

На правах рукописи

Денисихина Дарья Михайловна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2005

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

| | |
|------------------------|--|
| Научный руководитель: | доктор физ.-мат. наук, профессор Стрелец Михаил Хаимович |
| Официальные оппоненты: | доктор технических наук профессор Емельянов Владислав Николаевич |
| | кандидат физ.-мат. наук, инженер-физик Быстрова Елена Николаевна |
| Ведущая организация : | ГУП ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, г. Санкт- Петербург |

Защита состоится 20 декабря 2005 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, корп. 1, каф. Гидроаэродинамики.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан " ____ " _____, 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.229.07, канд. физ.-мат. наук

Зайцев Д.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

Усовершенствование систем вентиляции и кондиционирования жилых и производственных помещений, общественных зданий различного назначения (стадионов, концертных залов), транспортных средств (автомобилей, железнодорожных вагонов, самолетов), обитаемых космических и подводных объектов, а также оптимизация сходных с ними систем охлаждения, используемых в самых различных технологических процессах, является исключительно важной технической задачей. Это связано, прежде всего, с необходимостью сокращения энергоресурсов, расходуемых на работу таких систем, а также с постоянным ужесточением санитарно-гигиенических норм и требований к климатическому комфорту в обитаемых помещениях. Что касается автоколебательных вентиляционных течений, являющихся основным объектом исследований данной работы, то в настоящее время известно, что автоколебания вентилирующих воздушных струй могут способствовать значительному повышению эффективности процесса вентиляции и улучшению параметров воздушной среды в вентилируемых/кондиционируемых помещениях. Однако для разработки и оптимизации систем вентиляции, в которых реализуются автоколебания потока, необходимо проведение многочисленных дорогостоящих экспериментальных исследований и натурных испытаний. В связи с этим задача построения адекватных методов численного моделирования автоколебательных вентиляционных течений, позволяющих оптимизировать конструкцию систем вентиляции и кондиционирования воздуха (В и КВ) на стадии их проектирования представляет собой актуальную научную и важную практическую задачу. Наряду с этим, решение этой задачи представляет и определенный общенаучный интерес, поскольку автоколебательные турбулентные течения (АКТТ) являются чрезвычайно интересным и малоизученным классом турбулентных течений.

Основные задачи работы состоят в следующем:

- проведение численных исследований ряда типичных автоколебательных вентиляционных течений с использованием различных подходов к моделированию турбулентности, в частности, в рамках стационарных и нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (SRANS и URANS в англоязычной литературе) и метода моделирования крупных вихрей (LES);
- анализ результатов, полученных в рамках перечисленных подходов, сравнение их между собой и с известными экспериментальными данными и формулировка на этой основе обоснованных рекомендаций по применению URANS и SRANS для расчета вентиляционных АКТТ

Научная новизна.

1. Впервые проведены систематические численные исследования ряда

вентиляционных АКТТ в рамках SRANS, URANS и LES.

2. Анализ результатов LES, впервые выполненного для нескольких сложных АКТТ, позволил установить важные физические закономерности таких течений и объяснить механизм возникновения автоколебаний.

3. Получены новые данные о возможностях и ограничениях URANS и SRANS при расчете осредненных и амплитудно-частотных характеристик АКТТ и о чувствительности этих подходов к выбору модели турбулентности.

Практическая значимость.

1. Полученные данные о границах применимости URANS при расчете вентиляционных АКТТ позволяют обоснованно использовать данный подход при проектировании систем вентиляции и кондиционирования воздуха (В и КВ).

2. Продемонстрирована высокая эффективность использования АКТТ в системах В и КВ, что должно способствовать более широкому внедрению в практику “динамических” систем вентиляции и, тем самым, - значительному сокращению затрат электроэнергии и повышению качества воздушной среды в вентилируемых/кондиционируемых помещениях.

3. На примере “динамического” воздухораспределителя показано, что анализ результатов LES позволяет формулировать конкретные рекомендации по созданию конструкций, генерирующих автоколебания потока на выходе из воздухораспределителя.

4. Накоплен опыт расчета АКТТ в рамках URANS и LES с помощью коммерческого CFD-кода STAR-CD и продемонстрирована возможность достаточно надежного решения соответствующих задач с его помощью. Этот опыт может быть применен при использовании данного кода в проектно-конструкторской практике при проектировании и оптимизации систем В и КВ.

5. На основе проведенных исследований предложены оригинальные конструкции воздухораспределителей, подтвержденные двумя патентами.

Апробация работы.

Материалы диссертации были представлены:

- на Международном форуме "Повышение эффективности работы систем тепло-, газо-, водоснабжения, отопления и вентиляции" (Москва, 2005 г).
- на XV школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках” (Калуга, 2005);
- на Второй конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH” (Москва, 2002);
- на Четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH” (Москва, 2004);
- на VIII Международной научно-практической конференции "Экология и жизнь" (Пенза, 2005).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ и получено 2 патента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 104 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, и 74 литературные ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении подробно обосновываются актуальность и практическая значимость темы диссертации, формулируются основные задачи исследования, и кратко излагается содержание отдельных глав работы.

В первой главе диссертации представлен обзор различных подходов к моделированию АКТТ (DNS, LES, SRANS, URANS) и проведен анализ известных из литературы данных о применении URANS к задачам внешней аэродинамики, наиболее полно изученным в настоящее время в рамках данного подхода.

Основные выводы из проведенного обзора сводятся к следующему.

Как и на протяжении многих предшествующих лет, наиболее популярным подходом к решению прикладных задач, связанных с расчетом турбулентных течений, в настоящее время остаются стационарные уравнения Рейнольдса (SRANS), замкнутые с помощью тех или иных полуэмпирических моделей турбулентности. Вместе с тем, богатый опыт применения таких моделей, свидетельствует о том, что они не обеспечивают достаточной для практики точности расчета АКТТ, для которых характерно наличие относительно устойчивых принципиально трехмерных нестационарных структур с размерами порядка макро-масштаба течения. Такие структуры принято называть “когерентными” (это подчеркивает их относительную упорядоченность и устойчивость), а течения, в которых они играют существенную роль, - автоколебательными.

С другой стороны, вычислительные ресурсы, необходимые для использования при расчете таких течений методом LES и, тем более, DNS, которые, в принципе, позволяют с высокой степенью точности предсказать характеристики АКТТ, настолько велики, что их широкое применение для решения прикладных задач станет возможным не ранее, чем через 40-50 лет.

В связи с этим, в последнее время для расчета АКТТ достаточно широкое применение получил более экономичный подход, базирующийся на нестационарных уравнениях Рейнольдса (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes equations или URANS). Несмотря на то, что теоретическое обоснование правомерности URANS по существу отсутствует, а имеющийся опыт практического использования этого подхода ограничен в основном внешними течениями и недостаточен для формулировки каких-либо общих выводов о границах его применимости для других классов АКТТ, анализ литературы свидетельствует о том, что данный подход представляет значительный интерес для практических приложений, связанных с расчетом АКТТ в системах В и КВ. Однако, для его обоснованного применения к данному классу течений, необходимо проведение специальных численных исследований аналогичных рассмотренным в Главе 1 исследованиям, посвященным решению задач внешней аэродинамики.

Указанные обстоятельства определили сформулированные выше основные задачи данной работы.

Во **второй главе** диссертации представлено краткое описание математических моделей и вычислительных алгоритмов, использовавшихся при проведении расчетов, результаты которых излагаются в двух последующих главах.

Прежде всего, следует отметить, что подавляющее большинство этих расчетов выполнено с помощью коммерческого пакета STAR-CD¹⁾. Данный выбор обусловлен двумя причинами. Во-первых, этот пакет достаточно хорошо зарекомендовал себя не только при проведении расчетов в рамках RANS, но и с помощью LES, что является принципиально важным для настоящей работы. Во вторых, STAR-CD весьма интенсивно применяется в России, в связи с чем, получение новых данных о его возможностях является важным “побочным” результатом исследований.

Выбор конкретных моделей турбулентности и вычислительных алгоритмов из достаточно широкого спектра, моделей и алгоритмов, реализованных в STAR-CD был сделан на основе изучения литературы, посвященной моделированию автоколебательных течений в рамках URANS и LES, а также в результате предварительных численных экспериментов с различными моделями и алгоритмами.

В частности, при использовании подходов, основанных на RANS, в работе использовались стандартная k - ϵ модель, k - ω SST модель Ментера и нелинейная (квадратичная) k - ϵ модель, которые можно рассматривать как достаточно репрезентативную группу наиболее популярных полуэмпирических моделей турбулентности. Наряду с этим, в некоторых расчетах использовалась модель турбулентности с одним уравнением для турбулентной вязкости ν_t – 92, предложенная А.Н. Секундовым с соавторами и рассматриваемая в настоящее время как одна из наиболее простых и надежных моделей для расчета струйных течений²⁾.

При проведении LES расчетов в настоящей работе использовалась модель подсеточной вязкости Смагоринского, которая, несмотря на свою простоту, обеспечивает надежное предсказание самых разнообразных турбулентных течений.

Что касается численных методов, то для решения рассмотренных задач из имеющихся в STAR-CD вычислительных алгоритмов были выбраны следующие.

Для расчета поля скорости и давления использовалась процедура PISO. При этом аппроксимация конвективных членов осуществлялась с помощью противопоточной схемы второго порядка точности (MARS), а для аппроксимации вязких членов использовалась стандартная симметричная схема второго порядка точности.

При проведении нестационарных расчетов в рамках URANS интегрирование по времени осуществлялось с помощью неявной двухслойной схемы первого порядка точности, а при проведении LES – с помощью схемы Кранка-Николсона второго порядка.

Для решения систем линейных уравнений, получающихся в результате дискретизации исходных дифференциальных уравнений с помощью указанных схем, в зависимости от размера используемой расчетной сетки, использовался либо метод сопряженных градиентов (CG), либо алгебраический многосеточный метод (AMG).

Третья и четвертая главы диссертации посвящены численному моделированию различных автоколебательных вентиляционных течений и составляют основное содержание диссертации.

Так, **в третьей главе** рассмотрена задача об истечении плоской воздушной струи в прямоугольную полость (“тупик”), заполненную либо воздухом, либо инородным газом (метаном и углекислым газом).

¹⁾ Автор выражает признательность СПбГУНиПТ за предоставленную им возможность использования лицензионной версии этого пакета

²⁾ Эти расчеты проводились по программе, предоставленной К.В. Беляевым, которому автор также выражает искреннюю благодарность.

Согласно имеющимся экспериментальным данным, в зависимости от конкретных геометрических и режимных параметров конструкции, при этом могут реализовываться как стационарные в статистическом смысле, так и автоколебательные турбулентные течения. В последнем случае в полости наблюдаются глобальные квазипериодические изменения структуры потока в целом (колебания струи с поочередным “прилипанием” к нижней и верхней стенке полости). Наличие экспериментальных данных, а также непосредственный практический интерес к данному течению, обусловленный сложностью организации эффективной вентиляции тупиков, делает данное течение весьма привлекательным объектом исследования с точки зрения оценки возможностей различных подходов к моделированию АКТТ.

В первом параграфе Главы 3 рассмотрен случай, когда полость в начальный момент времени заполнена воздухом (именно для таких условий проведены эксперименты).

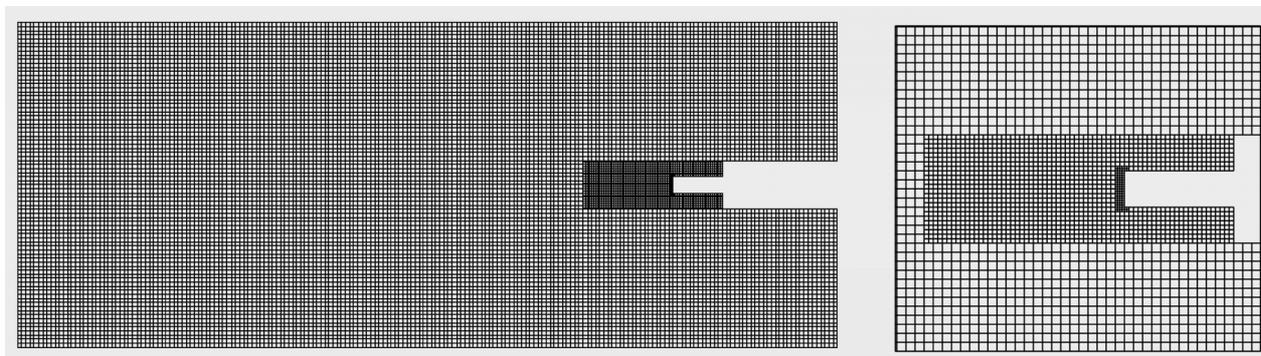


Рис.1. Неструктурированная сетка, используемая в методе LES

Проведенные расчеты показали, что для условий, при которых в эксперименте реализуется стационарный режим течения, независимо от используемой модели турбулентности (ν_t -92 или стандартная и квадратичная k - ϵ модели) и подхода к описанию турбулентности (SRANS или URANS), решения соответствующих задач оказываются стационарными. Что касается LES данного режима течения (типичная сетка, на которой проводился LES, представлена на рис.1), то в полученном с его помощью решении отсутствуют какие-либо признаки низкочастотных макроскопических колебаний струи. Это видно, например, из представленного на рис.2 спектра пульсаций продольной составляющей вектора скорости, рассчитанного на основе LES.

Таким образом, для этого режима все рассматриваемые подходы приводят к качественно одинаковым результатам. О количественном соотношении результатов расчетов, полученных с помощью различных подходов можно судить по рис.3. На нем представлены профили продольной составляющей скорости в трех сечениях полости, расположенных соответственно на расстояниях 0.05м, 0.25м и 0.45м от ее торца, рассчитанные с использованием LES и SRANS, замкнутых с помощью квадратичной k - ϵ модели и модели ν_t -92. Видно, что в целом, результаты SRANS и LES неплохо согласуются между собой, однако квадратичная k - ϵ модель турбулентности имеет некоторое преимущество перед моделью ν_t -92, причем наиболее существенно это преимущество проявляется в сечении, расположенном вблизи торцевой стенки, где происходит резкое изменение, как пульсационных, так и осредненных характеристик течения.

В противоположность этому, при условиях, когда в эксперименте реализуется автоколебательное течение, стационарное решение удалось получить только при проведении расчета в половине области с использованием условий симметрии, в то время как решения URANS и LES, полученные в полной области, характеризуются наличием крупномасштабных колебаний струи аналогичных колебаниям, наблюдаемым в эксперименте. При этом следует подчеркнуть, что в рамках URANS были получены как двумерные, так и трехмерные решения. Этот факт, сам по себе, представляет определенный теоретический интерес, так как подтверждает принципиальную возможность описания в рамках URANS трехмерных вихревых структур в номинально двумерных струйных течениях (ранее наличие такой возможности было продемонстрировано при решении задач внешнего обтекания двумерных тел).

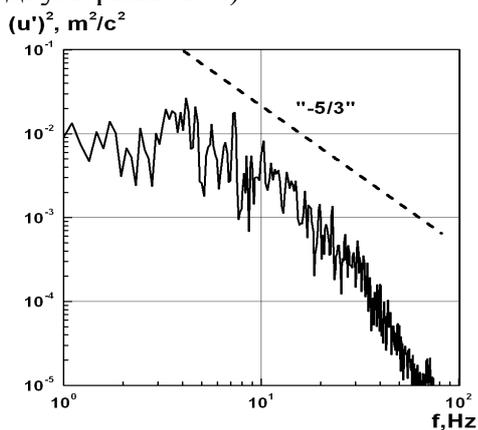


Рис.2. Энергетический спектр пульсаций продольной скорости

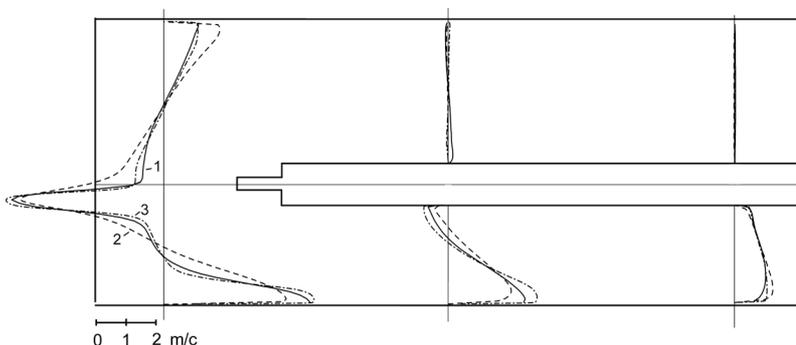


Рис. 3. Профили продольной скорости в трех сечениях потока, рассчитанные с помощью различных подходов к моделированию турбулентности: 1-LES; 2- RANS, ν_t -92; 3- RANS, квадратичная k - ϵ модель

На рис. 4 представлены полученные с помощью LES мгновенные поля завихренности для автоколебательного режима течения в моменты времени, соответствующие трем его характерным фазам. Видно, что LES воспроизводит классическую картину распада слоев смешения, с характерными для нее этапами сворачивания (образования относительно крупных регулярных вихрей), их последующего слияния и хаотизации.

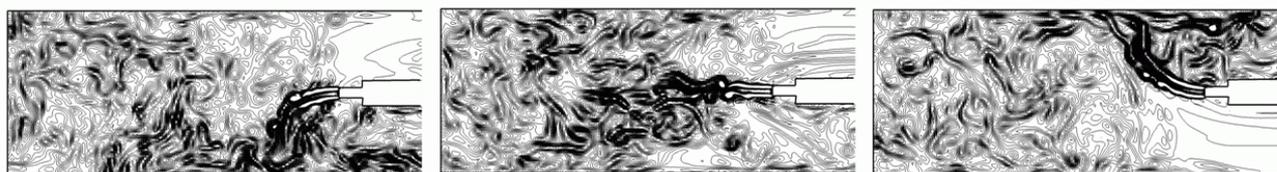


Рис.4. Мгновенные поля завихренности из LES автоколебательного режима течения

Анализ полей скорости и завихренности, рассчитанных с помощью 2D и 3D URANS и LES, позволил заключить, что в рамках URANS, в отличие от LES, разрешаются только крупномасштабные вихревые структуры (это связано с типичным для RANS относительно высоким уровнем турбулентной вязкости). Тем не менее, общая картина течения предсказывается в рамках URANS правильно, причем учет трехмерности потока приводит к заметному улучшению согласования результатов URANS с LES. В частности, как видно из рис. 5, 6, качественный

характер эволюции параметров течения во времени и его амплитудно-частотные характеристики, рассчитанные с помощью 3D URANS, близки к LES и к эксперименту. В то же время, следует отметить, что результаты URANS существенно зависят от используемой модели турбулентности. При этом, как и при расчете рассмотренного выше стационарного режима течения, квадратичная k - ε модель обеспечивает заметно лучшее согласование результатов расчета с экспериментом, чем модель ν_t -92. Аналогичные выводы можно сделать и в отношении точности предсказания характеристик осредненного течения.

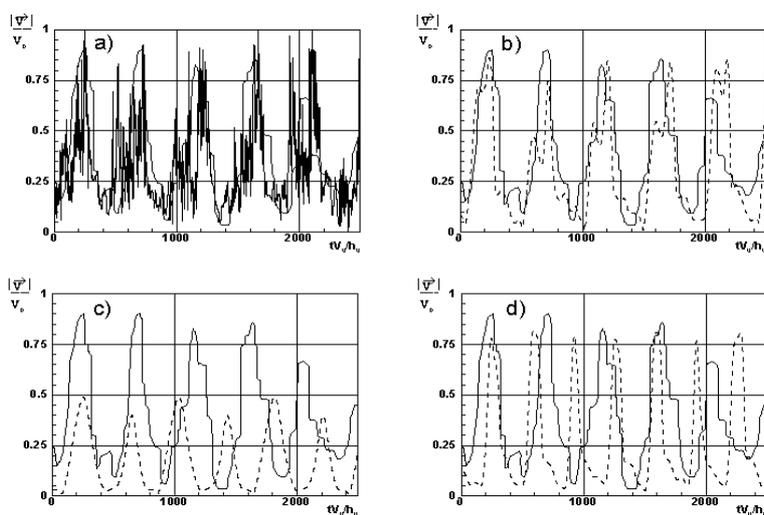


Рис.5. Экспериментальная зависимость от времени модуля скорости (сплошная кривая), и соответствующие расчетные зависимости, полученные с использованием различных подходов к моделированию турбулентности: (a)–LES, (b) и (d) – 3D и 2D URANS (кв. k - ε модель), (c)–2D URANS (ν_t -92)

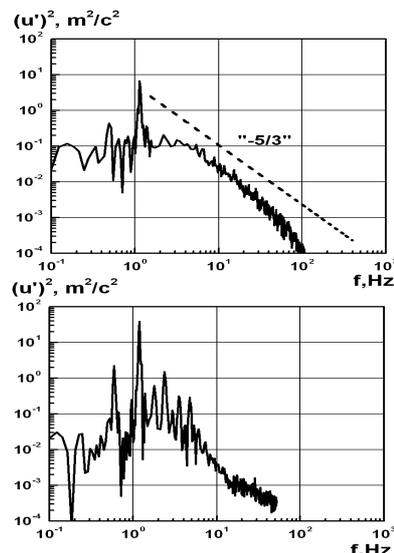


Рис.6. Энергетический спектр пульсаций продольной скорости (a)– LES, (b) – 3D URANS, квадратичная k - ε модель

Наконец, как и следовало ожидать, стационарные решения, полученные в рамках RANS в половине области, независимо от используемой модели турбулентности сильно отличаются как от результатов осреднения LES, так и URANS. Характерной особенностью стационарных решений является относительно низкий уровень турбулентной вязкости, что, в свою очередь, влечет за собой значительное завышение “дальнобойности” струи.

В целом, представленные в разделе 3.1 результаты свидетельствуют о том, что URANS является достаточно надежной основой для расчета автоколебательных течений рассматриваемого типа и может использоваться на практике для параметрических численных исследований и оптимизации соответствующих технических устройств и, в частности, для решения представляющей непосредственный практический интерес задачи о вентиляции полости, заполненной отличным от воздуха газом, рассмотренной во *втором параграфе* Главы 3. Следует однако отметить, что эта задача существенно отличается от предыдущей, поскольку в данном случае значительное влияние на рассматриваемое течение могут оказывать эффекты плавучести, связанные с неоднородностью поля концентраций (а следовательно и плотности) в вентилируемом объеме. Хорошо известно, что эти эффекты влияют на осредненное течение как непосредственно (через объемную силу в уравнении переноса импульса), так и через влияние сил плавучести на характеристики турбулентности. Поэтому выводы относительно возможности

применения URANS для моделирования воздушного потока в полости не могут быть автоматически перенесены на случай течения смеси, особенно, если в ее состав входят газы, плотность которых сильно отличается от плотности воздуха. В связи с этим, как и в предыдущем разделе, наряду с расчетами в рамках URANS проведены контрольные расчеты процесса вентиляции с использованием LES. При этом для учета переменной плотности смеси и эффектов плавучести использовалась так называемая модель гипозвуковых течений, кратко представленная в начале раздела 3.2.

Конкретные расчеты рассматриваемого процесса были выполнены для тех же условий, что и для случая течения чистого воздуха. При этом для оценки влияния сил плавучести на характеристики течения и эффективность вентиляции, наряду с “горизонтальным” (перпендикулярном направлению силы тяжести) расположением полости, было рассмотрено ее вертикальное расположение, а также проанализировано течение в “невесомости” ($g=0$). Основные результаты проведенных исследований состоят в следующем.

Прежде всего, следует отметить, что результаты URANS расчетов оказались близкими к результатам LES как с качественной, так и количественной точек зрения. Об этом можно судить, например, по рис.7, на котором представлена зависимость от времени средней по объему полости концентрации CO_2 для автоколебательного режима течения, рассчитанная с помощью этих двух подходов. Таким образом, можно констатировать, что подход, базирующийся на 3D URANS может быть рекомендован для численных исследований, направленных на оптимизацию рассматриваемой системы вентиляции.

Что касается влияния на характер течения и эффективность вентиляции плотности вентилируемого газа и ориентации полости относительно направления действия силы тяжести, то проведенные расчеты показали, что при рассматриваемых условиях (число Фруда ~ 0.15) это влияние оказывается незначительным (рис. 8).

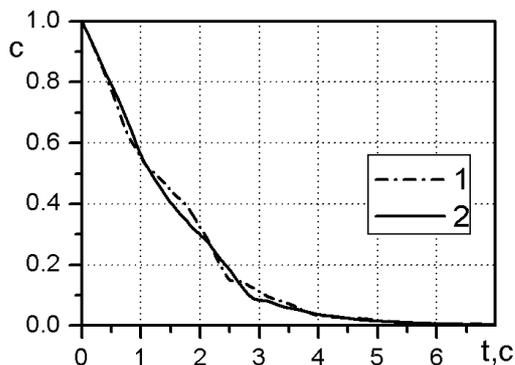


Рис.7. Зависимости от времени средней по объему концентрации CO_2 при горизонтальном положении полости, рассчитанные на основе LES и 3D URANS

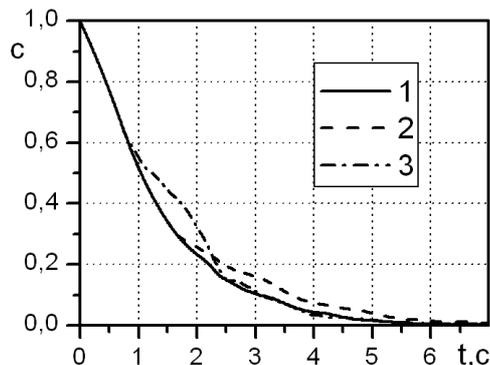


Рис. 8. Зависимости средней по объему полости концентрации CO_2 от времени, полученные в рамках 3D URANS: 1 – расчет без учета силы тяжести; 2 – вертикальное положение полости; 3 – горизонтальное положение полости

Это не означает, однако, что эффекты плавучести вообще не играют роли в рассматриваемых задачах. Так, например, при уменьшении скорости вентилирующей струи сила тяжести начинает оказывать существенное влияние на эффективность вентиляции, причем характер этого влияния оказывается немонотонным. Так, при

снижении скорости струи с 6 м/с до 2 м/с при горизонтальном расположении полости учет наличия силы тяжести приводит к повышению скорости замещения газа в полости воздухом, при дальнейшем ее уменьшении, - наоборот, к ее снижению. Анализ полей скорости и концентрации показывает, что первоначальный рост эффективности вентиляции при снижении скорости воздушной струи происходит вследствие быстрого всплытия (в случае метана) или погружения (в случае углекислого газа) вытекающей из полости смеси в окружающей среде в виде “термиков”. При дальнейшем понижении скорости вентилирующей струи эффекты плавучести становятся доминирующими и определяют характер течения не только вне, но и внутри полости. В частности, автоколебательный режим течения, наблюдающийся при больших скоростях струи переходит при этом в квазистационарный режим, причем в зависимости от соотношения плотностей вентилируемого газа и воздуха струя “прилипает” либо к нижней, либо к верхней стенке полости. В результате в придонной области полости образуется застойная зона (см. рис.9), удаление из которой инородного газа происходит только за счет диффузии. В противоположность этому, при наличии автоколебаний застойные зоны в полости отсутствуют, что способствует равномерной вентиляции всего объема. Преимущество автоколебательных режимов вентиляции перед квазистационарными наглядно иллюстрирует рис.10, на котором представлено сопоставление расчетных зависимостей средней и максимальной концентраций метана в полости от времени для соответствующих режимов. Видно, что в первом случае вентиляция происходит значительно быстрее, чем во втором, причем на завершающем этапе процесса значения средней и максимальной концентрации метана в полости при этом практически совпадают, а в случае квазистационарного режима – значительно отличаются друг от друга.

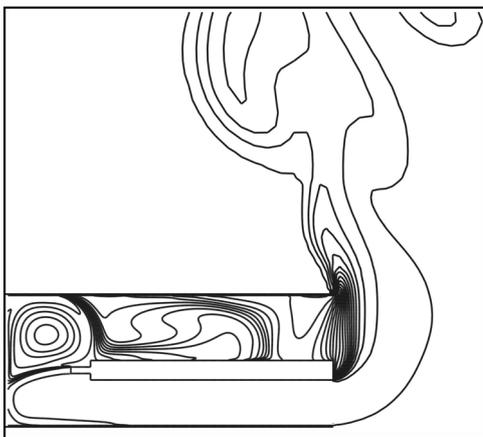


Рис. 9. Поле концентрации CH_4 в момент времени $t=1.8\text{c}$ при горизонтальном положении полости в случае квазистационарного режима течения

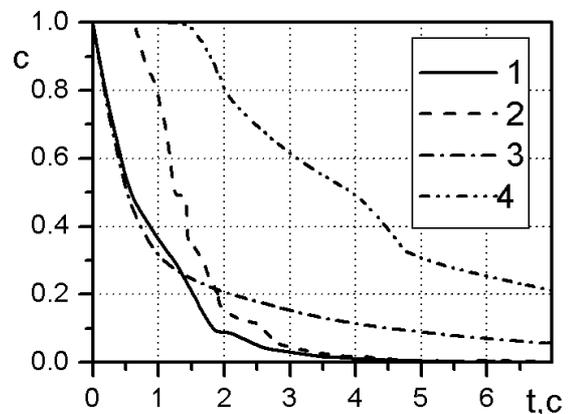


Рис.10 Зависимость от времени средней (1, 3) и максимальной (2, 4) концентрации CH_4 в полости:
1, 2 – автоколебательный режим;
3, 4 – стационарный режим

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности использования явления автоколебаний струи для вентиляции полужамкнутых объектов, а также о возможности расчета таких систем вентиляции в рамках нестационарных уравнений Рейнольдса.

В четвертой главе диссертации представлены результаты численного исследования предложенной в конце 80-х годов прошлого века конструкции воздухораспределителя, формирующего автоколебательное течение на входе в

кондиционируемое помещение. Как показали эксперименты, при этом достигается быстрое падение максимальной скорости вентилярующей струи, что имеет большое значение для обеспечения эффективного и комфортного кондиционирования многих объектов. Однако определение геометрических и режимных параметров воздухораспределителей данного типа, при которых действительно реализуется автоколебательный режим течения, и оценка эффективности вентиляции при таких условиях экспериментальным путем являются очень сложными, в связи с чем оценка надежности и экономичности различных подходов к численному моделированию таких течений является важной практической задачей.

В первом параграфе Главы 4 обсуждаются результаты расчетов течения за воздухораспределителем, который исследовался в экспериментах Ю.С. Чумакова, поставленных на кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ.

Конструкция воздухораспределителя, исследовавшаяся в экспериментах, схематически представлена на рис.11. Она представляет собой “короб” (B) с расположенной внутри него пластиной (D). Воздух подается в короб через патрубок A, обтекает пластину и поступает в вентиляруемое помещение через отверстие O.

Как и при численном моделировании автоколебаний струи, истекающей в прямоугольную полость, проведенном в Главе 3, расчеты рассматриваемого течения были выполнены в рамках двух подходов к моделированию турбулентности, а именно, URANS и LES. При этом в случае использования URANS, как и ранее, применялась квадратичная форма k - ϵ модели турбулентности (напомним, что именно с помощью этой модели удалось добиться наилучшего согласования результатов решения URANS с LES и с экспериментальными данными). В обоих случаях использовались неструктурированные сетки, все ячейки которых имеют кубическую форму (это является весьма важным для обеспечения точности LES), которые отличались лишь числом ячеек: сетка для LES имела 1.1×10^6 ячеек, а сетка для URANS - 0.53×10^6 .

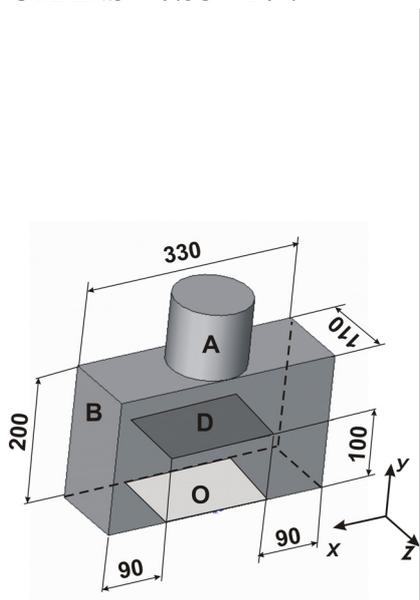


Рис.11. Схема воздухораспределителя

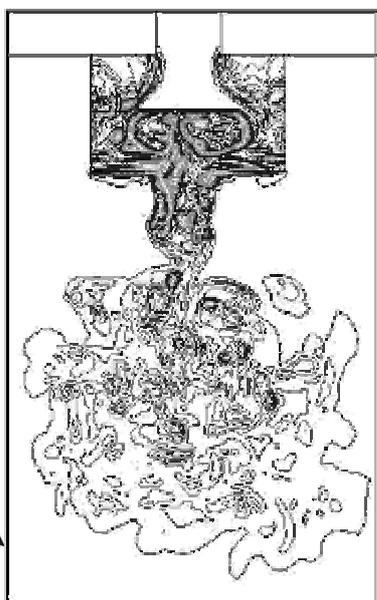


Рис.12. Мгновенное поле модуля завихренности из LES

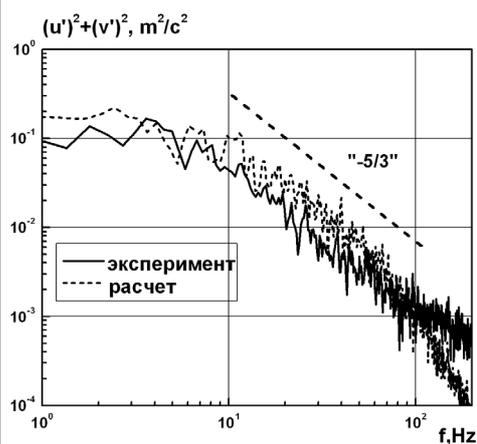


Рис.13. Сравнение энергетических спектров пульсаций скорости из LES с экспериментом

Переходя к описанию полученных результатов, следует прежде всего отметить, что для рассматриваемых условий нестационарное решение URANS получить не

удалось. Независимо от используемой модели турбулентности (линейной или квадратичной $k-\varepsilon$ моделей и SST модели Ментера), начального приближения (состояние покоя или мгновенные поля скорости и давления из LES) и шага интегрирования по времени (он уменьшался в 2 и 4 раза по отношению к базовому значению, обеспечивающему выполнение условия $CFL < 1.0$) с течением времени устанавливалось устойчивое (продолжительность отдельных расчетов достигала 20000 шагов по времени) стационарное решение задачи, симметричное относительно двух геометрических плоскостей симметрии воздухоораспределителя. В противоположность этому, при использовании LES (типичное мгновенное поле модуля завихренности из LES показано на рис.12) наблюдаются глобальные автоколебания потока, однако они выражены весьма слабо. Об этом свидетельствует как анализ анимации результатов LES, так и спектр турбулентных пульсаций потока, генерируемого воздухоораспределителем, показанный на рис.13 совместно с аналогичным спектром, полученным в результате обработки экспериментальных данных. Этот рисунок свидетельствует об отсутствии ярко выраженных низкочастотных пиков, то есть о низкой интенсивности крупномасштабных колебаний при рассматриваемой геометрии воздухоораспределителя и условиях течения. Именно с этим, по-видимому, связано отсутствие нестационарного решения URANS при расчете данной конструкции воздухоораспределителя. Косвенным свидетельством в пользу этого вывода является также относительно неплохое согласование стационарного решения RANS с экспериментальными данными по осредненным параметрам потока. Хотя это решение заметно занижает скорость расширения и затухания струи вниз по потоку от выхода из воздухоораспределителя, оно, тем не менее, может рассматриваться как приемлемое для задач вентиляции.

Детальный анализ результатов LES позволил установить причины относительно низкой интенсивности автоколебаний потока, создаваемого рассматриваемым воздухоораспределителем. Они состоят в следующем. Нестационарные вихри (“вихри Кармана”), которые образуются при обтекании пластины струей, поступающей в короб из патрубка, не выносятся из воздухоораспределителя через выходное отверстие (именно этот эффект мог бы приводить к интенсивным поперечным колебаниям потока на выходе из воздухоораспределителя), а остаются внутри воздухоораспределителя (в донной области пластины). Об этом достаточно ясно свидетельствует рис.12 и анимация результатов LES. Эти же данные позволяют заключить, что “запирание” вихрей Кармана внутри воздухоораспределителя происходит под воздействием более интенсивных вихрей, которые образуются при взаимодействии сдвиговых слоев на границах струи, истекающей из патрубка, со стенками воздухоораспределителя и “выносятся” из него в вентилируемое пространство с достаточно высокой скоростью.

Можно предположить, что данный эффект может быть устранен или, по крайней мере, ослаблен путем уменьшения расстояния между пластиной и нижней стенкой короба. Для проверки этого предположения были выполнены URANS и LES расчеты течения в воздухоораспределителе, в котором пластина расположена на вдвое меньшей высоте, чем в конструкции, исследовавшейся в экспериментах. Эти расчеты полностью подтвердили правильность сделанного предположения и, тем самым, - описанный выше механизм рассматриваемого процесса. Так, оказалось, что при расчете течения в измененной конструкции воздухоораспределителя результаты URANS и LES характеризуются наличием интенсивных глобальных колебаний потока на выходе из воздухоораспределителя. В качестве иллюстрации на рис.14 показаны мгновенные поля модуля скорости, полученные в рамках обоих этих

подходов, в моменты времени, соответствующие двум крайним фазам колебаний, а на рис.15 - типичное мгновенное поле модуля завихренности из LES. Эти рисунки свидетельствуют о том, что вихревая структура потока внутри рассматриваемого воздухораспределителя и в окрестности его выходного отверстия существенно отличается от вихревой структуры течения в конструкции, исследовавшейся в эксперименте (ср. рис.15 и рис.12). Кроме того, из рис.14 следует, что решение URANS, по крайней мере, качественно аналогично решению LES.

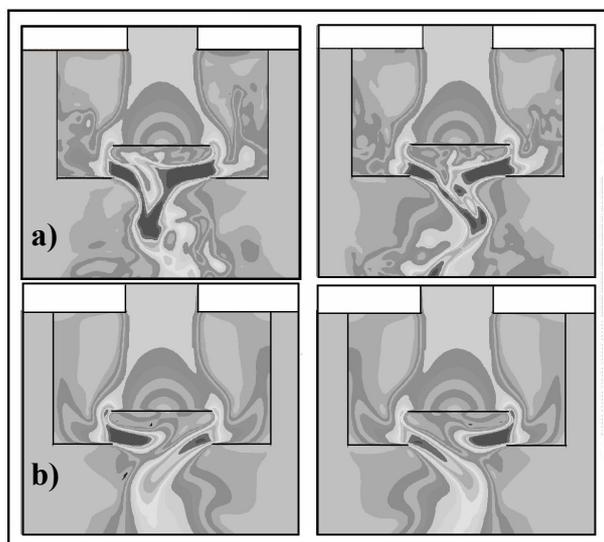


Рис.14. Мгновенные поля модуля скорости в плоскости симметрии воздухораспределителя в моменты времени, соответствующие крайним фазам колебаний потока на его выходе: (a) – LES. (b) - URANS

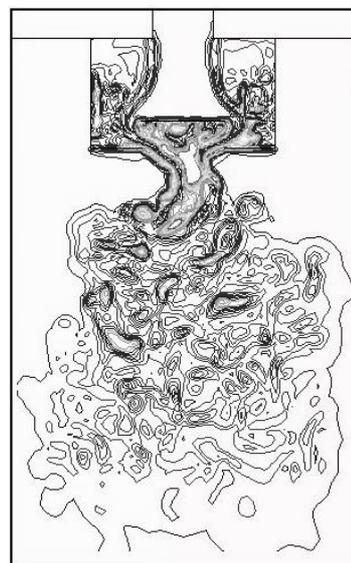


Рис. 15 Мгновенное поле модуля завихренности в плоскости симметрии воздухораспределителя,

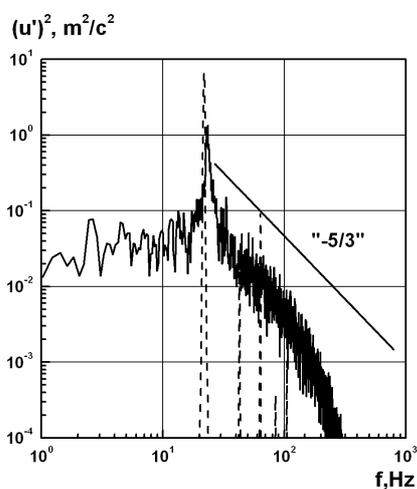


Рис.16. Спектры мощности пульсаций поперечной скорости в точке на плоскости симметрии воздухораспределителя при $x=0$ мм; $y=135$ мм; сплошная кривая – LES, пунктирная кривая – URANS

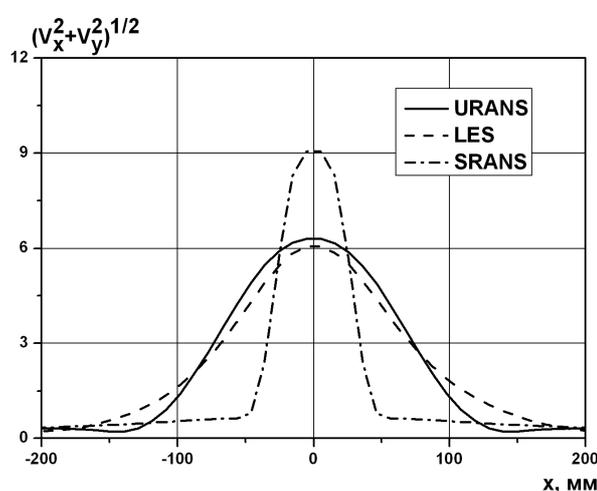


Рис. 17. Профили скорости осредненного течения, рассчитанные с помощью различных подходов

Что касается количественного согласования этих двух решений, то о нем можно судить по рис.16, 17, на которых сравниваются спектры мощности пульсаций поперечной составляющей скорости и профили средней скорости, рассчитанные на основе URANS и LES. Видно, что с помощью URANS удается с высокой точностью определить ведущую частоту колебаний и достаточно точно предсказать параметры осредненного течения. В то же время, как следует из рис. 17, стационарное решение

SRANS, которое было получено с использованием условий симметрии, приводит к значительному искажению формы профиля скорости (занижает ширину струи в два раза и завышает максимум скорости в 1.5 раза).

В целом, исследования, результаты которых представлены в разделе 4.1 диссертации, свидетельствуют о возможности расчета “динамических” систем воздухораспределения в раках URANS, с одной стороны, и о высокой информативности и полезности LES таких течений, с другой. Кроме того, эти результаты убедительно продемонстрировали важные достоинства “динамических” воздухораспределителей, что позволяет рекомендовать их широкое применение в реальных системах В и КВ.

Во втором параграфе главы 4 представлен пример применения URANS для расчета течения в одной из таких реальных систем, а именно в системе раздачи воздуха с помощью динамических воздухораспределителей, используемой в хлебопекарной промышленности для быстрого охлаждения хлеба (см. рис.18а). Центральной проблемой в этом процессе является обеспечение равномерного распределения охлаждающего воздушного потока, поступающего из кондиционера, по объему башни охлаждения хлеба и выполнение при этом технологических ограничений на систему кондиционирования по температуре охлаждающего воздуха и его скорости ($t \geq 7^\circ\text{C}$, $V \leq 1.5$ м/с). При нарушении ограничений происходит усушка хлеба и образование корки. Следует отметить, что стандартные подходы к решению этой задачи (например, использование воздухораспределителей с регулируемыми решетками) в данном случае неприменимы из-за высоких скоростей потока и сильной неравномерности расхода воздуха через отдельные решетки. Кроме того, течение в каналах с решетками склонно к неустойчивости, в результате чего воздух может не истекать из первой распределительной решетки, а наоборот, - засасываться в нее.

Конструкция “динамического” воздухораспределителя, используемая в рассматриваемой системе охлаждения представлена на рис.18b. Она представляет собой канал прямоугольного сечения (для наглядности на рисунке не показана верхняя стенка канала), в который подается охлаждающий воздух. Отличительной особенностью воздухораспределителя является то, что его выпускные отверстия, расположенные на нижней стенке канала “накрыты” колпаками, имеющими форму полуцилиндров (“лунок”).

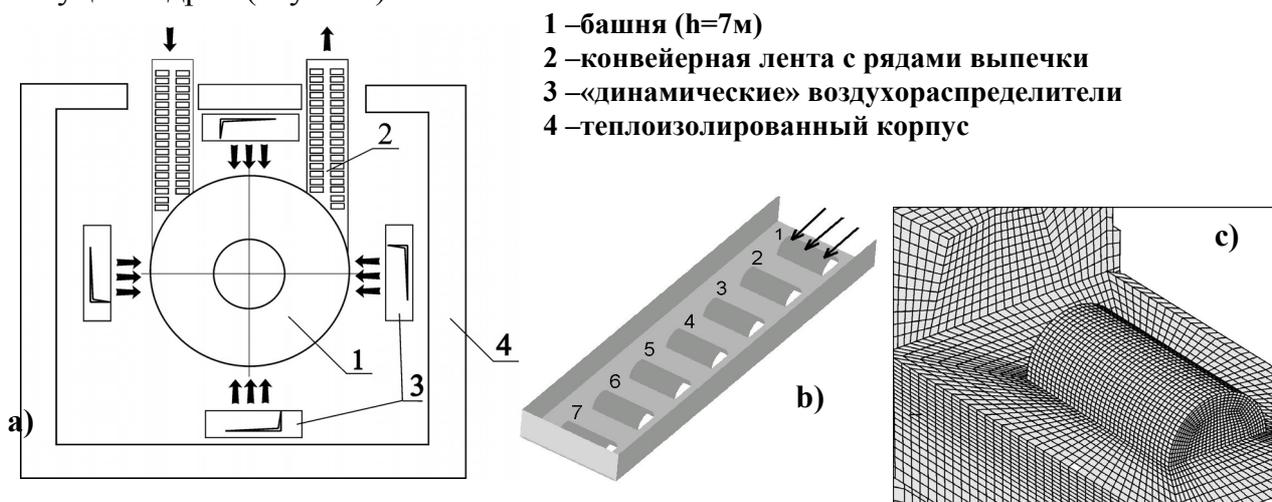


Рис.18. Схема системы охлаждения (а), воздухораспределительное устройство (b) и сетка, использовавшаяся в расчетах (с)

Расчет описанного течения в рамках URANS с использованием квадратичной $k-\epsilon$ модели турбулентности проводился на неструктурированной сетке, фрагмент

которой показан на рис.18с. В результате было получено нестационарное автоколебательное течение, характеризующееся периодическим изменением направления воздушных струй на выходе из выпускных отверстий воздухораспределителя (см. рис. 19а). Важной особенностью рассматриваемого течения является также взаимодействие струй, истекающих из соседних отверстий, между собой. Это заметно повышает его эффективность по сравнению с одиночной “лункой”, так как в результате указанного взаимодействия уже на небольшом расстоянии от воздухораспределителя (в области границы башни охлаждения хлеба) формируется практически однородное поле скорости (см. рис.19с), что, как уже отмечалось, является одним из основных показателей качества работы воздухораспределителя. Кроме того, следует отметить, что наличие крупных нестационарных вихревых структур в потоке, создаваемом рассматриваемым воздухораспределителем, должно положительно сказываться на теплообмене охлаждающего воздуха с поверхностью хлеба.

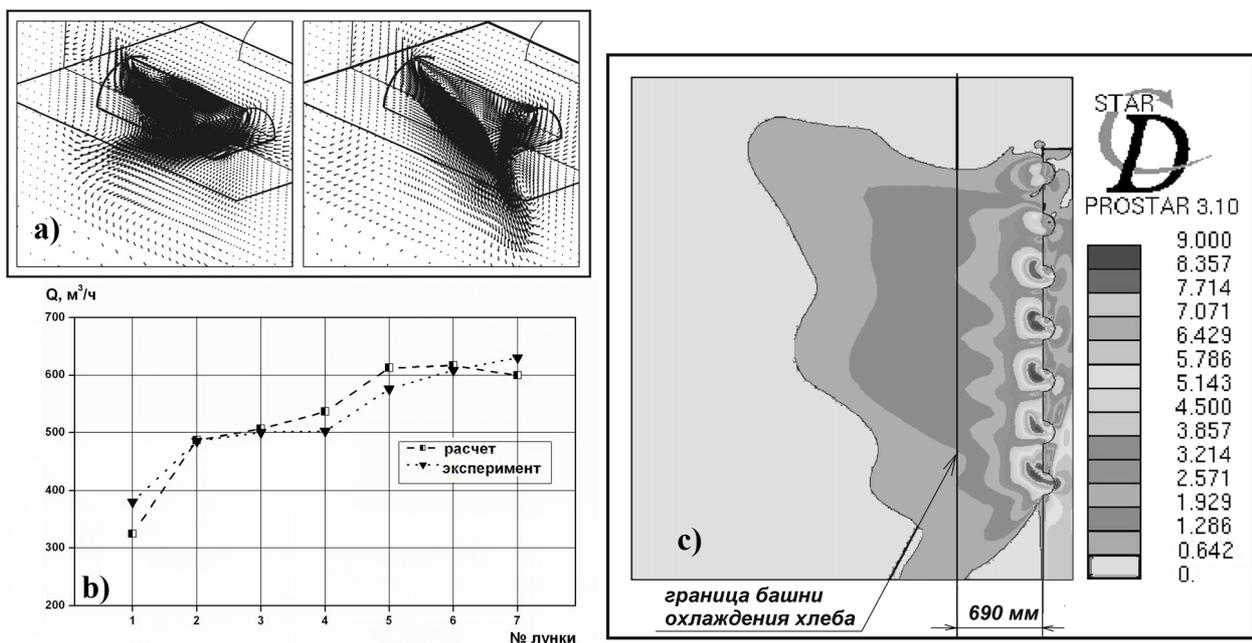


Рис.19. Мгновенные поля скорости в моменты времени, соответствующие двум противоположным фазам автоколебаний (а), распределение расхода воздуха по лункам (б) и поле модуля скорости осредненного течения в сечении, проходящем через центр воздухораспределителя (с)

К сожалению, экспериментальные данные по рассматриваемому течению ограничены лишь измерениями распределения расхода по различным выходным отверстиям воздухораспределителя. Сравнение результатов расчетов, проведенных в настоящей работе, с этими измерениями представлено на рис.19с, из которого видно, что погрешность определения расхода не превышает 15%.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы работы. Наиболее важные методические результаты проведенных исследований состоят в следующем.

1. На основе сопоставления результатов расчета ряда вентиляционных АКТТ, полученных в рамках URANS, с аналогичными результатами LES и с экспериментом, получены объективные данные о возможности использования этого подхода для расчета данного класса течений. В частности, установлено, что для всех рассмотренных течений URANS обеспечивают вполне приемлемую точность

определения не только осредненных, характеристик течения, но и амплитудно-частотных характеристик крупномасштабных автоколебаний потока.

2. Показано что при расчете номинально двумерных вентиляционных АКТТ, как и при решении аналогичных (номинально двумерных) задач внешнего обтекания, URANS позволяют получить трехмерные решения, которые заметно лучше согласуются с решениями LES и с экспериментом, чем двумерные решения.

3. Продемонстрировано существенное влияние выбора модели турбулентности, используемой для замыкания URANS, на точность получаемых результатов и показано, что применение нелинейных моделей турбулентной вязкости (квадратичной k - ϵ модели) позволяет существенно повысить точность расчета АКТТ.

4. Продемонстрирована возможность проведения LES сложных вентиляционных АКТТ на персональных компьютерах и показана высокая информативность и полезность подобных расчетов с точки зрения анализа физических закономерностей таких течений и объяснения механизмов возникновения автоколебаний, знание которых необходимо для разработки и оптимизации конструкций динамических воздухораспределительных устройств.

5. Показано, что применение стационарных уравнения Рейнольдса (SRANS) для расчета осредненных параметров АКТТ приводит к недопустимо большим погрешностям.

Перечисленные результаты представляют собой достаточно надежную методическую основу для расчета вентиляционных АКТТ и позволяют рекомендовать применение URANS при проектировании систем вентиляции и кондиционирования, в которых реализуются такие течения.

Наряду с этим, в ходе работы получен ряд важных практических результатов.

1. Показано, что использование устройств подачи воздуха, приводящих к возникновению автоколебаний вентилирующих струй, позволяет значительно повысить эффективность систем вентиляции и кондиционирования воздуха по сравнению с традиционными стационарными системами раздачи воздуха. Это должно способствовать более широкому внедрению таких устройств и тем самым, - значительному сокращению затрат электроэнергии и повышению качества воздушной среды в вентилируемых/кондиционируемых помещениях.

2. Накоплен значительный опыт расчета АКТТ в рамках URANS и LES с помощью коммерческого CFD-кода STAR-CD и продемонстрирована возможность достаточно надежного решения соответствующих задач с его помощью. Этот опыт может быть применен при использовании данного кода в проектно-конструкторской практике при проектировании и оптимизации систем В и КВ.

3. На основе проведенных исследований предложены оригинальные конструкции воздухораспределителей, подтвержденные двумя патентами.

Публикации по теме диссертации

1. Денисихина Д.М., Бассина И.А., Никулин Д.А., Стрелец М.Х. Численное моделирование автоколебаний турбулентной струи, истекающей в прямоугольную полость // ТВТ. 2005. том 43, № 4 – с. 568-579.

2. Бурцев С.И., Денисихина Д.М. Расчет турбулентных течений в системах интенсивного охлаждения хлеба// Инженерные системы – 2004 –№3 (15) – с.31-33.

3. Бурцев С.И., Кассирова (Денисихина) Д.М. Новый аэродинамический эффект и его инженерное приложение// Теплоэнергоэффективные технологии. Информационный бюллетень –2002. – №1 (27).– с.26-28.
4. Денисихина Д.М. Численное исследование процесса вентиляции частично открытой прямоугольной полости воздушной струей. В Сб. материалов XV школы-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках»– Калуга, 2005.– с 59-62.
5. Кассирова (Денисихина) Д.М. Исследование явления автоколебания струи на выходе из воздухораспределителя с помощью программы STAR-CD. В Сб. трудов Второй конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH – Москва, 2002.– с. 10-12.
6. Денисихина Д.М. Исследование автоколебательного течения в воздухораспределителе с лункообразными выпускными отверстиями. В Сб. трудов Четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GMBH – Москва, 2004.– с. 269-271.
7. Бурцев С.И., Денисихина Д.М. Эффективные воздухораспределители и методы исследований. В Сб. материалов НПК «Вентиляция, отопление, тепло-, газо-, водоснабжение жилых, промышленных и общественных зданий – пути повышения эффективности экологической безопасности и энергосбережения» – Санкт-Петербург, 2005.– с. 6-8.
8. Денисихина Д.М., Соколенко М.Л. Ячейка со встречно направленными потоками, как элемент новых эффективных воздухораспределителей. В Сб. материалов международного форума "Повышение эффективности работы систем тепло-, газо-, водоснабжения, отопления и вентиляции". – Москва, 2005.– с. 47-49.
9. Денисихина Д.М. Численное исследование автоколебательного течения, формируемого воздухораспределителем с лункообразными отверстиями. В Сб. материалов VIII МНПК "Экология и жизнь"– Пенза, 2005.– с.51-53.
10. Патент РФ №33804 от 10.11.2003 Бюл. № 31. Воздухораспределитель / Бурцев С.И., Денисихина Д.М., Емельянов Ф.А.
11. Патент РФ №2214562 от 20.10.2003 Бюл. № 29. Воздухораспределитель /. Бурцев С.И., Денисихина Д.М., Емельянов Ф.А.
12. Денисихина Д.М., Стрелец М.Х. Численное моделирование автоколебаний турбулентной струи, истекающей в прямоугольную полость. В сб. материалов Всероссийской межвузовской НТК студентов и аспирантов, -Петербург, 2004.–с.124-126.