов (на рисунке не показаны). Целью исследования являлась оценка работоспособности устройства, а также оптимизация его геометрии и фракционного состава капель для получения максимально равномерного оседания капель по поверхности испарителя. Расчеты проводились для полидисперсных капель с диаметром от 1 до 100 мкм; в окрестности форсунки массовая доля примеси доходила до 80%; всего было рассчитано более 200 тысяч траекторий пробных частиц. Показанные на рисунке 6 изолинии концентрации капель фракции 1 мкм в четырех сечениях испарительной камеры свидетельствуют, что, несмотря на интенсивное вращение потока, такие мелкие капли почти полностью выносятся из испарителя и не оседают на его стенках. Напротив, капли самой крупной фракции (100 мкм) оседали еще в завихрителе и почти не попадали в испарительную камеру.

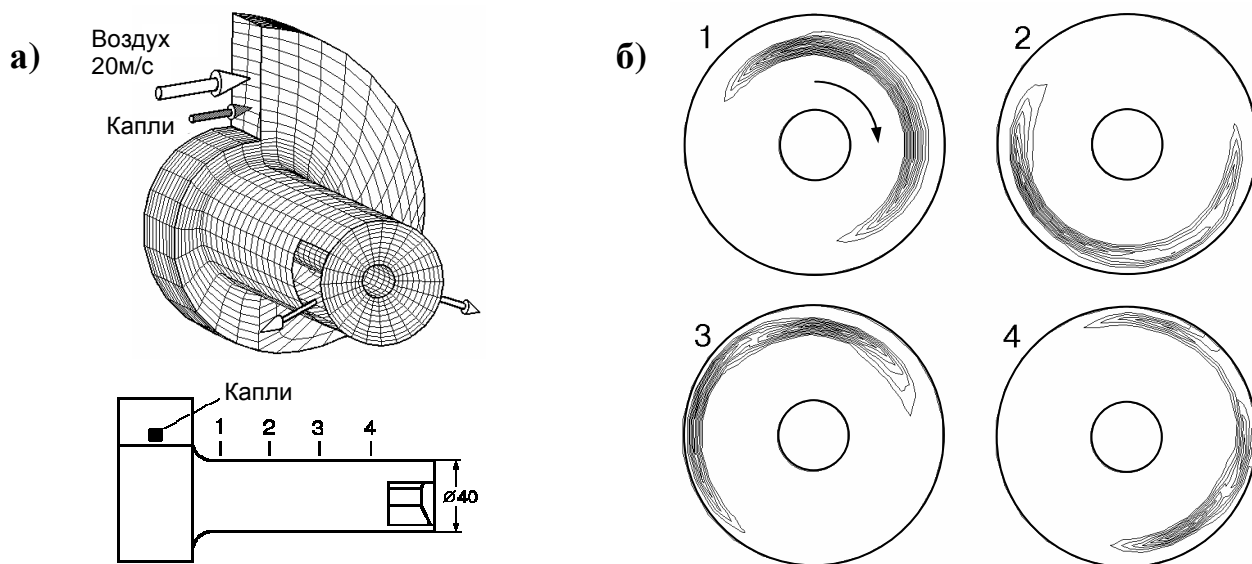
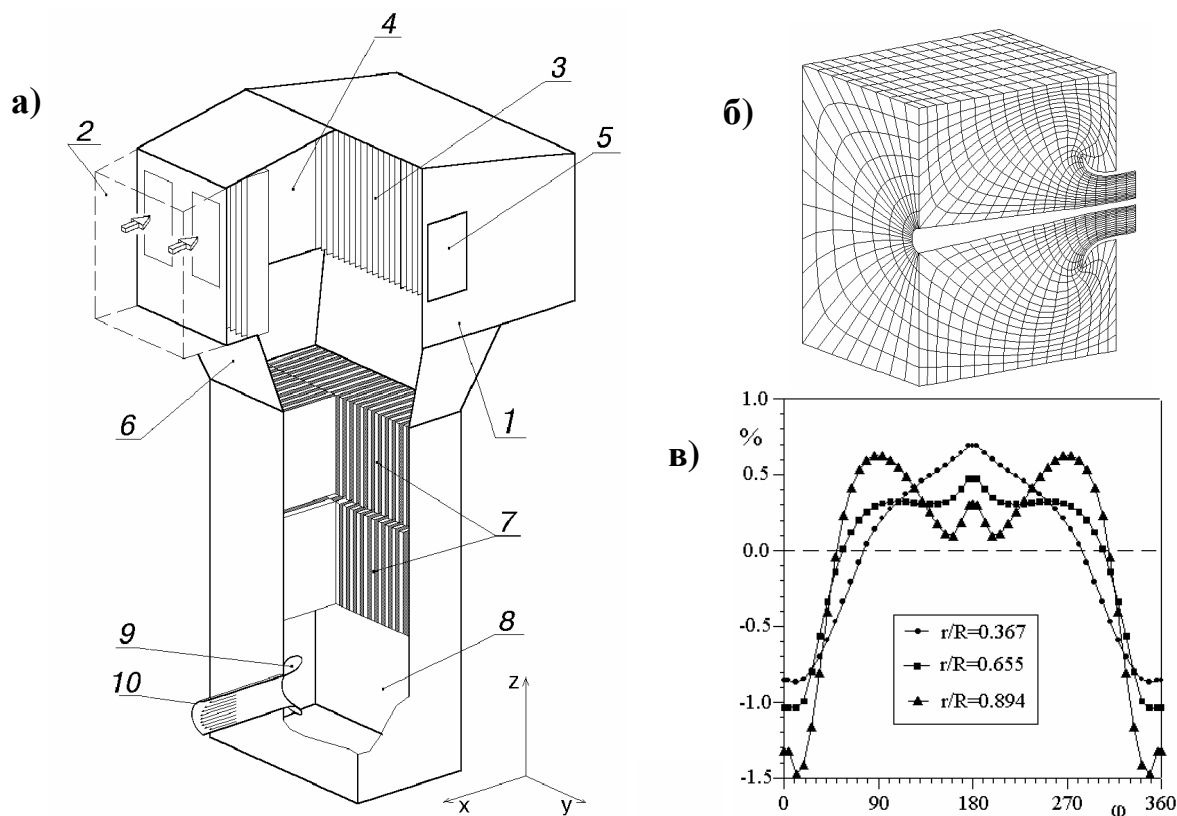


Рисунок 6 – Расчет течения газозвеси в модельной конфигурации устройства гомогенного смесеобразования: а) схема, б) изолинии концентрации частиц фракции 1 мкм в сечениях испарительной камеры

В разделе 5.2 представлены результаты выполненных с помощью ПК SINF по заказам промышленных предприятий расчетов сложных трехмерных течений в проточных частях турбомашин (входной тракт, регулирующие клапаны, лопаточные решетки, выхлопной патрубок) с целью оценки их аэродинамической эффективности.

Один из первых (середина 90-х) примеров применения ПК SINF для расчетного анализа сложного трехмерного течения по заказу промышленности – моделирование течения в воздухоподводящем тракте газоперекачивающих агрегатов (ГПА) «Нева-16» и «Нева-25» [25] – проиллюстрирован на рисунке 7. Целью исследования было определение потерь давления в тракте и степени неравномерности потока на выходе из него при разных условиях работы (направление ветра, степень загрязнения фильтров и др.).



1 – воздухоочистительное устройство (ВОУ); 2 – отсек ВОУ с циклонами; 3 – фильтры тонкой очистки; 4 – центральная камера ВОУ; 5 – байпасный проем; 6 – переходная камера ВОУ; 7 – шумоглушитель; 8 – камера всасывания; 9 – конфузор; 10 – воздухонаправляющий патрубок

Рисунок 7 – Расчет течения во входном тракте ГПА «Нева» с помощью кода SINF:

а) схема тракта, б) расчетная сетка для камеры всасывания 8 и воздухонаправляющего патрубка 10, в) окружная неравномерность скорости на выходе из патрубка

Основные элементы входного тракта ГПА «Нева» показаны на рисунке 7а. Поскольку выполнить сквозной расчет всего входного тракта ГПА не представлялось возможным (в то время код SINF еще не мог использовать многоблочные сетки), расчеты проводились поэлементно, с частичным наложением рассматриваемых участков для учета их взаимного влияния. В качестве примера, на рисунке 7б показана сетка для расчета течения в камере всасывания и в воздухонаправляющем патрубке. На рисунке 7в приведены полученные данные по окружной неравномерности потока на выходе из патрубка (отклонение полной скорости от среднего по окружности значения) для аварийного режима работы ВОУ (с открытыми байпасными клапанами 5) при его

поперечном расположении, который характеризуется наибольшей неравномерностью потока перед шумоглушителем.

Рисунок 8 иллюстрирует применение ПК SINF для расчета трансзвукового течения в модели выхлопного патрубка мощной паровой турбины [5, 28]. Особенностью данной турбины конструкции ЛМЗ была ее сравнительно малая длина; как следствие, жесткие ограничения накладывались и на осевую протяженность выхлопного патрубка, что привело к неприемлемо высокому уровню потерь в исходном патрубке. В результате экспериментальной отработки конструкции патрубка в лаборатории ЛМЗ потери удалось значительно снизить, главным образом, за счет подбора оптимальной формы осерадиального диффузора и установки в нем кольцевого профилированного дефлектора. Однако при приближении к номинальному режиму наблюдался быстрый рост потерь, что наводило на мысль о появлении в потоке скачков уплотнения (вопреки результатам гидравлических расчетов ЛМЗ). Для прояснения ситуации и поиска оптимального решения проблемы и был привлечен аппарат численного моделирования.

Расчеты проводились для уменьшенной (1:25) модели патрубка, испытанной на воздушном стенде в лаборатории ЛМЗ. Схема патрубка с кольцевым дефлектором в осерадиальном диффузоре показана на рисунке 8а. Рисунок 8б дает представление об использованной для расчетов сетке (240 тысяч ячеек в 14 блоках). Рисунок 8в демонстрирует хорошее согласие результатов расчета (ромбы) с опытными данными ЛМЗ (линия) по коэффициенту потерь, включая аномальный рост потерь при значениях числа Маха на входе в диффузор $M_1 > 0.5$, что лишний раз подтвердило достоверность результатов численного моделирования.

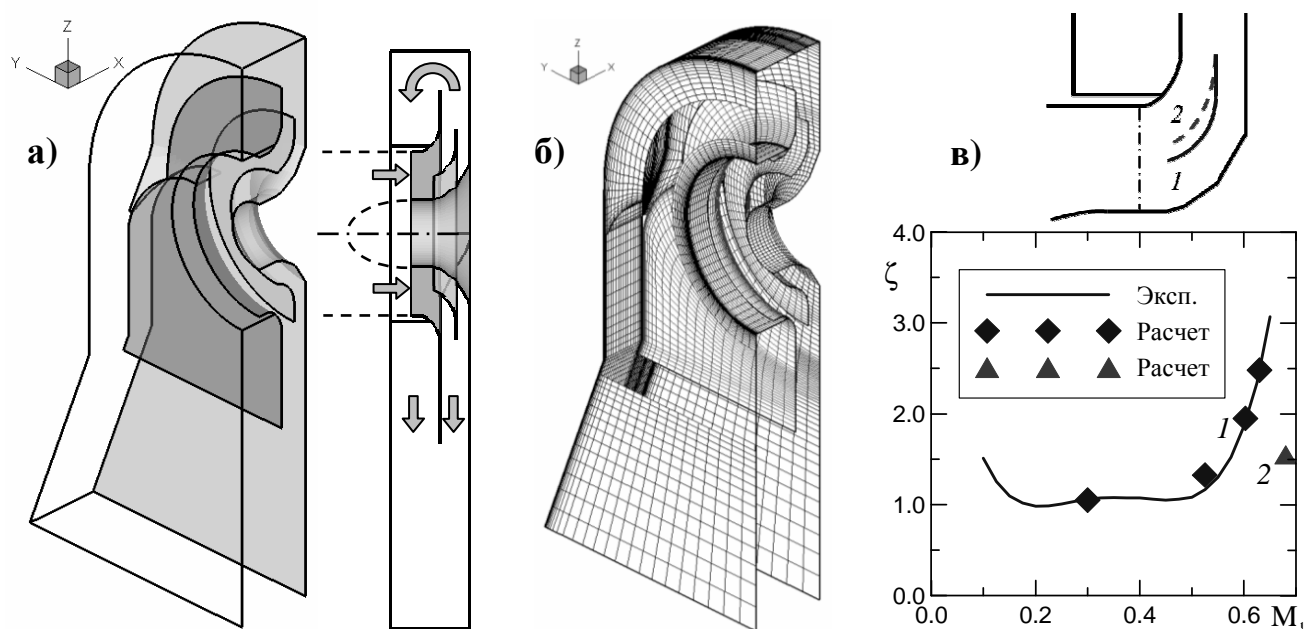


Рисунок 8 – Модель выхлопного патрубка паровой турбины: а) схема, б) расчетная сетка, в) расчетные и опытные данные по коэффициенту потерь (1 – исходная форма дефлектора, 2 – предлагаемый вариант)

Что касается выяснения причин упомянутого роста потерь, то, как показал расчет, из-за обратного влияния патрубка течение в диффузоре является существенно несимметричным. В частности, при расходе, близком к номинальному, на выходе из осерадиального диффузора в его нижней части образуется обширная область сверхзвукового течения с интенсивным скачком уплотнения на выходе из нее, тогда как в верхней части диффузора течение дозвуковое. При этом, как показал анализ полученного решения, форма дефлектора ЛМЗ не отвечала линиям тока «естественного» течения в диффузоре, что приводило к значительному отличию скоростей в каналах по разные стороны от дефлектора и способствовало более раннему «запиранию» одного из каналов. Исходя из этого была предложена новая, улучшенная форма дефлектора, которая, по результатам расчета, обеспечила уменьшение интенсивности скачков, что, в свою очередь, привело к двукратному снижению потерь напора в патрубке на номинальном режиме ($M_1 = 0.65$, см. рисунок 8в).

Один из ранних примеров применения ПК SINF для моделирования аэродинамики проточной части регулирующих клапанов (РК) паровых турбин [3, 26] представлен на рисунке 9. Цель расчетов – сопоставительный анализ течения и потерь давления в РК исходной и новой улучшенной конструкции. На рисунке 9а проиллюстрированы основные детали геометрии улучшенного клапана и использованная для расчетов сетка, содержащая 80 тысяч ячеек (с учетом симметрии сетка покрывает половину проточной части); рисунок 9б демонстрирует отличие двух вариантов геометрии клапана.

Необходимость проведения расчета в трехмерной постановке обусловлена боковым подводом пара в РК, что приводит, в частности, к образованию за клапаном пары интенсивных продольно ориентированных вихревых жгутов (рисунок 9в): в сечении B максимальная поперечная скорость достигает 40% среднерасходной скорости, в сечении Γ она снижается до 25%. В то же время наиболее ответственные элементы (чашка клапана, седло, выходной диффузор) обладают осевой симметрией, что позволило использовать осесимметричную (2D) постановку для предварительного анализа структуры течения и потерь давления в РК. В качестве примера, на рисунках 9г и 9д показаны полученные в 2D расчете картины течения для двух вариантов геометрии РК. Как можно видеть, в исходном варианте (рисунок 9д) значительно больше застойная зона за клапаном, которая считается одним из источников вибрации, сокращающей срок службы клапана. Также налицо неудачная форма выходного диффузора исходного РК – из-за уступов (влияние которых на потери напора считалось незначительным) течение принимает ярко выраженный струйный характер с обширной областью вихревых потерь на периферии. Как следствие, по результатам 2D расчета потери напора в исходном РК оказались почти в два раза больше, чем в новом: $\Delta p_0/p_{0,вх} = 4.0\%$ и 2.1% соответственно. Учет трехмерных эффектов не оказал существенного влияния на потери (2.3% для нового РК). Расчетные данные по потерям показали хорошее согласие с результатами стендовых испытаний (3.8% и 2.0%).

Таким образом, проведенные расчеты продемонстрировали, что реализованные в ПК SINF математические модели и численные методы позволяют объективно оценивать качество проточной части РК и получать детальную информацию о структуре потока и локальных источниках потерь. В то время (а речь идет о конце 90-х гг., когда коммерческие CFD коды еще не получили широкого распространения) это способствовало повышению доверия к результатам гидродинамических расчетов и, в частности, позволило с помощью ПК SINF выполнить по заказам промышленных предприятий ряд проектов, направленных на совершенствование аэродинамики проточных частей РК.

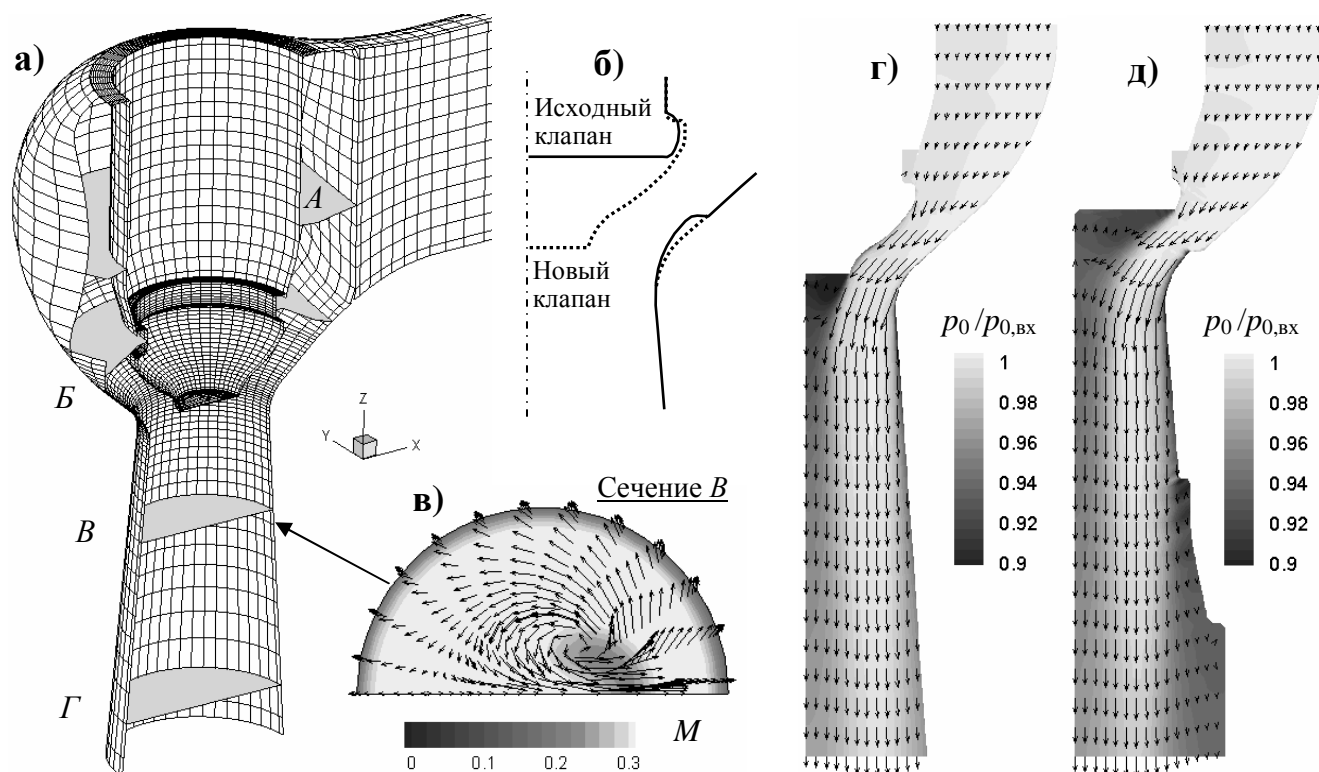


Рисунок 9 – Расчет течения в регулирующем клапане паровой турбины: а) сетка и положение контрольных сечений, б) варианты геометрии клапана, в) поле числа Маха и векторы скорости в сечении выходного диффузора, г) и д) поле полного давления и векторы скорости в осесимметричной модели РК новой (г) и исходной (д) конструкции

Лопаточные решетки являются едва ли не самым ответственным элементом проточной части турбомашин, отвечающим за эффективность преобразования энергии. Соответственно, задачи, связанные с моделированием гидродинамики лопаток, занимают видное место среди тестовых и прикладных расчетов, выполненных с помощью ПК SINF. Сюда относятся параметрические двумерные расчеты для оценки качества профилей [11], поверочные трехмерные расчеты для отработки проточной части ЦВД турбины с короткими лопатками [10, 32], расчеты в известных модельных конфигурациях со значимыми эффектами концевых перетечек [9] (Inoue, 1986) и торцевого теплообмена [39] (Langston, 1977) и др.

В качестве примера на рисунке 10 проиллюстрирован тестовый расчет течения газа сквозь решетку направляющих лопаток, для которой в Атласе турбинных решеток ЦИАМ (1990) имеются экспериментальные данные в широком диапазоне режимов (вплоть до умеренных сверхзвуковых скоростей). Для проведения расчетов использовалась трехблочная сетка размером около семи тысяч ячеек, показанная на рисунке 10а; сетка сгущена к поверхности лопатки для аккуратного разрешения пограничных слоев ($y^+ < 2$). На рисунке 10б представлены расчетные и экспериментальные распределения давления, представленного адиабатическим коэффициентом скорости $\lambda_{ад}$, по обводу профиля (в качестве режимного параметра выступает коэффициент скорости на выходе из решетки $\lambda_{2ад}$); на рисунке 10в приведены итоговые данные по коэффициенту потерь. Как можно видеть, имеет место вполне удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных во всем диапазоне скоростей.

Представленные расчеты, выполненные в конце 90-х гг., продемонстрировали возможность адекватного определения профильных потерь и учета влияния числа Маха на основе численного моделирования течения в турбинной решетке. Этот и другие подобные тесты во многом способствовали росту доверия практиков к результатам численных расчетов и позволили активно использовать ПК SINF для моделирования течения в решетках турбомашин по заказам научных и промышленных организаций.

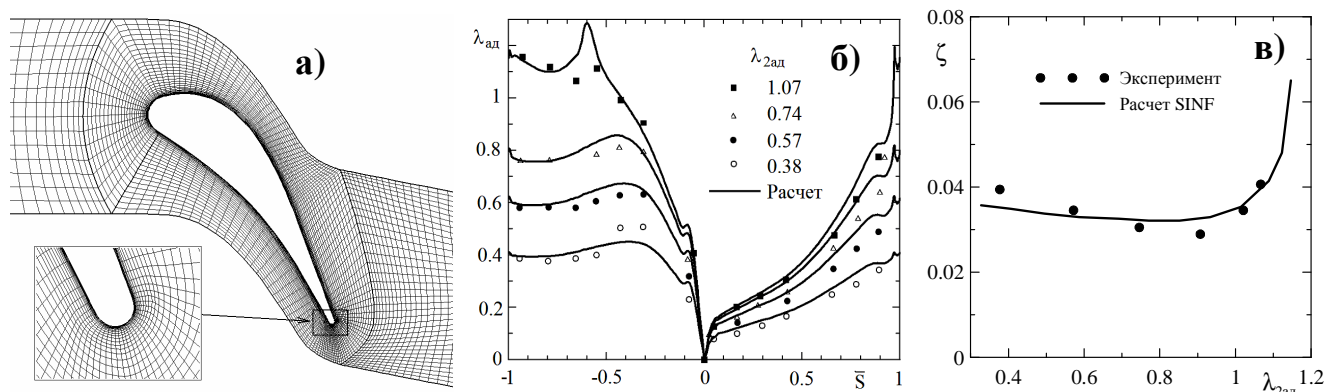


Рисунок 10 – Расчет течения в лопаточной решетке:

- а) базовая расчетная сетка, б) распределение давления по обводу профиля,
- в) зависимость коэффициента потерь от коэффициента скорости на выходе

Раздел 5.3 посвящен решению задач конвективного теплообмена в условиях сложных трехмерных потоков в элементах энергетических устройств. В частности, продемонстрировано хорошее согласие результатов численного моделирования ПК SINF с данными измерений по локальной теплоотдаче в приторцевой области турбинной решетки [39] и во вращающемся U-образном канале [4]. Представлены обширные расчеты [5, 7, 35], направленные на исследование структуры потока и условий охлаждения тепловыделяющих элементов при естественной вентиляции сухого хранилища отработанного ядерного топлива; эти сведения дают базис для более достоверной оценки надежности и безопасности хранилища при разных режимах его эксплуатации.

В качестве примера использования специализированного кода ПГС-ТК, разработанного на базе ПК SINF по заказу СПбАЭП для моделирования тепломассопереноса в защитной оболочке энергоблока АЭС, на рисунке 11 представлен расчет течения паро-воздушной смеси [20] в крупно-масштабном стенде (КМС) со всеми основными процессами (включая конденсацию пара), определяющими пассивный отвод тепла от защитной оболочки, и условиями, максимально приближенными к натурным. Рисунок 11а иллюстрирует геометрию расчетной области, которая покрывает все пять этажей стенда КМС. В расчетной модели учтены открытые двери и люки, через которые пар из подвального помещения проходит с этажа на этаж и, в итоге, попадает в подкупольное пространство стенда, где находятся четыре трубчатых теплообменника (в расчете они моделируются изогнутыми пластинами 1-4 с той же площадью теплосъема). Сетка содержит $3 \cdot 10^6$ ячеек; значение нормированной пристенной координаты y^+ для первой (пристенной) ячейки составляет около 1 на поверхности теплообменников и около 3 на внешних стенках КМС.

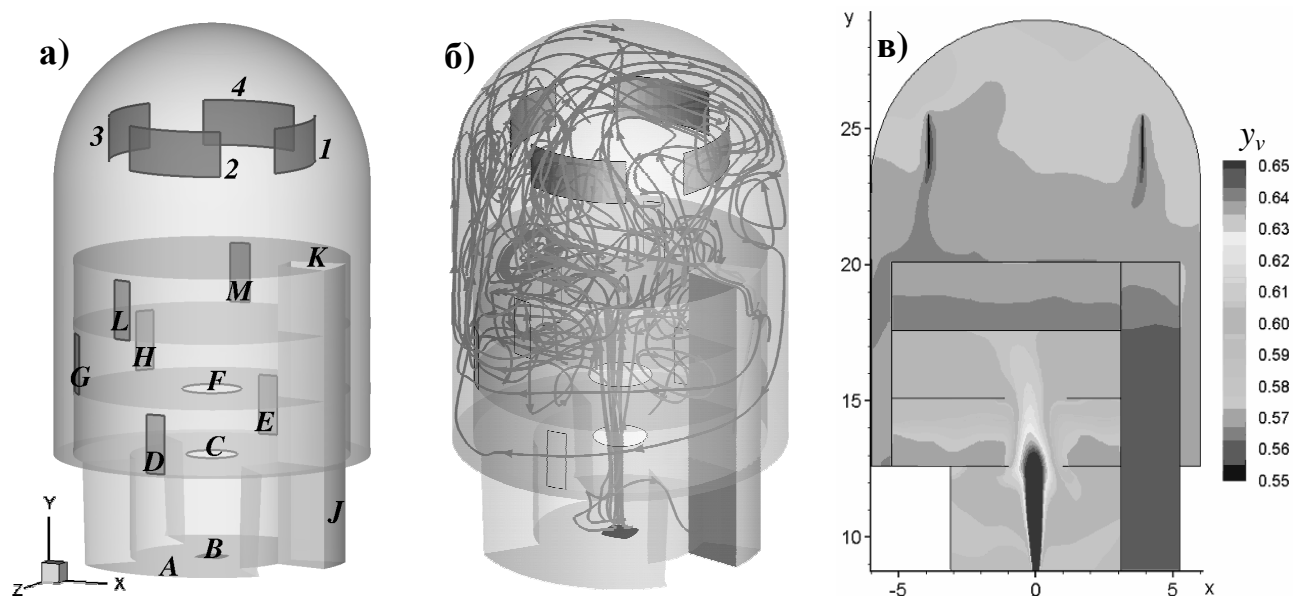


Рисунок 11 – Расчет течения парогазовой смеси в стенде КМС: расчетная область (а), мгновенная картина линий тока (б) и поле массовой доли пара в среднем сечении (в)

Полученные результаты демонстрируют существенную нестационарность течения и некоторую асимметрию поступления пара в подкупольное пространство, связанную с ориентацией проемов. Сложные и довольно хаотичные линии тока (рисунок 11б) свидетельствуют о наличии крупных вихревых структур, случайные перемещения которых создают пульсации теплового потока на теплообменниках (в расчете амплитуда этих пульсаций составляла около 10%). Также можно отметить довольно хорошее перемешивание среды почти по всему объему стенда КМС. Расхождение расчетных и экспериментальных данных как по снимаемой мощности, так и по уровню давления, составляет около 5%.

В настоящее время код ПГС-ТК используется в СПБАЭП для моделирования тепломассопереноса (включая транспорт водорода) и анализа эффективности работы различных вариантов системы пассивного отвода тепла с целью оценки безопасности АЭС в условиях возможной аварии.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

1) Разработаны математические модели для описания различных классов течений, таких как: до- и сверхзвуковые течения газа и несжимаемой жидкости, течения с дисперсными частицами, течения в областях с изменяющейся геометрией, свободная и смешанная конвекция многокомпонентной парогазовой смеси при наличии конденсации, течения жидкости со свободной поверхностью.

Основу математической модели составляют общие уравнения баланса массы, импульса и энергии в потоке вязкой жидкости переменной плотности – уравнения Навье-Стокса. В случае турбулентного течения для замыкания уравнений используется одна из полуэмпирических моделей турбулентности. Для моделирования специальных классов течений привлекаются: метод пробных частиц (Лагранжево описание дисперсной фазы), модель диффузионного массопереноса и равновесной конденсации в многокомпонентной среде, метод деформируемых расчетных сеток, метод VOF (Volume of Fluid).

2) Разработаны численные схемы и алгоритмы, с помощью которых сформулированные математические модели реализованы в виде комплекса программ SINF для решения широкого круга задач гидрогазодинамики и тепломассопереноса с использованием блочно-структурированных расчетных сеток, «вписанных» в границы области течения. Аппроксимация определяющих уравнений выполнена по методу конечного объема со вторым порядком точности по времени и пространству. Для решения системы линейных уравнений относительно приращений искомых величин используются эффективные проекционные методы на основе подпространств Крылова. Распараллеливание вычислений осуществлено по технологии MPI с декомпозицией задачи по блокам сетки.

3) Разработаны программы для создания и модификации расчетных сеток, а также для визуализации и анализа результатов расчета. Наличие собственных средств пре- и постпроцессинга в составе программного комплекса (ПК) SINF обеспечило эффективное использование комплекса задолго до появления в России доступных аналогов.

4) В ходе отработки и совершенствования численных схем и алгоритмов ПК SINF предложены оригинальные элементы разработанной численной методики, такие как:

– эффективный алгоритм обеспечения баланса массы в потоках несжимаемой жидкости и низкоскоростных потоках газа, основанный на комбинации метода искусственной сжимаемости и метода SIMPLEC;

– метод постановки граничных условий (обобщенные пристенные функции), обеспечивающий снижение зависимости результатов расчета турбулентных течений от густоты сетки в пристенной области;

– метод аппроксимации конвективной части уравнений гидродинамики, обеспечивающий более высокую точность расчета течений жидкости со свободной поверхностью в методе VOF по сравнению с традиционными схемами;

– эффективный безытерационный алгоритм деформации структурированной сетки в соответствии с перемещением ограничивающих поверхностей для проведения расчетов в областях с изменяющейся геометрией;

– алгоритм разбивки блочно-структурированной сетки на подблоки для проведения вычислений в параллельном режиме на заданном числе процессоров.

5) Проведено систематическое тестирование математической модели и численной методики ПК SINF путем сравнения результатов решения модельных задач с известными аналитическими решениями, с имеющимися в литературе «эталонными» численными решениями, с результатами расчета по другим кодам (в частности, ANSYS Fluent), с данными измерений.

6) Выполнены исследовательские расчеты течения и теплопереноса в модельных конфигурациях (колебание тел в потоке, натекание потока на препятствие и др.) для лучшего понимания структуры исследуемых потоков и выявления присущих им особенностей и закономерностей. В частности, посредством математического (численного) моделирования:

– впервые показано, что значимый эффект энергоразделения в вихревой трубе (эффект Ранка) может иметь место при ламинарном режиме течения;

– обнаружено, что при натекании жидкости на препятствие возможно образование обширных отрывных зон в придонной области течения, которые приводят к значительным искажениям формы свободной поверхности, наблюдаемым в эксперименте.

7) С помощью ПК SINF по заказам промышленных предприятий выполнены расчеты сложных трехмерных течений в проточных частях турбомашин (входной тракт, регулирующие клапаны, лопаточные решетки, выхлопной патрубок) с целью оценки их аэродинамической эффективности. Проведен глубокий анализ структуры течения, выявлены основные источники потерь. В ряде случаев выработаны конкретные рекомендации по изменению геометрии проточной части для снижения потерь давления.

8) Проведено численное моделирование течения и тепломассопереноса в элементах энергетических устройств для более достоверной оценки их надежности и безопасности. В частности, исследованы особенности охлаждения тепловыделяющих элементов при естественной вентиляции сухого хранилища отработанного ядерного топлива. Выполнено моделирование течения и конденсации пара в защитной оболочке энергоблока АЭС для анализа работы системы пассивного отвода тепла в условиях возможной аварии.

Публикации по теме диссертации

*Публикации в журналах и изданиях, включенных в Перечень ВАК
или в одну из баз данных и систем цитирования Web Of Science, Scopus*

1. Baranov, V.A. The Ranque's effect in a laminar flow / V.A. Baranov, E.M. Smirnov, Yu.A. Vikultsev, D.K. Zaitsev // J. Engineering Thermophysics. – 1996. – Vol. 6, No. 4. – P. 291-306.
2. Zaitsev D.K., Smirnov E.M. Effect of compressibility on vortex breakdown in a gas flow in a circular tube // Fluid Dynamics. – 1996. – Vol. 31, Issue 5. – P. 661-665.
3. Агафонов, Б.Н. Турбулентный поток в регулирующих клапанах паровых турбин: возможности численного моделирования в условиях реальной геометрии / Агафонов Б.Н., Д.К. Зайцев, А.И. Кириллов, В.Г. Колыванов, В.В. Рис, Е.М. Смирнов // Известия РАН. Энергетика. – 2000. – № 3. – С. 39-46.
4. Kirillov, A.I. Numerical simulation of local heat transfer in rotating two-pass square channels / A.I. Kirillov, V.V. Ris, E.M. Smirnov, D.K. Zaitsev // Annals of the New York Academy of Sciences. – 2001. – Vol. 934. – P. 456-463.
5. Смирнов, Е.М. Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии / Е.М. Смирнов, Д.К. Зайцев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского технического университета. – 2004. – № 2 (36). – С. 70-81.
6. Smirnov, E. Computations of internal flows using an artificial-compressibility solver enhanced with an elliptic pressure-correction procedure / E. Smirnov, D. Zaitsev // ECCOMAS 2004 – European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. – 13 p. (URL: <http://www.mit.jyu.fi/eccomas2004/proceedings/pdf/161.pdf>)
7. Blinov, M.A. Natural and mixed convection heat transfer of a cooling air in fissile material and spent fuel storage facilities / M.A. Blinov, M.E. Lebedev, I.S. Mukhina, L.A. Feldberg, B.S. Fokin, D.K. Zaitsev, E.L. Kitanin, V.Yu. Mityakov, V.V. Ris, E.M. Smirnov, Yu.S. Chumakov et al. // Heat Transfer Research. – 2005. – Vol. 36, No. 4. – P. 295-309.
8. Зайцев, Д.К. Применение деформируемых сеток для численного моделирования течений в областях с подвижными границами / Д.К. Зайцев, Н.А. Щур // Научно-технические ведомости СПбГТУ. – 2006. – № 5/1 (47). – С. 15-22.
9. Зайцев, Д.К. Опыт параллелизации вычислений при расчете отрывных течений на основе трехмерных нестационарных формулировок / Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов, П.Е. Смирнов, Н.А. Щур, С.А. Якубов // Вычислительные методы и программирование. – 2007. – Т.8, №1. – С. 99-106.
10. Ermolaev, V.V. Development of elements for the modernized flow path of a T-100-12.8 steam turbine by the methods of computational aerodynamics / V.V. Ermolaev, N.N. Gudkov, A.N. Babiev, V.I. Kirillov, S.A. Koshelev, D.K. Zaitsev, V.V. Ris, E.M. Smirnov // Thermal Engineering. – 2007. – Vol. 54, No. 4. – P. 276-281.
11. Кириллов, А.И. Опыт тестовых и параметрических расчетов турбулентного течения через трансзвуковые турбинные решетки / А.И. Кириллов, Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов, С.А. Галаев // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2008. – № 2(18). – С. 72-81.
12. Shchur, N.A. Numerical simulation of turbulent flows for free and forced vibrations of bodies in a flow / N.A. Shchur, D.K. Zaitsev // Heat Transfer Research. – 2008. – Vol. 39. – No. 8. – P. 661-670.
13. Зайцев, Д.К. Моделирование турбулентных течений газозвеси в областях сложной геометрии на основе подхода Лагранжа-Эйлера / Д.К. Зайцев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2008. – № 3 (59). – С. 61-67.

14. Зайцев, Д.К. Параллелизация гидродинамических расчетов на блочно-структурированных сетках / Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов, С.А. Якубов // Программные продукты и системы. – 2009. – № 3. – С. 148-150.
15. Zaitsev, D.K. Numerical simulation of 3D turbulent flows around bodies subjected to vortex-induced and forced vibration / D.K. Zaitsev, N.A. Schur, E.M. Smirnov // Lecture Notes in Computational Science and Engineering. – 2009. – Vol. 67. – P. 347-354.
16. Khrabry, A.I. Solving the convective transport equation with several high-resolution finite volume schemes. Test computations / A.I. Khrabry, E.M. Smirnov, D.K. Zaytsev // In: Computational Fluid Dynamics 2010. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. – 954p. – P. 535-540.
17. Зайцев, Д.К. Комплекс программ для создания блочно-структурированных сеток / Д.К. Зайцев, П.Е. Смирнов, С.А. Якубов, М.Е. Балашов // Программные продукты и системы. – 2012. – № 2. – С. 32-35.
18. Храбрый, А.И. Влияние модели турбулентности на результаты расчета обтекания препятствия потоком воды после обрушения дамбы / А.И. Храбрый, Е.М. Смирнов, Д.К. Зайцев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – №1 (165). – С. 182-187.
19. Храбрый, А.И. Численное моделирование течений со свободной поверхностью на основе метода VOF / А.И. Храбрый, Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н.Крылова. – 2013. – Вып. 78 (362). – С. 53-64.
20. Zaitsev, D.K. Numerical modeling of steam-gas flow in NPP containment with VVER and passive heat removal / D.K. Zaitsev, E.M. Smirnov, A.A. Smirnovskii, V.V. Bezlepkin, M.A. Zatevakhin, O.I. Simakova, S.E. Semashko, R.A. Sharapov // Atomic Energy. – 2014. – Vol. 115, No. 4. – P. 246-252.

Прочие публикации

21. Баранов, В.А. Экспериментальное и численное моделирование трехмерной циркуляции парогазовой среды при ее струйном истечении в подкупольное пространство контейнента / В.А. Баранов, Ю.А. Викульцев, Д.К. Зайцев, В.В. Рис, Е.М. Смирнов // Препринт ЭНИЦ N L-14-06-95. – Электрогорск. – 1995. – 21 с.
22. Zaitsev, D. Numerical simulation of turbulent particle-laden flows using lagrangian modelling of dispersed phase behaviour / D. Zaitsev // Report of the grant «Research in Brussels-95». – VUB, Brussels, 1996. – 114 p.
23. Зайцев, Д.К. Об условиях возникновения возвратного течения в неизотермическом закрученном потоке газа / Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов // В кн: Процессы горения и охрана окружающей среды. Сб. трудов РГАТА, Ч.1. – Рыбинск, 1997. – с.19-22.
24. Зайцев, Д.К. Метод пробных частиц в приложении к расчету течений газа с частицами / Д.К. Зайцев // В кн.: «Внутрикамерные процессы, горение и динамика дисперсных систем» (Сб. материалов 2-й международной школы-семинара, Санкт-Петербург, 30 июня - 5 июля 1997г.). – СПб.: БГТУ, 1997. – 190 с. – С. 107-109.
25. Кувайцева, И.Р. О проектировании входных трактов ГПА "Нева-16" и "Нева-25" на основе численного моделирования пространственных течений / И.Р. Кувайцева, С.Х. Сизова, В.М. Юрочкин, Д.К. Зайцев, А.И. Кириллов, В.В. Рис, Э.А. Рудинский, Е.М. Смирнов // Турбины и компрессоры. – 1998. – Вып. 6,7. – С. 5-13.
26. Agaphonov, V.N. Simulation of 3D turbulent flow through steam-turbine control valve / V.N. Agaphonov, V.D. Goryachev, V.G. Kolyvanov, V.V. Ris, E.M. Smirnov, D.K. Zaitsev // In: Finite Volumes for Complex Applications II. – Hermes Sci. Publ., Paris, 1999. – 889 p. – P. 743-750.

27. Зайцев, Д.К. Численное моделирование турбулентных отрывных течений газа в осерадиальных диффузорах турбомашин / Д.К. Зайцев, М.А. Николаев, В.В. Рис, Е.М. Смирнов // В кн.: Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования (Тр. международной научно-техн. конф., Харьков, 18-22 сентября 2000г.). – Харьков. – 2000. – С. 257-264.

28. Epiphanov, V.K. Effect of deflector vane geometry on performance of large-scale turbine exhaust hood at transonic flow conditions: air-test experiments and 3D numerical simulation / V.K. Epiphanov, V.D. Gaev, A.S. Lisyanskiy, A.I. Kirillov, M.A. Nikolaev, E.M. Smirnov, D.K. Zaitsev // 5th European Conf. on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, March 17-22, 2003, Prague, Czech Republic. Ed. by: M.Stastny, C.H.Sieverding, G.Bois. – Prague, 2003. – 1238 p. – P. 803-812.

29. Смирнов, Е.М. Применение параллельных вычислений для моделирования турбулентных течений в областях сложной геометрии / Е.М. Смирнов, А.Г. Абрамов, Д.К. Зайцев, Н.Г. Иванов, П.Е. Смирнов, С.А. Якубов // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Параллельные вычисления в задачах математической физики», 21-25 июня 2004г., Ростов-на-Дону. – РГУ, 2004. – С. 132-141.

30. Щур, Н.А. Применение метода деформируемых сеток для моделирования автоколебаний цилиндра в однородном потоке / Н.А. Щур, Д.К. Зайцев // Тр. XV школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 23 - 27 мая 2005 г., Калуга, т. 1. – М.: Изд. МЭИ, 2005. – С. 125-129.

31. Smirnov, E.M. Modification of wall boundary conditions for Low-Re $k-\omega$ turbulence models aimed at grid sensitivity reduction / E.M. Smirnov, D.K. Zaitsev // European Conference for Aerospace Sciences, July 4-7, 2005, Moscow (EUCASS 2005) [CD-ROM]. – Paper ID 2.09.06. – 7p.

32. Ермолаев, В.В. Применение численного моделирования пространственных течений вязкого газа для совершенствования элементов проточной части ЦВД турбины Т-100-130 / В.В. Ермолаев, Н.Н. Гудков, А.Н. Бабиев, В.И. Кириллов, С.А. Кошелев, Е.М. Смирнов, В.В. Рис, Д.К. Зайцев // Международная науч.-техн. конф. «Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования», 19-22 сентября 2006, Харьков [CD-ROM]. – 11 с.

33. Абрамов, А.Г. Вопросы обучения технологиям параллельных вычислений и использования распараллеленных программных средств на удаленных компьютерах / А.Г. Абрамов, В.Д. Горячев, Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов // Электронное издание «Наука и образование».– 2006.– № 9.– 5 с. (URL: <http://technomag.edu.ru/doc/60390.html>).

34. Щур, Н.А. Численное моделирование турбулентных течений для свободных и вынужденных колебаний тел в потоках / Н.А. Щур, Д.К. Зайцев // Труды XVI школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 21 - 25 мая 2007 г., С.-Петербург, Т.2. – М.: Изд. МЭИ, 2007. – С.197-200.

35. Fokin, B.S. Simulation of the cooling air heat transfer and convection in the spent nuclear fuel storage / B.S. Fokin, V.N. Fromzel, M.E. Lebedev, M.A. Blinov, D.K. Zaitsev, E.L. Kitanin, V.V. Ris, E.M. Smirnov, A.G. Fedorov, Yu.S. Chumakov // Advances in Heat Transfer (5th Baltic Heat Transfer Conference, 19-21 Sept., 2007, St. Petersburg) [CD-ROM]. – St. Petersburg. – 2007. – 7p.

36. Zaitsev, D.K. Numerical simulation of 3D turbulent flows around bodies subjected to vortex-induced and forced vibration / D.K. Zaitsev, N.A. Schur, E.M. Smirnov // Int. Conf on Parallel Computational Fluid Dynamics, May 21-24, 2007, Antalya, Turkey (Parallel CFD 2007). CD-ROM Proceedings. – 2007. – Paper ParCFD-2007-072. – 5 p.

37. Зайцев, Д.К. Численное исследование турбулентных течений около колеблющихся тел на основе трехмерных вихре-разрешающих подходов / Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов, Н.А. Щур // Труды международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии» (ПаВТ'2008, Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля 2008г.). – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2008. – 599 с. – С. 101-106.
38. Zaitsev, D. Visual analysis of turbulent whirl over a cantilevered flexible blade after 3D numerical simulation / D. Zaitsev, N. Schur, E. Smirnov, V. Goryachev // Proc. 13th Int. Symp. on Flow Visualization (ISFV13), July 1-4, 2008, Nice, France. – Vol.1. – 595p. – P. 309-318.
39. Levchenya, A.M. Numerical simulation of the endwall heat transfer in the Langston cascade / A.M. Levchenya, E.M. Smirnov, D.K. Zaytsev // Int. Symp. on Heat Transfer in Gas Turbine Systems, 9-14 August, 2009, Antalya, Turkey (Turbine-09). CD-ROM proceedings.– Begell House, Redding, 2009. – Paper 9 EW. – 8 p.
40. Зайцев, Д.К. Опыт разработки и верификации 4D-кода для расчетного анализа тепломассообменных процессов при течении парогазовой среды в областях сложной геометрии / Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов, А.А. Смирновский, В.В. Безлепкин, С.Е. Семашко, Р.А. Шарапов // Тр. XIV международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование» (г. Саров, 1-5 октября 2012 г.). – Саров: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2013. – 624 с. – С. 282-292.
41. Зайцев, Д.К. Расчет течений со свободными поверхностями: влияние схемных факторов и модели турбулентности / Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов, А.И. Храбрый // Труды XIV международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование» (г. Саров, 1-5 октября 2012 г.). – Саров: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2013. – 624 с. – С. 292-301.
42. Khrabry, A.I. Numerical study of wall friction effects on dam-break flows in the presence of an obstacle / A.I. Khrabry, E.M. Smirnov, D.K. Zaytsev // 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), Barcelona, Spain, July 20-25, 2014. – Paper A2973. – 2p. (URL: <http://www.wccm-eccm-ecfd2014.org/admin/files/fileabstract/a2973.pdf>)
43. Храбрый, А.И. Численное моделирование нестационарного натекания потока воды на один и два ряда трехмерных препятствий / А.И. Храбрый, Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов, В.Д. Горячев // Труды международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: многообразие суперкомпьютерных миров», Новороссийск, 22-27 сентября 2014. – М.: Изд-во МГУ, 2014. – 497с. – С.388-394.
44. Смирнов, Е.М. Опыт разработки суперкомпьютерных кодов для решения сложных задач теплогидродинамики в объектах ядерной энергетики / Е.М. Смирнов, Д.К. Зайцев, А.А. Смирновский // Межотраслевая научно-практическая конференция «Суперкомпьютерные технологии в промышленности – 2014», 17 октября 2014, Санкт-Петербург. Сборник докладов. – СПб.: Изд-во Крыловского научного центра, 2014. – 96 с. – С.45-55.
45. Зайцев, Д.К. Расчет течения и теплоотдачи в турбулентных потоках с локализованными отрывными областями на основе метода обобщенных пристенных функций / Д.К. Зайцев, Е.М. Смирнов // Тр. Шестой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-6) (27-31 октября 2014, Москва). [CD-ROM]. – М.: МЭИ, 2014. – ID C1-17. – 4 с.
46. Khrabry, A. Numerical study of separation phenomena in the dam-break flow interacting with a triangular obstacle / A. Khrabry, E. Smirnov, D. Zaytsev, V. Goryachev // 16th Int. Conf. on Modelling Fluid Flow, Budapest, Hungary, Sept. 1-4, 2015. [CD-ROM]. Paper CMFF15-144. – 8 p.