



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

На правах рукописи

Засимова Марина Александровна

**Численное исследование вентиляционных течений
на основе метода моделирования крупных вихрей**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: **Иванов Николай Георгиевич**, кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Официальные оппоненты: **Исаев Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией фундаментальных исследований, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», город Санкт-Петербург

Денисихина Дарья Михайловна, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», город Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр», город Санкт-Петербург

Защита состоится 15 марта 2021 года в 16 часов на заседании диссертационного совета У.01.02.05 ФГАОУ ВО «СПбПУ» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, корпус 1, 3-й этаж, ауд. 348-8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте <https://www.spbstu.ru/science/>.

Автореферат разослан «__» февраля 2021 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.01.02.05
кандидат физико-математических наук


Гусева Екатерина Константиновна

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

При разработке и оптимизации систем вентиляции в жилых и производственных зданиях, а также в специализированных помещениях, часто уникальных по своей геометрии, таких как плавательные бассейны, крытые стадионы, театры и кинотеатры, салоны автомобилей, вагоны поездов, кабины самолетов и т.п., для обоснования проектных решений требуется оценка локальных характеристик воздухораспределения. Информацию о пространственной структуре течения можно получить на основе численного решения многомерных задач гидроаэродинамики. На практике моделирование турбулентного течения воздуха обычно осуществляется посредством численного решения осредненных по Рейнольдсу стационарных или нестационарных уравнений Навье-Стокса (Steady/Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS/URANS) с привлечением полуэмпирических моделей турбулентности. С использованием высокопроизводительных вычислительных ресурсов, исследования вентиляционных течений могут осуществляться и с привлечением вихреразрешающего метода моделирования крупных вихрей (Large Eddy Simulation, LES). Данные LES расчетов оказываются полезными и для оценки достоверности обладающего высокой степенью эмпиризма RANS/URANS подхода.

Практическое использование LES подхода нуждается в отработке на основе решения тестовых задач. Валидацию расчетных методик моделирования турбулентных вентиляционных течений необходимо осуществлять на основе эталонных данных физических экспериментов, обычно выполненных в тестовых помещениях. Требования, предъявляемые к качеству данных эталонных экспериментов высоки, и на настоящий момент в области вентиляции существует ограниченное число таких тестов. Наиболее полные и детально описанные данные можно найти в работах P.V. Nielsen et al.^{1,2} и M. Hurnik et al.³. Проведение численного моделирования для условий этих хорошо документированных тестов позволяет, с одной стороны, отработать методику расчетов вентиляционных течений на основе вихреразрешающего LES моделирования и, с другой стороны, осуществить анализ полей течения на основе существенно большего набора данных, чем тот, что доступен в документированных результатах экспериментов.

¹ Nielsen P.V., Restivo A., Whitelaw J.H. The velocity characteristics of ventilated room // ASME J. Fluids Engineering. 1978. Vol. 100. Pp. 291-298.

² Nielsen P.V. Specification of a two dimensional test case // Aalborg: Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet, Gul serie. 1990. Vol. R9040. No. 8. 15p.

³ Hurnik M., Blaszczyk M., Popiolek Z. Air distribution measurement in a room with a sidewall jet: a 3D benchmark test for CFD validation // Building and Environment. 2015. Vol. 93, part 2. P. 319-330.

Помимо высокой степени эмпиризма, практическое применение RANS/URANS подхода при моделировании вентиляционных течений затруднено следующим обстоятельством. С помощью RANS/URANS подхода можно определить поле модуля средней скорости, $V_m \equiv (\langle V_x \rangle^2 + \langle V_y \rangle^2 + \langle V_z \rangle^2)^{0.5}$. Однако для оценки величин, характеризующих уровень комфорта в помещениях, например, при определении интенсивности сквозняка⁴, необходимо использовать поле среднего модуля скорости, $V_a \equiv \langle (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{0.5} \rangle$, которое RANS/URANS решение непосредственно не дает. В литературе предложены корреляционные зависимости, позволяющие осуществить реконструкцию поля V_a на основе поля V_m и локальных данных об интенсивности турбулентности; в случае применения RANS/URANS подхода при пересчете используется поле кинетической энергии турбулентности $\langle k \rangle$. Одна из задач диссертационного исследования – дополнительное обоснование применения известных корреляционных зависимостей с привлечением LES данных как по V_m , так и по V_a .

Цели и задачи работы

Цели и задачи работы состоят в следующем.

1. Отработка методики численного моделирования вентиляционных течений на основе вихреразрешающего метода моделирования крупных вихрей с привлечением экспериментальных данных, доступных в литературе.
2. Расчет циркуляционного движения воздуха в прямоугольном помещении при подаче из припотолочной щели и анализ полученных данных.
3. Расчет циркуляционного движения воздуха в прямоугольном помещении при боковой подаче из отдаленного от потолка отверстия и анализ полученных данных, включая интегральные характеристики течения.
4. Оценка и дополнительное обоснование эмпирических соотношений, предложенных в литературе для коррекции поля среднего модуля скорости, получаемого с использованием RANS/URANS подхода, на основе данных вихреразрешающего численного моделирования.

Научная новизна работы

1. Для класса модельных вентиляционных задач, общим для которых является разделение прямоугольного вентилируемого помещения на зону струйного течения и рабочую (обитаемую) зону, выработаны методические рекомендации к численному моделированию циркуляции воздуха на основе метода LES, включая требования к выбору поперечного размера расчетной области при постановке

⁴ Fanger P.O., Melikov A.K., Hanzawa H., Ring J. Air turbulence and sensation of draught // Energy and Building. 1988. Vol. 12. Pp. 21-39.

условий периодичности, размерности расчетной сетки, значению временного шага, продолжительности выборки для получения статистических данных.

2. Получены новые данные о локальных характеристиках турбулентного течения в прямоугольном помещении при подаче вентиляционной струи из припотолочной щели. Проведен сопоставительный анализ структуры течения для щелевых отверстий различной ширины.

3. Получены новые данные о локальных и интегральных характеристиках турбулентного течения в прямоугольном помещении при боковой струйной подаче из отдаленного от потолка отверстия; обоснована и апробирована методика определения параметров эквивалентной круглой струи по данным расчета струи в ограниченном пространстве.

4. Посредством сочетания и анализа данных вихреразрешающего численного моделирования и результатов сопутствующих RANS/URANS расчетов получено дополнительное обоснование эмпирических методик реконструкции поля среднего модуля скорости по полям средней скорости и интенсивности турбулентности.

Достоверность полученных результатов

Все результаты получены в ходе расчетов, выполненных с использованием широко апробированного кода ANSYS Fluent, который в настоящее время является наиболее распространенным лицензионным гидродинамическим кодом. Код прошел всестороннюю валидацию и верификацию со стороны разработчика. В рамках работы проведено обширное исследование чувствительности представляемых в диссертации численных решений к выбору вычислительных параметров. Достоверность выводов работы подтверждается также хорошим согласием расчетных данных с литературными данными физических экспериментов.

Практическая значимость работы

1. Накоплена ценная методическая информация по требованиям к вычислительной модели при проведении расчетов вентиляционных течений на основе LES подхода в диапазоне чисел Рейнольдса $5 \times 10^3 - 5 \times 10^4$.

2. Апробирована методика обработки локальных значений средней скорости, направленная на оценку интегральных характеристик воздухораспределения в ограниченных помещениях, что должно быть востребовано при проектировании вентиляционных систем.

3. Получены количественные оценки результатов реконструкции поля среднего модуля скорости, необходимой при определении уровня комфорта в вентилируемых помещениях на основе данных RANS/URANS моделирования.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на российских и международных научных конференциях и семинарах: XXI и XXII Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017; Москва, 2019), Всероссийской конференции по аэрогидродинамике, посвященной 100-летию со дня рождения С.В. Валландера (Санкт-Петербург, 2017), Международных молодежных конференциях ФизикА.СПб (Санкт-Петербург, 2017, 2018), Научных форумах с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2017, 2018), Международной конференции «Roomvent & Ventilation 2018» (Эспоо, Финляндия, 2018), XXV Всероссийском семинаре с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург, 2018), Международной конференции «EENVIRO 2018» (Клуж-Напока, Румыния, 2018), Всероссийских конференциях «Рождественские встречи: современные проблемы гидродинамики» (Санкт-Петербург, 2018, 2020), 13 Международном конгрессе RENVА «CLIMA 2019» (Бухарест, Румыния, 2019), XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019), Двадцать четвертой Санкт-Петербургской Ассамблее молодых ученых и специалистов (Санкт-Петербург, 2019), Видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбПУ – НИИМ МГУ (Санкт-Петербург, 2019).

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора

Основные результаты исследований изложены в 6 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК и индексируемых в базах Scopus и/или Web of Science, а также в трудах российских и международных научных конференций. Вклад автора в публикации, подготовленные в соавторстве, является определяющим.

Результаты и положения, выносимые на защиту

1. Результаты численного моделирования циркуляции воздуха в прямоугольном помещении при подаче струи из щелевого отверстия, расположенного под потолком на торцевой стенке.

2. Результаты численного моделирования циркуляции воздуха в прямоугольном помещении и анализ интегральных характеристик струйного течения при подаче струи из прямоугольного отверстия, расположенного на торцевой стенке на удалении от потолка.

3. Информация методического характера по применению вихререзающего подхода LES к решению вентиляционных задач, в том числе требования к

выбору поперечного размера при постановке условий периодичности и продолжительности выборки для получения осредненных величин.

4. Результаты применения методик реконструкции поля среднего модуля скорости по данным о средней скорости и интенсивности турбулентности к двум тестовым вентиляционным течениям различного типа с привлечением LES данных, позволившие получить дополнительное обоснование этих методик.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 109 наименований. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, включая 15 таблиц и 77 рисунков.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, ее научное и практическое значение, сформулированы основные задачи работы.

В главе 1 дается обзор подходов к моделированию вентиляционных течений и тестовых задач для валидации расчетных методик. Кратко обсуждаются инженерные методики оценки воздухораспределения (раздел 1.2) и представленный в литературе опыт численного моделирования (раздел 1.3). Сделан вывод о том, что отработка методик моделирования должна осуществляться, в первую очередь, на основе решения упрощенных тестовых задач. В разделе 1.4 описаны пять тестовых задач, для которых в литературе имеются хорошо документированные данные физического эксперимента и которые позиционируются как эталонные: работы P.V. Nielsen et al. (1978), J.D. Posner et al. (2003), H. Mucikat et al. (2003), M. Hurnik et al. (2015) и Y. Tominaga et al. (2015). Для каждой задачи приведены геометрические схемы моделей помещений, а также представлена систематическая информация о первичных экспериментальных данных. Для реализации целей настоящей работы из указанного перечня выбраны две тестовые задачи: тест Nielsen и тест Hurnik, для которых имеются наиболее подробные данные как по экспериментальным данным, так и по условиям измерений.

В разделе 1.5 обсуждается применение результатов моделирования в практических приложениях. В разделе 1.5.1 приведены определяемые на практике параметры комфорта, в которые входит поле среднего модуля скорости, V_a , необходимое для проведения оценок параметров теплового комфорта человека. В областях с пониженным уровнем скоростей и высоким уровнем интенсивности турбулентности, поле V_a может существенно отличаться от поля средней скорости V_m , при этом в общем случае связь величин V_a и V_m неизвестна.

В литературе предложены несколько эмпирических/эвристических методик, позволяющих проводить оценочную реконструкцию поля среднего модуля скорости V_a^{corr} на основе рассчитанных с помощью RANS полей модуля средней скорости V_m и кинетической энергии турбулентности, $\langle k \rangle$. Обзор работ, посвященных разработке коррекции модуля средней скорости приведен в разделе 1.5.2. Впервые методика «вентиляционной» коррекции значений модуля средней скорости была предложена в работе Н. Koskela et al. на основе обработки экспериментальных данных в 2001 году⁵. Кроме того, корреляционные зависимости, по которым можно реконструировать поля модуля средней скорости, V_a , по известным данным V_m и Tu_m , представлены в работах Е.М. Smirnov et al. 2004 г.⁶ и Z. Popiolek et al. 2008 г.⁷

В главе 2 представлены использованные в ходе работы математическая и вычислительная модели, на основе которых были выполнены расчеты изотермического течения воздуха постоянной плотности в тестовых помещениях. Основные результаты в работе получены с применением вихререзающего подхода – метода моделирования крупных вихрей с пристенным моделированием (WMLES), описание которого дано в разделе 2.2. В диссертационной работе также содержатся результаты, в которых использован описанный в разделе 2.3 RANS/URANS подход, основанный на решении уравнений Рейнольдса с применением полуэмпирических моделей турбулентности. В разделе 2.4 описаны вычислительные аспекты решаемых задач. Все расчеты выполнены в гидродинамическом пакете ANSYS Fluent (<https://www.ansys.com>), в котором реализован метод конечных объемов на неструктурированных сетках. Во всех расчетах использовались опции, при которых обеспечивалась дискретизация по пространству и времени со вторым порядком точности. Построение геометрии и генерация расчетных сеток осуществлялось в сеточном генераторе ICEM CFD. Общая размерность используемых в расчетах сеток варьировалась от 1 до 58 млн ячеек. Расчеты проводились с использованием ресурсов Суперкомпьютерного центра СПбПУ «Политехнический» (<http://scc.spbstu.ru/>) при максимальном распараллеливании одной задачи на 512 ядер.

Третья и четвертая главы диссертации посвящены описанию результатов расчетов течения воздуха в двух выбранных тестовых конфигурациях.

⁵ Koskela H., Heikkinen J., Niemela R., Hautalampi T. Turbulence correction for thermal comfort calculation // Building and Environment. 2001. Vol. 36 (2), Pp. 247-255

⁶ Smirnov E.M., Ivanov N.G., Telnov D.S., Son C.H., Aksamentov V.K. Computational fluid dynamics study of air flow characteristics in the Columbus module // Proc. of the 34th Int. Conf. on Environmental Systems, SAE Technical Paper 2004-01-2500, 2004. Pp. 1-8.

⁷ Popiolek Z. and Melikov A. Improvement of CFD predictions of air speed turbulence intensity and draught discomfort // Proc. of 11 Int. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 2008. Pp. 1-8.

В главе 3 представлены результаты численного моделирования пристенной турбулентной струи и индуцированного ею циркуляционного движения воздуха в ограниченном пространстве в постановке, максимально приближенной к условиям теста Nielsen. Геометрия расчетной области, показанной на рис. 1а, описана в разделе 3.1. Высота и ширина тестового помещения составляют $H = 3$ м, длина – $3H$. Под потолком помещения располагается входное щелевое отверстие высотой $h_{in} = 0.056H$. Ширина входной щели, w_{in} , варьируется и, в зависимости от варианта, составляет H или $0.5H$. Выходное отверстие, находящееся вблизи пола на противоположной стенке, имеет высоту $h_{out} = 0.16H$ и ширину H , к нему присоединен выходной канал длиной $0.5H$. Задача решалась с заданием на входе как однородного профиля скорости, так и профиля скорости, извлеченного из решения вспомогательной задачи о течении в щелевом канале (рис. 1б,в). Среднерасходная скорость на входе, в соответствии с условием эксперимента, полагалась равной $V_{in} = 0.455$ м/с, а соответствующее число Рейнольдса $Re = \rho h_{in} V_{in} / \mu = 5233$, при этом плотность $\rho = 1.2$ кг/м³ и динамическая вязкость $\mu = 1.8 \times 10^{-5}$ кг/м·с.

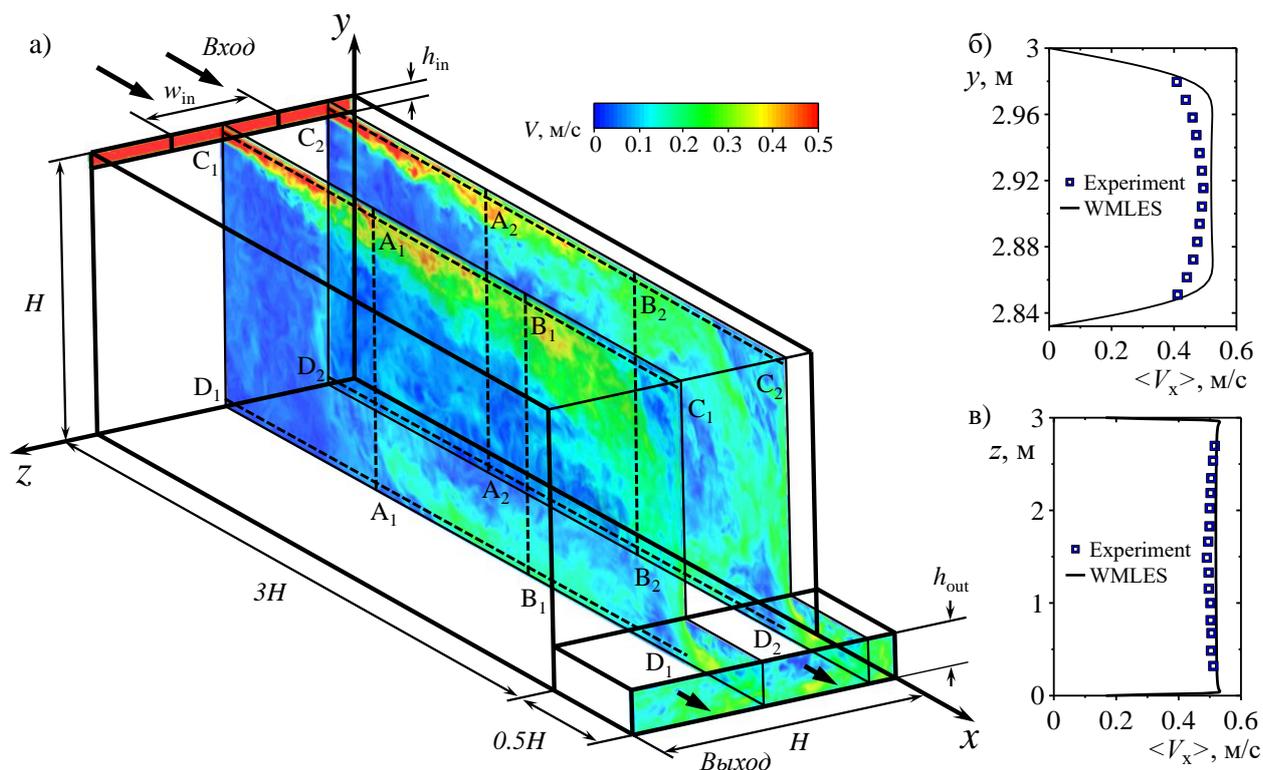


Рис. 1. а) Геометрия расчетной области: штриховыми линиями показаны сечения, вдоль которых результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными; схема дополнена изображениями мгновенных полей модуля скорости в продольных сечениях помещения ($z = 0.3$ м, 1.5 м); входные профили скорости в сечениях б) $z = 1.5$ м ($z = H/2$) и в) $y = 2.916$ м ($y = H - h_{in}/2$)

В [разделе 3.2](#) подробно анализируются рассчитанные поля скорости и характеристик ее пульсаций. Несмотря на геометрическую простоту, течение, формирующееся в помещении, сочетает множество осложняющих моделирование факторов (рис. 1а, рис. 2): под потолком помещения развивается квазидвумерная пристенная струя; после разворота нисходящая струя натекает на нижнюю стенку; свою роль играют и боковые стенки, которые обуславливают в целом трехмерный характер осредненного течения даже в случае $w_{in} = H$.

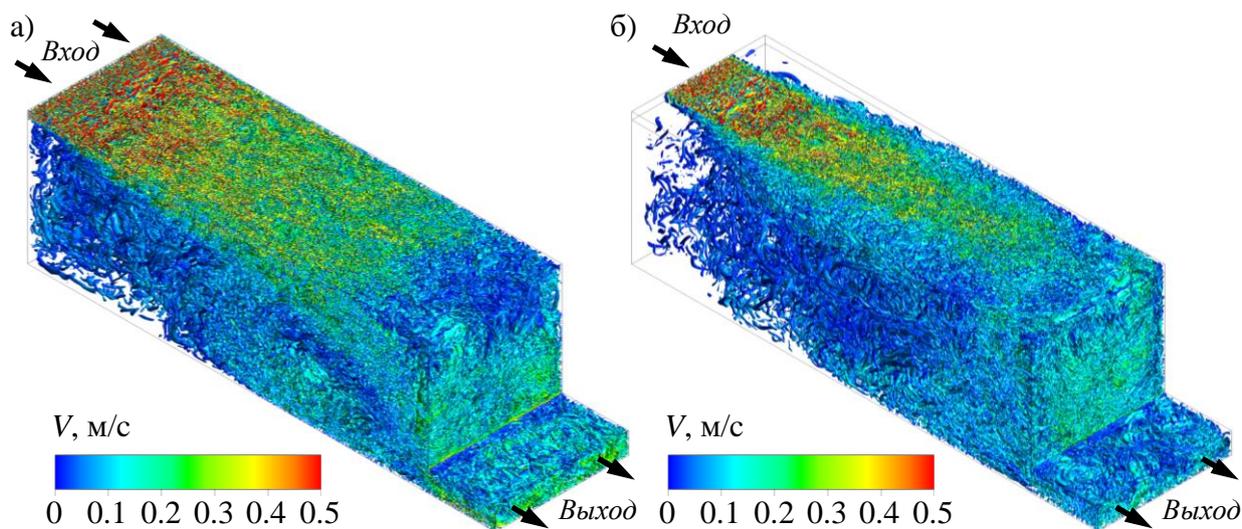


Рис. 2. Мгновенные изоповерхности Q -критерия ($Q = 0.1c^{-2}$), с окраской по модулю скорости, построенные для двух вариантов задачи: а) $w_{in} = H$ и б) $w_{in} = 0.5H$

В [разделе 3.3](#) представлены обширные результаты методических расчетов, целью которых являлось обоснование качества полученных численных решений, основные рекомендации и выводы приведены в [разделе 3.3.10](#). Серия методических расчетов была выполнена как для полной постановки модельной задачи, так и в квазидвумерной постановке с заданием условий периодичности на боковых границах; для периодической постановки было исследовано влияние на решение протяженности расчетной области в трансверсальном направлении. В [разделе 3.3.1](#) анализируется влияние продолжительности временной выборки на результаты расчетов осредненных параметров течения (поля компонент скорости и среднеквадратичных отклонений). Показано, что для представительного осреднения достаточно выборки, протяженность которой составляет примерно 1000 с, что соответствует примерно 30 временным масштабам, оцененным по длине помещения и максимальной скорости в рабочей зоне. В [разделе 3.3.2](#) приводятся данные по влиянию временного шага на результаты расчетов – показано, что использование шагов по времени, составляющих 0.01 с и 0.006 с, дает решение,

практически не меняющееся при уменьшении временного шага (в обоих случаях число Куранта было меньше единицы).

Раздел 3.3.3 посвящен исследованию сеточной чувствительности решения. Представлены результаты анализа влияния сетки как на локальные значения скорости, так и на распределения трения на стенках. В разделе 3.3.4 проанализированы распределения относительной подсеточной вязкости и подсеточной кинетической энергии турбулентности, а в разделе 3.3.5 даны оценки колмогоровского масштаба по различным методикам.

В разделе 3.4 результаты LES моделирования сравниваются с данными физического эксперимента. На рис. 3 приведены профили продольной компоненты скорости и среднеквадратичного значения продольных пульсаций в сечениях, положение которых указано на рис. 1а, для вариантов с различной шириной входной щели: $w_{in} = H$ (рис. 3а,б) и $w_{in} = 0.5H$ (рис. 3в,г). Как видно, результаты LES расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными P.V. Nielsen в области пристенной струи; в зоне возвратного течения, характеризующейся сравнительно малыми скоростями, имеет место некоторое рассогласование между результатами расчетов и данными эксперимента.

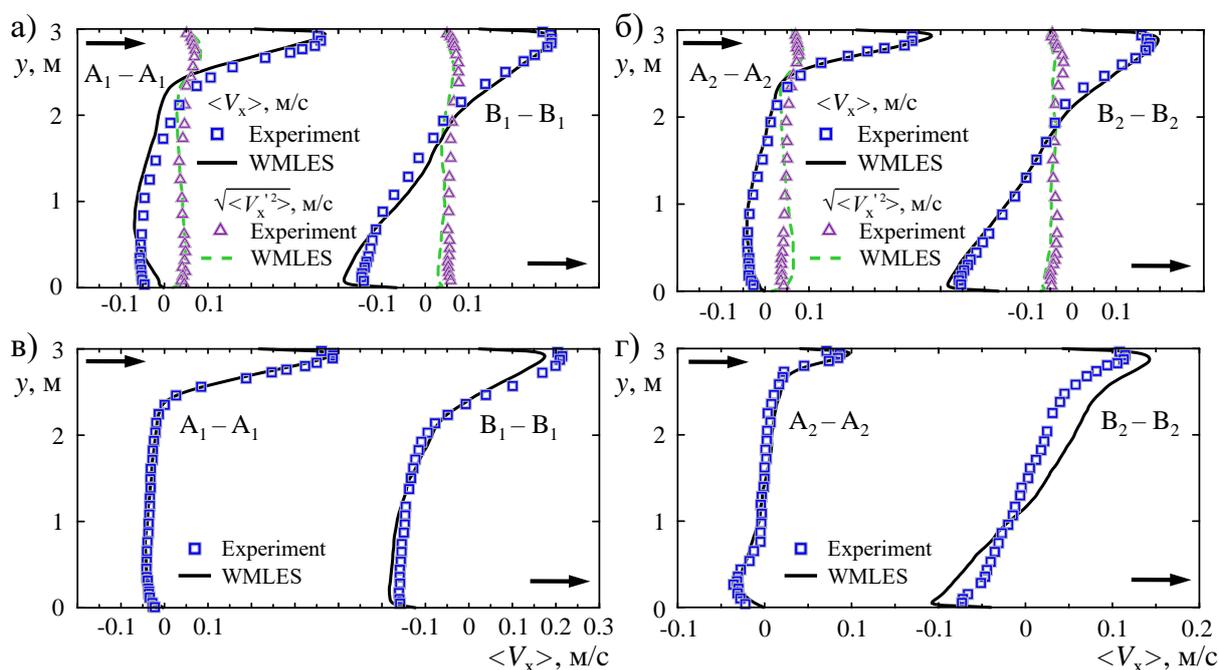


Рис. 3. Профили продольной компоненты скорости и среднеквадратичного значения продольных пульсаций в сечениях А-А и В-В, построенные для двух вариантов задачи: а,б) $w_{in} = H$ и в,г) $w_{in} = 0.5H$

Глава 4 содержит описание результатов расчетов циркуляционного движения воздуха в прямоугольном помещении при боковой подаче из отдаленного от потолка отверстия (тест Hurnik), схематически показанном на рис. 4а. Помещение имеет форму параллелепипеда шириной $W = 6$ м, длиной $L = 6$ м и высотой

$H = 3$ м. На одной из вертикальных стенок расположены прямоугольные приточное и вытяжное отверстия одинакового размера $b \times h = 14.4 \times 9.6$ см. Расстояние от пола до центра приточного отверстия составляет $H_{in} = 2.35$ м, отверстие расположено симметрично относительно торцевых стенок. На входе в помещение задается распределение скорости, извлеченное из RANS расчета о течении воздуха в сопле (рис. 4б). В соответствии с условиями эксперимента, среднерасходная скорость во входном отверстии составляет $U_{bulk} = 5.16$ м/с, при этом число Рейнольдса, построенное по эквивалентному диаметру, $D_e = (4bh/\pi)^{0.5} = 0.133$ м, равно $Re = D_e U_{bulk} / \nu = 4.56 \times 10^4$. В расчетах использовались две квазиструктурированные сетки из гексагональных ячеек (размерностью 16 и 35 млн ячеек) и неструктурированная сетка из 10 млн полиэдральных ячеек.

В течении, структуру которого иллюстрирует рис. 4а, можно, как и в тесте Nielsen, выделить две характерные области. Первая область – струйное течение с относительно высокими скоростями. Вторая область – низкоскоростная зона возвратного течения. Это так называемая рабочая (обитаемая) зона, где в реальных условиях могут находиться люди; локальные характеристики распределения скорости в этой зоне важны с точки зрения задач обеспечения комфорта. Разворот струи при взаимодействии с противоположной стенкой и эжекция окружающего воздуха приводят к формированию в рабочей зоне сложного трехмерного течения. Подробный анализ данных о структуре моделируемого вентиляционного течения представлен в [разделе 4.2](#). Результаты методических расчетов (обоснование выбора промежутка осреднения и анализ сеточной чувствительности решения) изложены в [разделе 4.3](#).

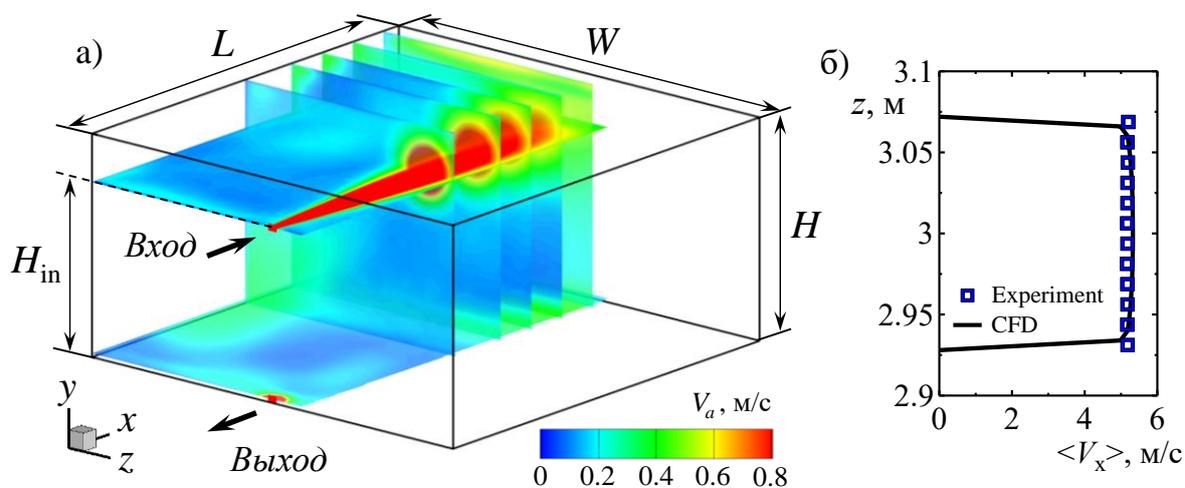


Рис. 4. а) Геометрия расчетной области; на схеме изображены поля среднего модуля скорости в нескольких сечениях помещения; б) профили скорости на входе в помещение в сечении $y = 2.35$ м ($y = H_{in}$)

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных представляется в разделе 4.4 как для локальных величин, так и для интегральных характеристик вентиляционного потока. Детальное сопоставление локальных величин приводится в разделе 4.4.1. На рис. 5 приведены профили продольной компоненты скорости в горизонтальном и вертикальном сечениях в области струи, а также профили среднеквадратичных значений продольных пульсаций, полученные по данным расчета и эксперимента. Штриховой линией на графиках обозначено положение центра приточного отверстия. Расчеты по методу LES достаточно точно воспроизводят наблюдающиеся в эксперименте особенности течения в области струи: расчет правильно определяет скорость расширения струи вниз по течению, а также значение и положение максимума скорости в струе. Различия расчетных и экспериментальных данных заметны в слоях смешения в сечениях, расположенных на удалении от входа (начиная с сечения f_1 , рис. 5а).

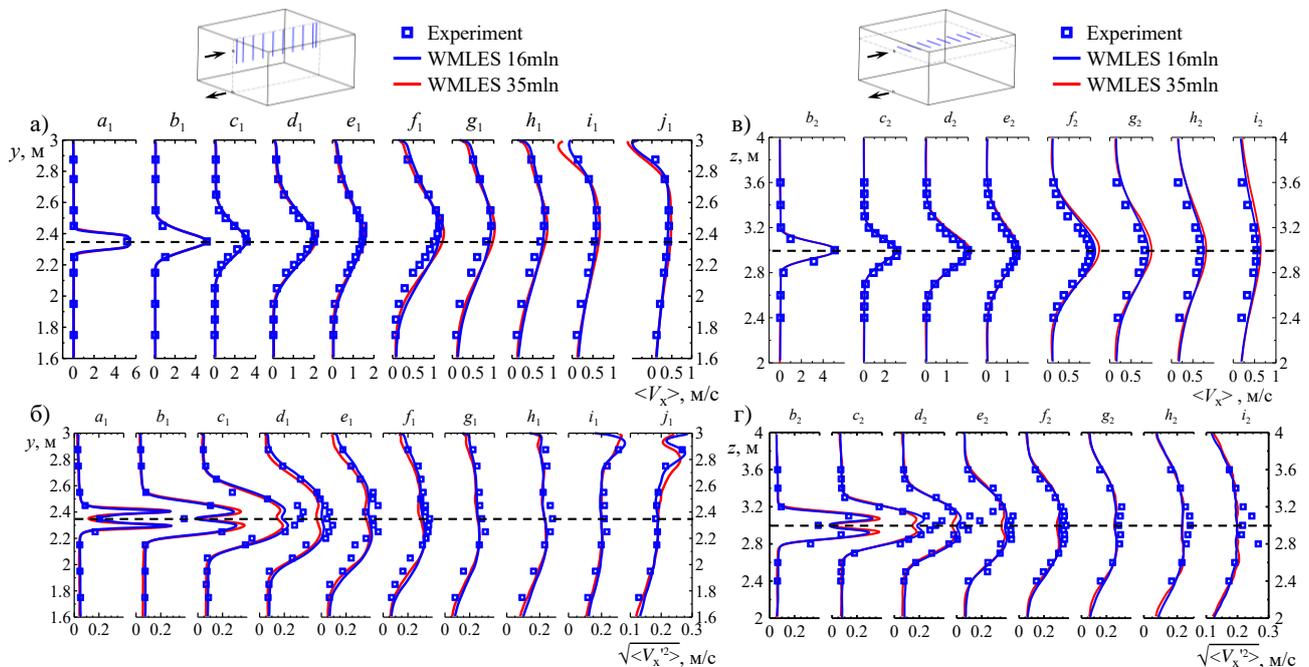


Рис. 5. Профили а,в) продольной компоненты скорости и б,г) среднеквадратичных значений продольных пульсаций в а,б) вертикальных и в,г) горизонтальных сечениях области струи

Расчетные данные по профилям скорости, представленные в разделе 4.4.5, достаточно хорошо согласуются с данными эксперимента и в рабочей (обитаемой) зоне (рис. б). Отличия наблюдаются в слоях смешения (в сечениях l_1, p_1), а также в застойной области, формирующейся в центре помещения (в сечениях $l_2 - l_3, m_2 - m_3$). По графикам видно, что с увеличением размерности расчетной сетки расчетные профили скорости становятся ближе к экспериментальным, особенно в областях с низкими скоростями (рис. бе сечения l_3 и m_3). Максимальная разница расчетных и экспериментальных значений скорости и соответствующих пульсаций не превышает 10%.

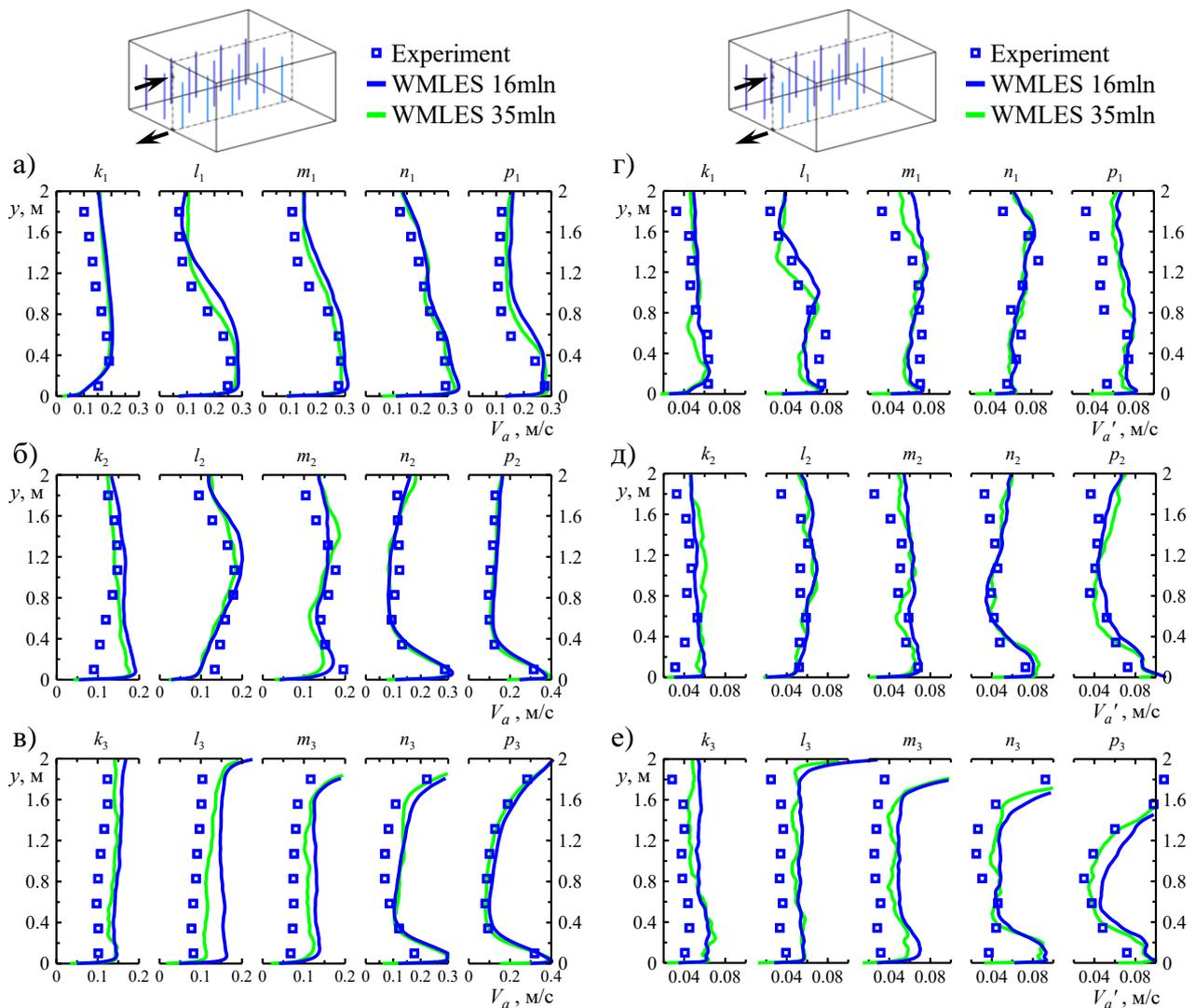


Рис. 6. Профили а-в) продольной компоненты скорости и г-е) ее пульсации в вертикальных сечениях рабочей (обитаемой) зоны

В разделе 4.4 подробно описана методика обработки локальных значений средней скорости, направленная на оценку интегральных характеристик струйного течения. Для струи в ограниченном пространстве получен профиль скорости эквивалентной круглой струи (раздел 4.4.3), с использованием которого проведена оценка интегральных характеристик: ширины струи, ее расхода и импульса. Косвенно обоснованность применения такой методики дают рис. 7а, б. На рис. 7а изменение скорости вдоль оси струи приведено как для струи, распространяющейся в ограниченном пространстве (настоящий расчет и экспериментальные данные М. Hurnik), так и для круглой затопленной струи в безграничном пространстве (данные эксперимента Т. Trüpel⁸). Как видно из рис. 7б, согласованные между собой расчетные и экспериментальные значения полуширины

⁸ Trüpel T. Ueber die Einwirkung eines Luftstrahles auf die umgebende Luft // Zeitschrift für das gesammte Turbinwesen, №5-6, 1915.

струи, определенной по изотахе $0.5 \langle V_{x_max} \rangle$, при $x/D_e < 25$ также находятся в соответствии с данными для круглой затопленной струи, распространяющейся в безграничном пространстве.

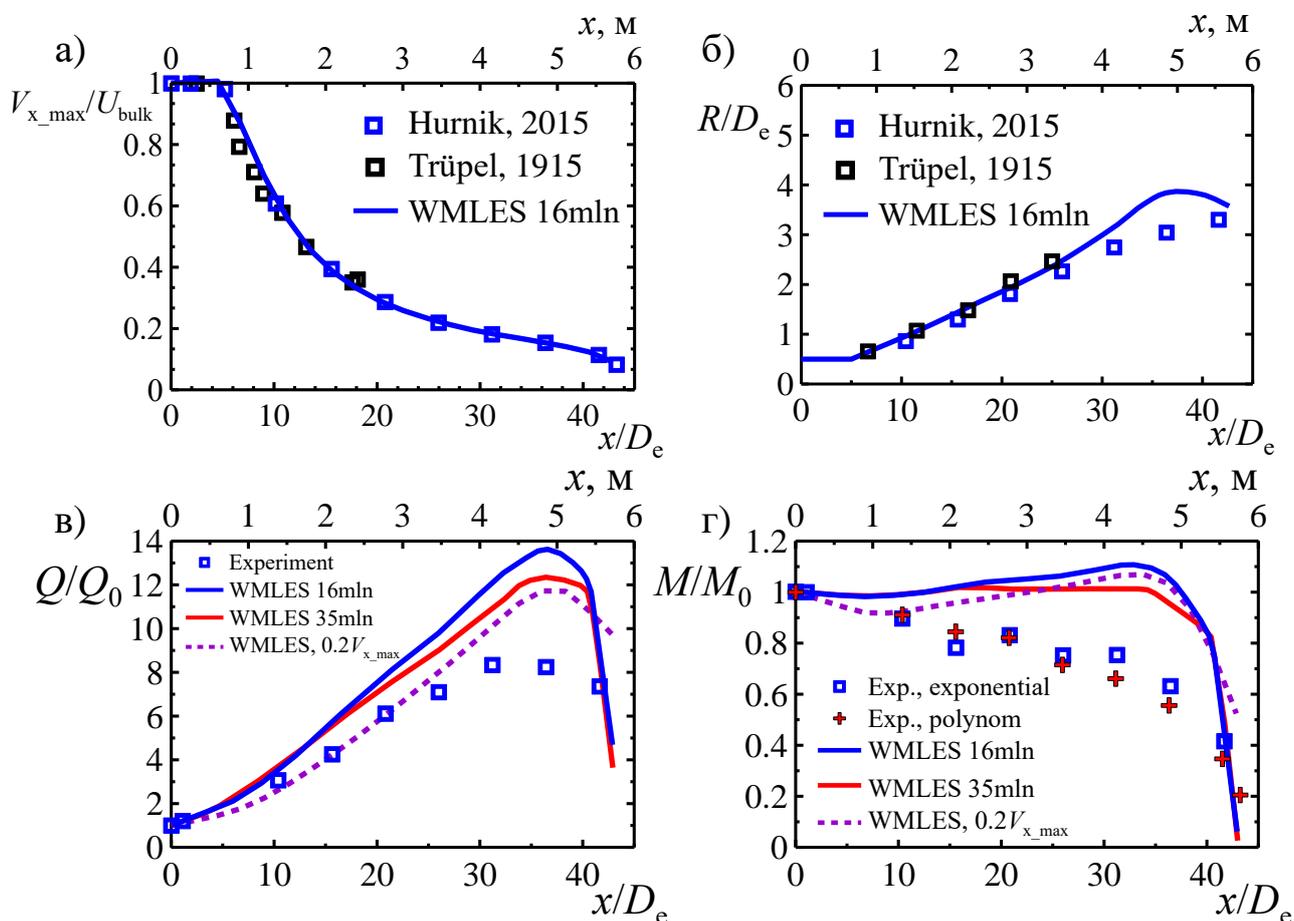


Рис. 7. Интегральные параметры струи: изменение а) скорости на оси струи, б) ширины струи, в) расхода и г) импульса вдоль области распространения струи

В разделе 4.4.4 проводится оценка секундного массового расхода струи, Q , и ее импульса, M . Распределения Q и M приведены на рис. 7в,г. Сплошными линиями и квадратными символами на графиках показаны данные, в которых при обработке используется профиль скорости эквивалентной осесимметричной струи, построенный с использованием обобщенного гауссовского распределения. Символами, обозначенными на рис. 7г красным цветом, изображены экспериментальные данные по импульсу струи, в которых при обработке использовался профиль скорости эквивалентной осесимметричной струи, построенный с помощью полиномиальной зависимости. Штриховой линией показаны величины Q и M , полученные при непосредственном интегрировании расчетных данных по поверхности поперечных сечений струи, ограниченной изотахой $0.2 \langle V_{x_max} \rangle$. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает, что уровень

расхода в струе, полученный по данным численного моделирования, даже на участке $x/D_e < 25$ оказывается выше значений расхода, полученных по экспериментальным данным. Расчетные данные также демонстрируют более высокие значения импульса струи по сравнению с экспериментальными оценками.

В главе 5 LES данные, полученные для двух тестовых задач, применяются для оценки методики коррекции поля модуля средней скорости или, другими словами, реконструкции поля среднего модуля скорости. В разделе 5.1 представляются результаты исследования эффективности применения процедур коррекции на основе анализа LES данных, а в разделе 5.2 процедуры коррекции применяются к данным RANS/URANS моделирования. В качестве примера на рис. 8а иллюстрируются различия между полями скорости V_a и V_m , полученными по данным LES моделирования для теста Nielsen. Различия между непосредственно рассчитанным («истинным») полем среднего модуля скорости, V_a , и реконструированными полями этой величины, $V_a^{Smirnov}$, $V_a^{Popielek}$ и $V_a^{Koskela}$, полученными с помощью трех методик коррекции по данным для V_m и $\langle k \rangle$ из LES моделирования, показаны на рис. 8б-г. Локальные различия полей V_a и V_m достигают 80% (рис. 8а). Использование процедур коррекции позволяет реконструировать поля скорости, V_a^{corr} , отличия которых от истинного поля V_a радикально уменьшены и не превышают 10% (рис. 8б-г).

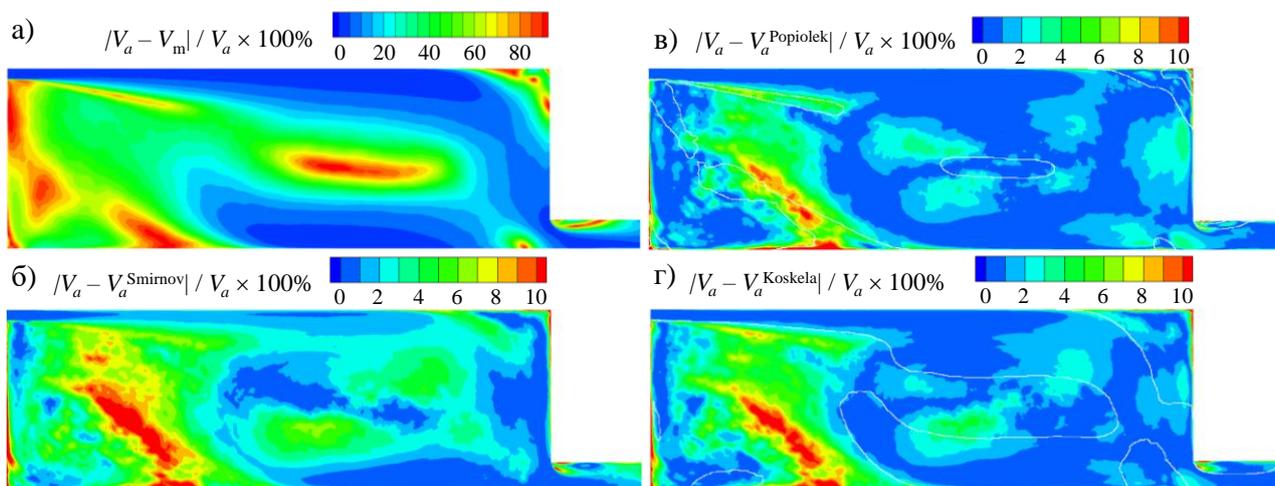


Рис. 8. а) Различие между полями скорости V_a и V_m ; б-г) оценка качества реконструкции поля среднего модуля скорости с помощью трех методик коррекции; данные LES для теста Nielsen в сечении $z = 1.5$ м

На рис. 9 приведены профили модуля средней скорости, V_m , полученные по данным LES и URANS расчетов для тестов Nielsen (с привлечением $k-\epsilon$ RNG модели, рис. 9а) и Hurnik (с привлечением стандартной $k-\epsilon$ модели, рис. 9б). Для

сравнения на график нанесены профили среднего модуля скорости, V_a , полученные по LES данным, и реконструированные профили этой величины, V_a^{Smirnov} , полученные по данным URANS. По графикам видно, что для теста Nielsen в сечении B_1-B_1 (рис. 9а) и для теста Hurnik в сечении m_3 (рис. 9б) данные для модуля средней скорости, V_m , полученные в LES и URANS, практически совпадают. Здесь наблюдается и практически полное совпадение данных для величины V_a , полученных непосредственно в LES расчетах и при соответствующей обработке URANS данных V_a^{Smirnov} . В остальных сечениях профили модуля средней скорости, V_m , построенные по данным LES и URANS отличаются значительно. Однако и в этом случае применение методики коррекции средней скорости к результатам URANS вычислений, позволяет получить данные V_a^{Smirnov} , близкие к величине модуля средней скорости V_a , непосредственно полученной в ходе LES расчета.

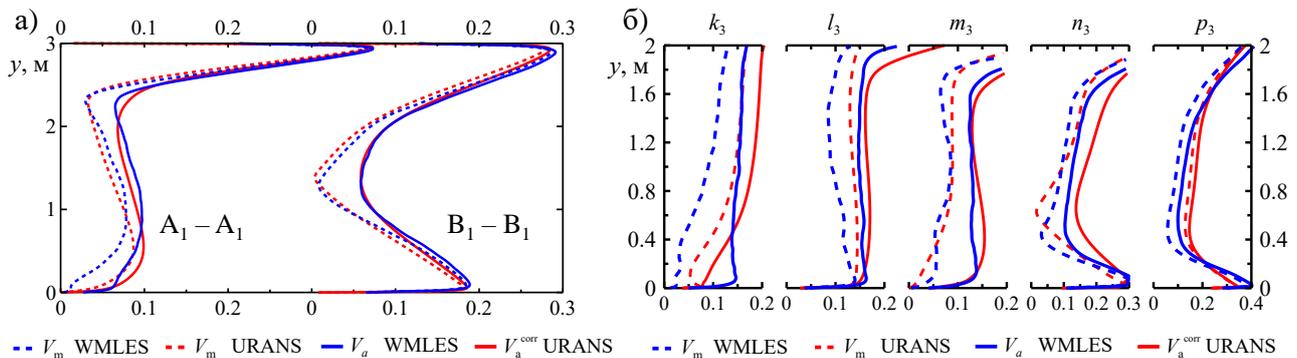


Рис. 9. Профили скорости V_m , V_a и V_a^{corr} по методике Smirnov et al. (2004), м/с, по данным WMLLES и URANS (k - ε) вычислений для тестов: а) Nielsen ($z = 1.5$ м) и б) Hurnik ($z = 3$ м)

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, которые сводятся к следующему:

1. Проведен анализ представленных в литературе физических экспериментов, направленных на исследование изотермических вентиляционных течений в упрощенных геометрических конфигурациях и позиционируемых как эталонные в данной области; из имеющегося массива данных наиболее подходящими для валидации вычислительных методик признаны две тестовые задачи: с подачей воздуха из плоской припотолочной щели (P.V. Nielsen et al., 1978 год) и при боковой струйной подаче из отдаленного от потолка прямоугольного отверстия (M. Hurnik et al., 2015 год).

2. Для выбранных тестовых задач, каждая из которых характеризуется разделением вентилируемого пространства на зоны струйного течения и низкоско-

ростного рециркуляционного течения (рабочую зону), проведены систематические расчеты на основе вихреразрешающего LES моделирования. Полученный массив расчетных данных позволил сформулировать рекомендации по постановке входных граничных условий, выбору размеров ячеек расчетной сетки, временного шага, продолжительности временной выборки для сбора статистики, схемы аппроксимации конвективных потоков и подсеточной модели при проведении расчетов вентиляционных течений при числах Рейнольдса, построенных по линейному размеру приточного отверстия и входной скорости, из диапазона $5 \times 10^3 \dots 5 \times 10^4$.

3. Установлено, что в случае использования квазидвумерной, периодической по третьему направлению постановки задачи для моделирования движения воздуха в помещении при щелевой припотолочной подаче размер W расчетной области в направлении периодичности должен быть близок по величине к высоте помещения H . При проведении расчетов в области протяженностью $W/H = 1$ предсказываемая картина статистически двумерного движения среды правильно отражает характеристики течения, реализующегося в эксперименте в центральной части помещения.

4. Показано, что при моделировании течения в помещении с боковой струйной подачей минимальная временная выборка, используемая для получения представительной статистики в рабочей зоне, должна составлять 20-30 временных масштабов, оцененных по длине помещения и максимальной скорости в рабочей зоне.

5. Показано, что для тестового помещения, которое вентилируется воздушной струей, подаваемой из примыкающего к потолку щелевого отверстия, результаты LES расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными в пристенной струе, однако наблюдается некоторое рассогласование результатов расчетов с экспериментом в зоне возвратного течения, для которой характерны сравнительно малые значения скорости.

6. Для тестового помещения, вентилируемого одиночной струей, подаваемой из отдаленного от потолка прямоугольного отверстия, проведено обстоятельное сопоставление рассчитанных локальных значений средней скорости и ее пульсаций с экспериментальными данными. Получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных как в области струи, так и в зоне возвратного течения.

7. Для струйной зоны трехмерного течения, формирующегося в ограниченном пространстве при боковой подаче вентиляционной струи из прямоугольного отверстия, посредством специальной обработки LES данных построен профиль

скорости, соответствующий основному участку эквивалентной осесимметричной струи, и определены интегральные параметры струйного течения. Показано, что имеется хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных по значениям скорости затухания и угла раскрытия эквивалентной струи. Значения расхода и импульса струи, полученные при обработке данных LES, примерно на 20% выше, чем экспериментальные оценки.

8. Для двух тестовых вентиляционных задач по данным LES моделирования проведен подробный сравнительный анализ полей среднего модуля скорости, V_a , и модуля средней скорости, V_m . Показано, что для обеих задач различия между полями V_a и V_m могут достигать 80% в низкоскоростной рабочей зоне и составляют около 10% в области струи.

9. На основе данных моделирования LES методом выполнена оценка применимости трех представленных в литературе методик коррекции поля модуля средней скорости с привлечением локальных данных по интенсивности турбулентности. Установлено, что все три методики обеспечивают сопоставимый уровень качества коррекции, заключающейся в реконструкции поля среднего модуля скорости V_a . Показано, что полученные при применении методик реконструкции локальные значения среднего модуля скорости отличаются менее чем на 10% от значений этой величины, непосредственно полученных в LES расчетах. Применение методик реконструкции к пульсационным характеристикам (среднеквадратичным значениям) оказывается менее эффективным: локальные различия между V_a^{corr} и V_a' достигают 50%.

10. Установлено, что для обеих тестовых задач результаты расчетов полей модуля средней скорости по методу RANS/URANS в целом соответствуют полям этой величины, полученным при осреднении LES данных. Для обеих задач реконструированные поля среднего модуля скорости V_a^{corr} , полученные в результате применения той или иной методики вентиляционной коррекции к данным RANS/URANS моделирования, хорошо согласуются с полями значений V_a , непосредственно сгенерированными в LES расчетах.

Основные опубликованные работы автора по теме диссертации

1. Zasimova M.A., Ivanov N.G. Numerical simulation of air distribution in a room with a sidewall jet under benchmark test conditions // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1959, 050033, 8p. doi: 10.1063/1.5034661 (Proceedings of the International Scientific Conference on Mechanics «The Eighth Polyakhov's Reading», 29 January - 2 February 2018, St. Petersburg, Russia). (**Web of Science, Scopus**).

2. Ivanov N.G., Zasimova M.A. Large Eddy Simulation of airflow in a test ventilated room // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1038. 012136. 6p.

doi: 10.1088/1742-6596/1038/1/012136 (Proceedings of the International Conference PhysicA.SPb/2017, 24-26 October 2017, St. Petersburg, Russia). (**Web of Science, Scopus**).

3. Ivanov N.G., Zasimova M.A. Large Eddy Simulation of Airflow in a Room with a Sidewall Jet: Comparison with Benchmark Test Data for Occupied Zone / Proceedings of Roomvent & Ventilation 2018: Excellent Indoor Climate and High Performing Ventilation (Ed. by Risto Kosonen, Mervi Ahola and Jarkko Narvanne, June 2-5, 2018, Aalto University, Espoo, Finland). SIY Indoor Air Information Oy, Helsinki, Finland, 2018. P. 319-324.

4. Ivanov N.G., Zasimova M.A. Mean air velocity correction for thermal comfort calculation: assessment of velocity-to-speed conversion procedures using Large Eddy Simulation data. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1135. 012106. 6p. doi: 10.1088/1742-6596/1135/1/012106 (Proceedings of the International Conference PhysicA.SPb/2018, 23-25 October 2018, St. Petersburg, Russia). (**Web of Science, Scopus**).

5. Ivanov N., Zasimova M., Smirnov E., Markov D. Evaluation of mean velocity and mean speed for test ventilated room from RANS and LES CFD modeling // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 85, 02004, 7p. doi: 10.1051/e3sconf/20198502004 (Proceedings of the International Conference EENVIRO, 10-13 October 2018, Cluj Napoca, Romania). (**Web of Science, Scopus**).

6. Засимова М.А., Иванов Н.Г. Особенности циркуляции воздуха в помещении при боковой струйной подаче / XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (19-24 августа 2019 года, г. Уфа, Россия): сборник трудов в 4-х томах. Том 2: Механика жидкости и газа. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. С. 549-551.

7. Засимова М.А., Иванов Н.Г., Марков Д. Численное моделирование циркуляции воздуха в помещении при подаче из плоской щели. Часть 1: отработка применения вихререзающего подхода с использованием периодической постановки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. №3. С. 56-74. doi: 10.18721/JPM.13305 (**список ВАК, Web of Science**).

8. Засимова М.А., Иванов Н.Г., Марков Д. Численное моделирование циркуляции воздуха в помещении при подаче из плоской щели. Часть 2: LES-расчеты для помещения конечной ширины // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. №3. С. 75-92. doi: 10.18721/JPM.13306 (**список ВАК, Web of Science**).