

DOI: 10.18721/JPM.13306
 УДК 532.517

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОДАЧЕ ИЗ ПЛОСКОЙ ЩЕЛИ. II. LES-расчеты для помещения конечной ширины

М.А. Засимова¹, Н.Г. Иванов¹, Д. Марков²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
 Санкт-Петербург, Российская Федерация;

² Софийский технический университет, София, Болгария

Представлены результаты численного моделирования турбулентного течения воздуха в тестовом помещении на основе вихреразрешающего подхода – метода моделирования крупных вихрей с пристенным моделированием. Вентиляция помещения осуществляется плоской воздушной струей, подаваемой из расположенного под потолком на торцевой стенке щелевого отверстия, при $Re = 5233$. Задача ставилась в постановке, максимально полно воспроизводящей условия тестовых экспериментов (Nielsen et al., 1978, 1990). Рассмотрены две геометрические конфигурации, отличающиеся шириной входного отверстия. Расчеты в программном пакете ANSYS Fluent выполнены с использованием сетки размерностью 48 млн. ячеек. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными в пристенной струе, однако наблюдается заметное рассогласование результатов расчетов и эксперимента в зоне обратного течения (обитаемой зоне), характеризующейся малыми скоростями.

Ключевые слова: турбулентное течение, плоская струя, метод моделирования крупных вихрей, вентиляция

Ссылка при цитировании: Засимова М.А., Иванов Н.Г., Марков Д. Численное моделирование циркуляции воздуха в помещении при подаче из плоской щели. II. 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

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

NUMERICAL MODELING OF AIR DISTRIBUTION IN A TEST ROOM WITH 2D SIDEWALL JET. II. LES-computations for the room with finite width

M.A. Zasimova¹, N.G. Ivanov¹, D. Markov²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

² Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria

The paper presents the results of numerical modeling of turbulent airflow in a test room based on the vortex-resolving wall-modeled large eddy simulation approach. The room ventilation is provided by a plain air jet at $Re = 5233$. The jet is supplied from a slit placed at a side wall under the ceiling. The problem formulation reproduces the test experiment conditions (Nielsen et al., 1978, 1990) as completely as possible. Two configurations with various air supply slit width are considered. Calculations are carried out with the ANSYS Fluent software using the grid consisting of 48 million cells. The paper demonstrates that in the near-wall jet zone the computational results agree well with the experimental data, but visible disagreement is obtained in the recirculation flow region (occupied zone) with relatively low velocities.

Keywords: turbulent airflow, plain jet, large eddy simulation, ventilation

Citation: Zasimova M.A., Ivanov N.G., Markov D. Numerical modeling of air distribution in a test room with 2D sidewall jet. II. LES-computations for the room with finite width, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (3) (2020) 75–92. DOI: 10.18721/JPM.13306

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

При разработке и оптимизации систем отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК) воздуха в помещениях жилых, общественных и производственных сооружений необходимо правильно организовывать воздухообмен, обеспечивая комфортные для человека условия микроклимата. Широко используются расчетные методы воздухообмена, основанные на интегральных оценках и балансовых соотношениях, отвечающих различным условиям раздачи приточного воздуха [1]. Такие методы разрабатываются на основе эмпирических подходов и могут быть настроены лишь на определенный тип течения (распространение свободной затопленной струи, распространение пристенной струи и др.). В связи с этим балансовые расчетные методы не всегда способны обеспечить полную и количественно достоверную информацию даже об интегральных параметрах течения для реальных условий, например для помещений со сложной геометрией. Кроме того, в прикладных задачах подача воздуха в помещение обычно осуществляется с помощью диффузоров различных типов, а описание особенностей диффузоров в расчетных методах затруднено. Для получения полной картины течения, включающей информацию о средних и локальных характеристиках потока, необходимо привлечение более точных подходов к описанию турбулентного движения воздуха.

Важную для обоснования проектных решений информацию о пространственной структуре течения, типичной для вентиляционных задач, можно получить на основе численного моделирования многомерных задач гидрогазодинамики. Один из наиболее распространенных подходов к численному моделированию турбулентных течений – ре-

шение стационарных или нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса [2], замкнутых полуэмпирической моделью турбулентности. Такой подход в литературе часто называют сокращенно RANS/URANS (Steady/Unsteady Reynolds-Averaged Navier – Stokes). Отметим, что, согласно литературным данным для свободных струйных течений, хорошо зарекомендовали себя двухпараметрические модели турбулентности типа k - ε [3], а также модель Секундова [4] с одним дифференциальным уравнением, однако для расчетов сложных струйных течений валидация RANS-данных продолжает оставаться актуальной задачей.

Среди методов предсказания параметров турбулентных потоков высокую точность имеют вихреразрешающие подходы, позволяющие получать не только осредненные, но и актуальные поля физических величин. К классическим вихреразрешающим подходам относится, прежде всего, метод прямого численного моделирования, основанный на непосредственном решении полных уравнений Навье – Стокса (DNS: Direct Numerical Simulation). Другой вихреразрешающий подход – метод моделирования крупных вихрей (LES: Large Eddy Simulation), в котором решаются отфильтрованные уравнения Навье – Стокса, что позволяет разрешать крупные вихри, но требует полуэмпирического моделирования вихрей малых масштабов.

Применение вихреразрешающих подходов сопряжено с чрезвычайно большими вычислительными затратами, однако LES-подход, по сравнению с DNS, требует сравнительно меньших вычислительных ресурсов, особенно если не претендовать на разрешение пристеночных областей, а применять там технологии моделирования, основанные на RANS-подходе. На протяжении двух по-



следних десятилетий активно развиваются гибридные RANS-LES-подходы, к числу которых относится и LES с пристенным моделированием (WMLES: Wall Modeled LES). Детальное описание вихреразрешающих подходов представлено, например, в работах [5, 6].

Оценки степени неопределенности при применении вихреразрешающих моделей LES и RANS-LES, как и для других подходов к моделированию турбулентности, включающих ту или иную степень эмпиризма, можно получить при решении тестовых задач, для которых имеются достоверные и хорошо описанные экспериментальные данные.

В настоящей работе представлены результаты валидационных расчетов для широко известной тестовой задачи о вентиляционном течении в помещении при подаче воздушной струи из щелевого отверстия, расположенного под потолком [7, 8]. Серия лабораторных экспериментов, описанных в работах [7, 8], была направлена на изучение турбулентного течения воздуха в модели вентилируемого помещения. Для измерений с контролируемой точностью полей скорости и пульсационных характеристик применялся метод лазерной доплеровской анемометрии (LDA: Laser Doppler Anemometry). Данные измерений хорошо документированы и доступны как в графическом виде в публикациях [7, 8], так и в виде базы данных на сайте <http://www.cfd-benchmarks.com/>.

Настоящая статья представляет собой продолжение работы [9], где методика применения подхода WMLES была отработана на основе расчетов в упрощенной периодической постановке. В отличие от статьи [9], здесь рассматривается полная постановка задачи, включающая боковые стенки и максимально соответствующая условиям эксперимента.

За время, прошедшее с момента опубликования экспериментальных данных [7], неоднократно предпринимались попытки воспроизведения качественной картины течения и количественных данных по профилям скорости с помощью методов вычислительной гидроаэродинамики. На указанном выше сайте, помимо собственно экспери-

ментальных данных, размещены и наиболее известные данные расчетов, выполненных различными научными группами за период 1991 – 2013 гг. для условий, соответствующих тесту [7]. Необходимо отметить, что в литературе отсутствуют результаты численного моделирования для условий экспериментального исследования [8] с уменьшенной шириной входного щелевого отверстия.

В таблице приведены краткие сведения о работах [10 – 30], в которых представлены результаты численного моделирования воздухообмена в модели помещения, приближенной к данным статьи [7]. Расчеты выполнялись в двумерной, квазидвумерной (с заданием условий периодичности в поперечном направлении) и трехмерной постановках. В указанных статьях подробно изложены результаты методических расчетов, показано влияние моделей турбулентности и различных численных параметров на получаемое решение.

В таблице представлены данные об общих размерностях расчетных сеток, которые были использованы в численных расчетах, описанных в статьях [10 – 30]. Естественно, размерности сеток постепенно увеличиваются со временем: так, самая грубая расчетная сетка, использовавшаяся в расчетах в 1991 г., состоит из 100 контрольных объемов, а наиболее подробная сетка – приблизительно из $4,8 \cdot 10^7$ ячеек (2018 год).

По данным таблицы видно, что модельная задача численно решалась как с помощью RANS-подхода, замыкаемого полуэмпирическими моделями турбулентности (такими как k - ϵ , k - ω , k - ω SST и др.), так и с помощью вихреразрешающего LES-подхода в сочетании с различными подсеточными моделями. До недавнего времени лишь три группы авторов (Davidson et al. [17, 18], Bennetsen [19], Voight [20]) выполнили расчеты для модельной задачи [7] с помощью LES-подхода, однако, на весьма грубых, с точки зрения современных представлений, расчетных сетках (с размерностью менее полумиллиона ячеек). Важно отметить, что, как теперь понятно [9], на таких сетках для обсуждаемой задачи нет

**Сведения о публикациях,
в которых численно моделируется эксперимент [7]**

Номер	Авторы	Год	Страна	Метод	Код	Расчетная сетка
<i>2D-постановка задачи</i>						
[10]	Heikkinen, Piira	1991	Финляндия	RANS (k - ϵ)	WISH	28×17 , 45×26
[11]	Vogl, Renz	1991	Германия	RANS (k - ϵ)	Fluent	56×62
[12]	Skalicky, Morgenstern, Auge, Hanel, Rosler	1992	Германия	RANS (k - ϵ)	Psiom2D ResCUE	64×32 , 128×64
[14]	Chen	1995	США	RANS (k - ϵ , k - ϵ RNG)	PHOENICS	50×45 , 100×70
[15]	Chen	1996	США	RANS (k - ϵ ; RSTM -IP, -GY, -QI)	PHOENICS	50×45 ,
[16]	Peng, Davidson, Holmberg	1996	Швеция	RANS (LRN k - ϵ)	CALC-BFC	50×47 , 102×132
[19]	Bennetsen	1999	Дания	RANS (k - ϵ , k - ω , ASM, DSM)	CFX 4.2	72×48 , 144×96
[20]	Voight	2001	Дания	RANS (k - ϵ , RNG, LS; k - ω , SST)	EllipSys	192×128 , 288×192
[23]	Mora, Gadgil, Wurtz	2003	США, Франция	RANS (k - ϵ), Zonal models: PL, PL-SDF, SD-SDF	SPARK, Star CD	10×10 , 40×40
[25]	Rong, Nielsen	2008	Дания	RANS (k - ϵ ; k - ω , BSL, SST)	CFX 11.0	4 736, 18 944, 28 800 cells
[26]	Dreau, Heiselberg, Nielsen	2013	Дания	RANS (k - ϵ , low-Re, realizable; k - ω , SST)	CFX 11.0 Star-CCM+	4 068, 4 793, 16 658 cells
[29]	Yuce, Pulat	2018	Турция	RANS (k - ϵ ; k - ω)	Fluent 16.2	4 000 – 43 100 cells
<i>3D-задача с условием периодичности</i>						
[13]	Rosler, Hanel	1993	Германия	RANS (k - ϵ)	ResCUE	$64 \times 28 \times 4$, $128 \times 48 \times 4$
[20]	Voight	2001	Дания	RANS (k - ϵ LS, k - ω , k - ω BSLREV)	EllipSys	$96 \times 64 \times 16$
[27]	Ivanov, Zasimova	2018	Россия	WMLES S-Omega	Fluent 16.2	$751 \times 252 \times 250$

Продолжение

Номер	Авторы	Год	Страна	Метод	Код	Расчетная сетка
<i>3D-постановка задачи</i>						
[17]	Davidson, Nielsen	1996	Швеция, Дания	LES (Smagorinsky, dynamic Germano)	SLAP	$72 \times 42 \times 52$, $102 \times 52 \times 52$
[18]	Davidson	1996	Швеция	RANS (k - ϵ), LES (Smagorinsky, dynamic Germano)	CALC-BFC	$72 \times 42 \times 52$, $102 \times 52 \times 52$
[19]	Bennetsen	1999	Дания	RANS (k - ϵ , RNG; k - ω , ASM, DSM), LES (MS, Smagorinsky, dynamic Germano)	CFX 4.2, LESROOM	$96 \times 64 \times 32$, $84 \times 72 \times 72$ (RANS); $64 \times 64 \times 32$, $96 \times 64 \times 64$ (LES)
[20]	Voight	2001	Дания	RANS (k - ϵ LS, k - ω BSLREV), LES (Mixed Scale, Smagorinsky,	EllipSys	$96 \times 64 \times 16$ (RANS); $72 \times 48 \times 36$, $96 \times 64 \times 48$ (LES)
[21]	Jiang, Chen	2001	США	LES (Smagorinsky, Filtered	PHOENICS	$66 \times 18 \times 34$, $66 \times 34 \times 34$
[22]	Jiang, Mingde, Chen	2003		Dynamic, Small-Scale model)		
[24]	Ivanov	2005	Бельгия, Россия	RANS (k - ϵ , LS, SA)	SINF, FINE	$37 \times 41 \times 29$, $73 \times 81 \times 57$
[27] [28]	Ivanov, Zsaimova	2018	Россия	WMLES S-Omega	Fluent 16.2	$751 \times 252 \times 250$
[30]	Van Hoof, Blocken	2019	Бельгия	RANS	Fluent 15.0	212 160 – 1 697 280 cells

Обозначения: RSTM – Reynolds-Stress Models [6], LRN – Low Reynolds Number correction, BSL – Baseline revised, LS – Launder Sharma k - ϵ model, ASM – Algebraic Stress Model, DSM – Differential Reynolds Stress Model.

возможности с достаточной степенью точности описать поведение трехмерных турбулентных структур.

Если обобщить результаты численного моделирования для экспериментальных условий [7], известные авторам из литературы, то можно сделать вывод о том, что в целом получаемая картина осредненного течения согласуется с экспериментом, однако локальные характеристики оказываются неточными. В настоящее время появилась возможность

проведения на весьма подробных сетках (размерностью до $10^7 - 10^8$ ячеек) аккуратного численного моделирования турбулентных течений на основе различных вихререзающих подходов, в том числе подхода WMLES.

В настоящей работе представляются результаты численного моделирования турбулентного течения воздуха в замкнутом помещении на основе вихререзающего подхода WMLES для условий, приближенных к экспериментам [7, 8].

Постановка задачи

Геометрия помещения. Рассматривается течение воздуха в помещении, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $3H \times H \times H$. Схема помещения изображена на рис. 1, *a*, начало системы координат расположено в нижнем углу помещения. За масштаб длины взята высота помещения $H = 3$ м.

На торцевой стенке помещения под потолком располагается вход в расчетную область – приточное щелевое отверстие шириной w_{in} и высотой $h_{in} = 0,056H = 0,168$ м. В соответствии с различными условиями проведения экспериментов [7, 8], рассмотрены две геометрические конфигурации, которые различаются шириной входного отверстия.

В первом варианте ширина отверстия совпадает с шириной помещения, $w_{in} = H$; такая постановка задачи соответствует условиям эксперимента [7].

Во втором варианте ширина отверстия уменьшена в два раза и равна $w_{in} = 0,5H$, отверстие располагается по центру относительно боковых стенок помещения (см. рис. 1, *a*); та-

кая постановка соответствует условиям эксперимента [8].

На противоположной торцевой стенке, вблизи пола, находится вытяжное щелевое отверстие прямоугольной формы шириной H и высотой $h_{out} = 0,16H = 0,48$ м, через которое осуществляется отбор воздуха из помещения. К отверстию примыкает выходной вентиляционный канал, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда с размерами $0,50H \times 0,16H \times 1,0H$, установленный с целью предотвращения формирования возвратного течения на поверхности вытяжного отверстия.

Пунктирами на рис. 1, *a* показаны линии, вдоль которых представлены экспериментальные данные в работах [7, 8]. Вертикальные линии *A-A* расположены при $x = 1,0H$, а *B-B* – при $x = 2,0H$; горизонтальные линии *C-C* расположены при $y = 0,972H$ (на расстоянии $h_{in}/2$ от потолка, что соответствует среднему сечению щелевого входа), а *D-D* – при $y = 0,028H$ (на расстоянии $h_{in}/2$ от пола). Нижние индексы «1» в обозначениях соответствуют центральному сечению помеще-

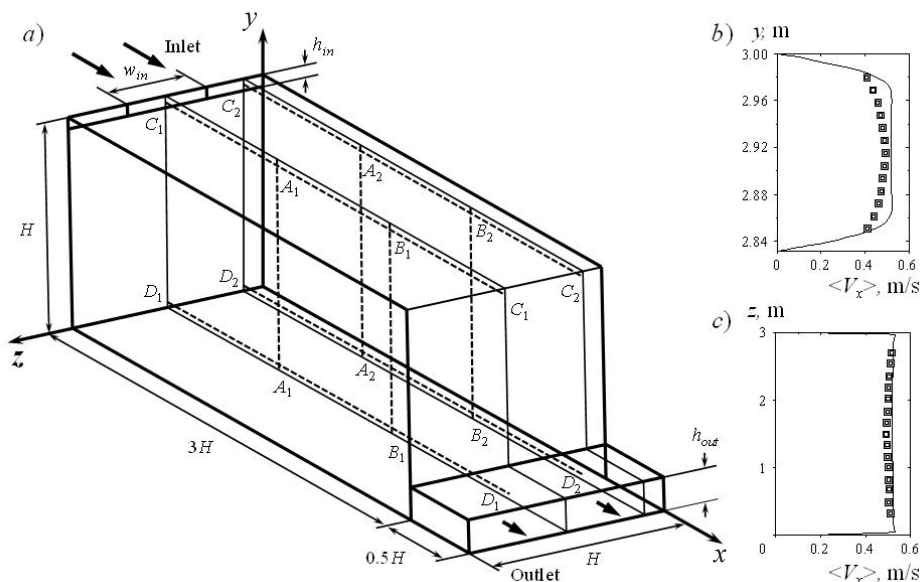


Рис. 1. Геометрическая модель помещения (*a*), на которой показаны дополнительные линии, вдоль которых доступны экспериментальные данные; расчетные (линии) и экспериментальные (символы) распределения продольной скорости на входе в помещение по двум осям (*b*, *c*) для варианта с $w_{in} = 3$ м; сечения при $z = 3,000$ м (*b*) и $y = 2,916$ м (*c*)

ния ($z = 0,5H$), а «2» – боковому сечению ($z = 0,1H$).

Следует отметить, что для снижения погрешностей в измерении скорости, лабораторные эксперименты [7, 8] были выполнены в уменьшенной модели помещения: ширина и высота модели были одинаковы и составляли $H = 0,0893$ м, а длина – $0,268$ м, однако изложение материала как в исходных работах [7, 8], так и в описаниях последующих численных исследований проводилось для отмасштабированных до натуральных условий данных.

Граничные условия. Задача рассматривается в изотермическом приближении, что соответствует условиям эксперимента, где обеспечивалось однородное поле температуры в помещении. Для описания движения воздуха использовалась модель несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами: плотность $\rho = 1,23$ кг/м³, динамическая вязкость $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

На вход в помещение подается воздух со среднерасходной скоростью равной $V_{in} = 0,455$ м/с (для первого варианта с широким входным отверстием это значение соответствует объемному расходу 825 м³/ч). Число Рейнольдса, построенное по высоте входного отверстия, составляет $Re = \rho h_{in} V_{in} / \mu = 5,23 \cdot 10^3$.

Экспериментальные распределения скорости во входном сечении вдоль центральных продольной и поперечной линий показаны символами на рис. 1, b, c. Отметим, что в работах [7, 8] не приводятся сведения о подводящем вентиляционном тракте, т. е. о том, каким образом было сформировано входное поле скорости.

В настоящей работе профили скорости на входе были извлечены из дополнительного WMLES-решения соответствующей задачи о течении воздуха в прямом вентиляционном канале с размерами $L_{duct} \times h_{in} \times w_{in}$. Длина канала задавалась равной $L_{duct} = 2,0H = 6$ м, а его поперечное сечение соответствовало входному отверстию с размерами $h_{in} \times w_{in}$.

На выходной границе расчетной области задавались мягкие граничные условия. Остальные границы расчетной области – твердые стенки, на которых задавались условия прилипания.

Математическая модель. Моделирование турбулентного течения воздуха осуществлялось на основе вихреразрешающего подхода WMLES, который базируется на решении отфильтрованных уравнений Навье – Стокса (см., например, статью [31]). В результате применения процедуры фильтрации актуальные переменные f в уравнениях Навье – Стокса заменяются на сумму «отфильтрованных» и «подсеточных» переменных $f = \tilde{f} + f'$. Величина \tilde{f} определяется выражением

$$\tilde{f}(x, t) = \int_{Vol} G(x - x', \Delta) f(x', t) dx'^3, \quad (1)$$

где $G(x - x', \Delta)$ – функция фильтра (фильтрующая функция), которая определяет размер и структуру мелкомасштабной турбулентности (например, коробчатый фильтр); x, m , – координата рассматриваемой точки; Δ, m , – характерный размер фильтра (ширина фильтра).

Вихри, размер которых меньше, чем ширина фильтра, не разрешаются.

Для несжимаемой жидкости с постоянными физическими свойствами отфильтрованные уравнения можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{V}\mathbf{V}) = \\ = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot p + 2\nu(\nabla \cdot \underline{\underline{S}}) - \nabla \cdot \underline{\underline{\tau}}^{SGS}, \end{cases} \quad (2)$$

где \mathbf{V} – вектор скорости с компонентами (V_x, V_y, V_z); $\underline{\underline{S}}$ – тензор скоростей деформации, $\underline{\underline{\tau}}^{SGS}$ – слагаемое, получившееся в результате пространственной фильтрации уравнений.

Для определения подсеточных напряжений используется обобщенная гипотеза Бусинеска:

$$\tau_{ij}^{SGS} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2\nu_{SGS} S_{ij}, \quad (3)$$

где ν_{SGS} – подсеточная турбулентная вязкость, подлежащая определению с помощью какой-либо полуэмпирической подсеточной модели.

В расчетах использовался подход WMLES S-Omega, реализация которого базируется на данных статьи [32]. По сравнению со стандартной моделью Смагоринского, для определения подсеточной вязкости используется модифицированный подсеточный линейный масштаб и демпфирующий множитель (аналогичный множителю Ван Дрифта в модели Прандтля для RANS-подхода), а вместо модуля тензора скоростей деформаций S используется разность $|S - \Omega|$:

$$\nu_{SGS} = \min \left\{ (\kappa d_w)^2, (C_s \Delta)^2 \right\} |S - \Omega| \times \left(1 - \exp \left\{ \left(-y^+ / 25 \right)^3 \right\} \right), \quad (4)$$

где $C_s = 0,2$ – эмпирическая константа Смагоринского; $S, c^{-1}, \Omega, c^{-1}$, – модули тензоров скоростей деформации и завихренности

$$(S = (2S_{ij}S_{ij})^{0,5}, \Omega = (2\Omega_{ij}\Omega_{ij})^{0,5});$$

$\kappa = 0,41$ – постоянная Кармана; $d_w, м$, – расстояние до ближайшей стенки, y^+ – нормированное расстояние от центра первой пристенной ячейки до стенки.

Величина Δ определяется по формуле

$$\Delta = \min \left\{ \max (C_w d_w, C_w \Delta_{max}, \Delta_{wn}), \Delta_{max} \right\}, \quad (5)$$

где $\Delta_{max}, м$, – максимальный размер ячейки сетки (для ортогонального шестигранника он определяется как максимальная длина ребра); $\Delta_{wn}, м$, – шаг сетки по направлению нормали к стенке; $C_w = 0,15$ – эмпирическая константа.

Поскольку из решения вспомогательной

задачи о течении воздуха в плоском канале для задания входных граничных условий извлекались лишь осредненные величины, для определения актуальных пульсационных характеристик (турбулентного контента) во входном сечении использовался один из доступных генераторов синтетической турбулентности – метод вихрей (Vortex Method) [33]. При активации генератора синтетической турбулентности требуется определить интенсивность турбулентности на входной границе; было задано значение $I = 4\%$.

Вычислительные аспекты задачи. Численное моделирование проводилось в гидродинамическом коде общего назначения ANSYS Fluent 16.2*, в котором дискретизация определяющих уравнений осуществляется по методу конечных объемов. Использовалась равномерная сетка, состоящая из кубических элементов и построенная в сеточном генераторе ICEM CFD. Размерность сетки составила примерно 48 млн. ячеек ($751 \times 252 \times 250$), при этом линейный размер ячейки составил $\Delta = 12$ мм.

Использовались параметры вычислительного алгоритма, обеспечивающие дискретизацию по пространству и времени со вторым порядком точности. При аппроксимации конвективных слагаемых в уравнении движения использовалась центральная схема (опция “Central Differencing” в пакете ANSYS Fluent). Применялся безытерационный алгоритм, который отвечает продвижению во времени по методу дробных шагов (опция NITA: Non-Iterative Time-Advancement). Шаг по времени Δt , равный 0,01 с, был выбран так, чтобы максимальное значение числа Куранта в расчетной области было меньше единицы. Дополнительные расчеты показали, что уменьшение временного шага до 0,006 с не влияет на осредненные характеристики течения. Обоснование выбора сетки и прочие методические аспекты применения метода моделирования крупных вихрей рассмотрены в первой части настоящего исследования [9], где рассматривалась периодическая задача в

* ANSYS Inc. ANSYS Fluent 16.2 User's Guide, 2015.

отсутствие влияния боковых стенок.

Для контроля за развитием нестационарного течения в различных областях помещения были размещены точки мониторинга, которые позволили определить переход к статистически установившемуся режиму течения. Следует отметить высокую чувствительность пульсационных характеристик течения к длине промежутка осреднения. Для накопления представительной статистики требовалось рассчитывать выборки продолжительностью от 1500 с (150 тыс. временных шагов) до 3000 с. Осредненные характеристики, рассчитанные за меньшие периоды осреднения, оказывались существенно зависящими от выборки.

Расчеты проводились с использованием ресурсов суперкомпьютерного центра «Политехнический» (<http://www.scc.spbstu.ru>). Задачи запускались на кластере «Политехник – РСК Торнадо» с пиковой производительностью 943 Тфлопс. Кластер содержит 668 двухпроцессорных узлов (Intel(R) Xeon(R) E5 2697v3), каждый узел содержит 14 ядер. Одна задача максимально распараллеливалась на 512 ядер, при этом для накопления нестационарной статистики требовалось как минимум три недели реального времени (258 000 ядрочасов).

Результаты расчетов и их обсуждение

Описание структуры течения (вариант 1, $w_{in} = H$). Структуру течения в помещении иллюстрирует рис. 2, на котором в нескольких сечениях помещения приведены мгновенные, т. е.

$$V = (V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)^{0,5},$$

и средние, а именно

$$V_m = \left(\langle V_x \rangle^2 + \langle V_y \rangle^2 + \langle V_z \rangle^2 \right)^{0,5},$$

поля модуля скорости для первого варианта расчета, с шириной входного отверстия, совпадающей с шириной помещения ($w_{in} = H$). Здесь и далее символы $\langle \dots \rangle$ означают осреднение по времени.

Вблизи потолка развивается пристенная турбулентная струя воздуха (верхние области полей на рис. 2), которая практически симметрична относительно срединного сечения помещения. По мере распространения струи от входного отверстия до противоположной торцевой стенки значения скорости падают примерно в два раза (от $V_{in} = 0,455$ до $0,200$ м/с). Сталкиваясь с противоположной от входа стенкой, струя разворачивается, и в нижней области помещения формируется

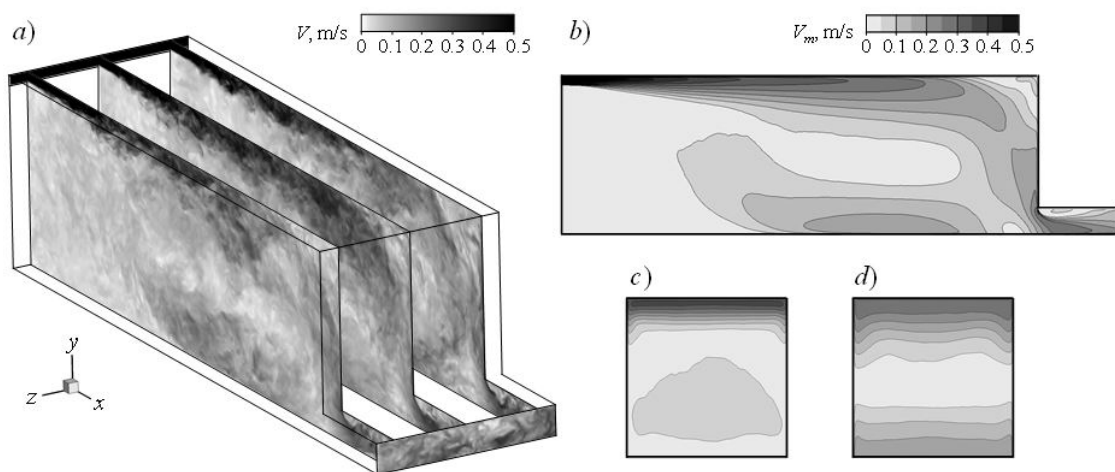


Рис. 2. Мгновенные поля скорости в продольных сечениях $z = 0,3$ м, $1,5$ м и $2,7$ м в модели помещения (а), а также поля модуля средней скорости в сечениях $z = 1,5$ м (b), $x = 3,0$ м (c) и $x = 6,0$ м (d)

низкоскоростное вторичное течение, которое характеризуется значениями скорости менее 0,1 м/с.

Как следует из картин течения в поперечных сечениях (см. рис. 2, *c,d*), в большей части помещения течение однородно вдоль трансверсального z направления, несмотря на то, что сечение помещения представляет собой квадрат ($W/H = 1$). Заметные отклонения от двумерной (плоской) структуры течения наблюдаются вблизи боковых стенок помещения, а также в области пониженных скоростей рециркуляционного течения. Таким образом, упрощенная постановка задачи с наложением условия периодичности дает возможность предсказать структуру течения, однако, как показано в работе [9], для этого необходимо, чтобы периодическая расчетная область в поперечном направлении имела достаточную протяженность, т. е. при $W/H \geq 1$.

Картина течения в срединном сечении (см. рис. 2, *b*) указывает на то, что в помещении выделяются две существенно разномасштабные области: зона струйного течения, т. е. область, в которой развивается интенсивная припотолочная струя, для которой характерны высокие значения скорости воздуха, и обитаемая зона – область с низкоскоростным циркуляционным течением, где в натуральных условиях и обеспечивается подача свежего воздуха людям, находящим-

ся в помещении. Описание такого течения с помощью численного моделирования оказывается весьма непросто из-за разномасштабности течений, реализующихся в разных зонах помещения.

Разномасштабность течения демонстрируют также данные в точках мониторинга, расположенных в области струйного течения, – точка *A* с координатами 3,0, 2,8 и 1,5 м, и рециркуляционного течения – точка *B* с координатами 3,0, 0,4 и 1,5 м; на рис. 3, *a* показана эволюция продольной компоненты скорости в этих точках.

В зоне струи наблюдаются высокочастотные пульсации, при этом их амплитуда сопоставима со средним значением скорости (для точки *A* значение $\langle V_x \rangle = 0,29$ м/с, а значение максимального отклонения от этого среднего равно 0,27 м/с). Характерный временной масштаб пульсаций в точке *A* составляет менее 5 с. В области пониженных скоростей относительная амплитуда пульсаций существенно выше; характерный масштаб времени низкочастотных колебаний также оказывается на порядок выше, чем в области струи, например, в точке *B* он составляет около 150 с.

На рис. 3, *b* приведена частотная зависимость спектральной плотности энергии PSD (Power Spectral Density), рассчитанная по данным x -компоненты скорости (см. рис. 3, *a*), которая получена с помощью формулы

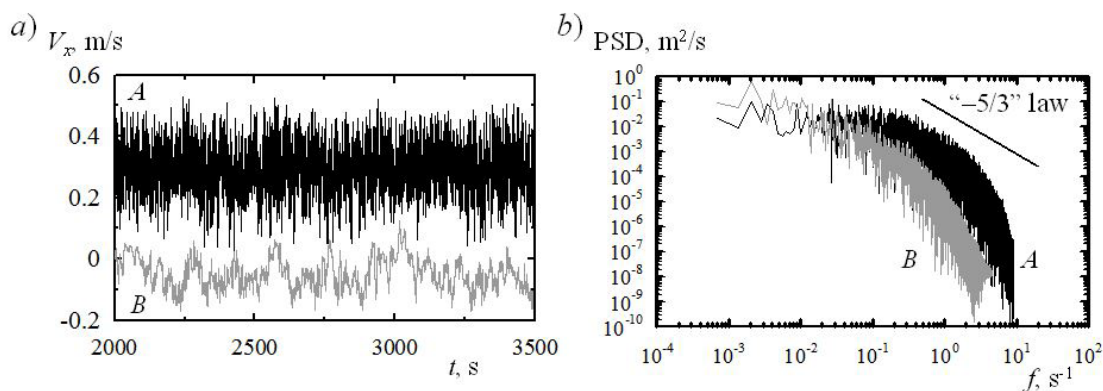


Рис. 3. Временные диаграммы x -компоненты скорости в двух точках мониторинга: точке *A* с координатами (3,0, 2,8 и 1,5 м) и точке *B* (3,0, 0,4 и 1,5 м) (*a*), а также энергетические спектры пульсаций скорости в этих точках (*b*)

$$PSD = 2A_{U_x}^2 \Delta t,$$

где A_{U_x} — амплитуда гармонических составляющих в преобразовании Фурье.

На графике добавлена прямая, отражающая убывание спектра по закону Колмогорова (обозначена как “ $-5/3$ ” law). Этот закон показывает универсальность поведения частотного энергетического спектра в области инерционного интервала $E \sim k^{-5/3}$, где E — спектральная плотность кинетической энергии, k — волновое число.

На спектральных кривых, построенных по данным в точках A и B , можно выделить участок, на котором выполняется закон Колмогорова. На графиках также видно, что энергетические спектры пульсаций заполнены более чем на две декады, что свидетельствует о принадлежности рассматриваемого течения к режиму с развитой турбулентностью.

Сопоставление с экспериментальными данными (вариант 1, $w_{in} = H$). На рис. 4 приведены профили осредненной по времени продольной (x -) компоненты скорости $\langle V_x \rangle$, и ее среднеквадратичные отклонения от среднего значения $(\langle V_x'^2 \rangle)^{0.5}$ в восьми сече-

ниях (линиях) помещения (расположения сечений см. на рис. 1, a). На графиках сведены воедино данные, полученные в ходе настоящего численного моделирования, и экспериментальные данные [7]. В верхней части рис. 4 представлены графики вдоль линий, проведенных в центральном сечении помещения, в нижней части — в боковом сечении. На графиках видно, что течение в помещении является квазидвумерным в широком диапазоне трансверсальной координаты (как и было отмечено ранее); профили скорости и ее пульсаций в центральном и боковом сечениях идентичны как качественно, так и количественно.

Результаты численных расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными в области припотолочной струи. В то же время имеет место рассогласование результатов расчетов с экспериментом в зоне возвратного течения. Расчетные профили скорости и ее пульсаций в вертикальных сечениях (линии $A-A$ и $B-B$) хорошо воспроизводят экспериментальные данные; некоторое рассогласование результатов имеется в окрестности пола помещения при $y < 1$ (см.

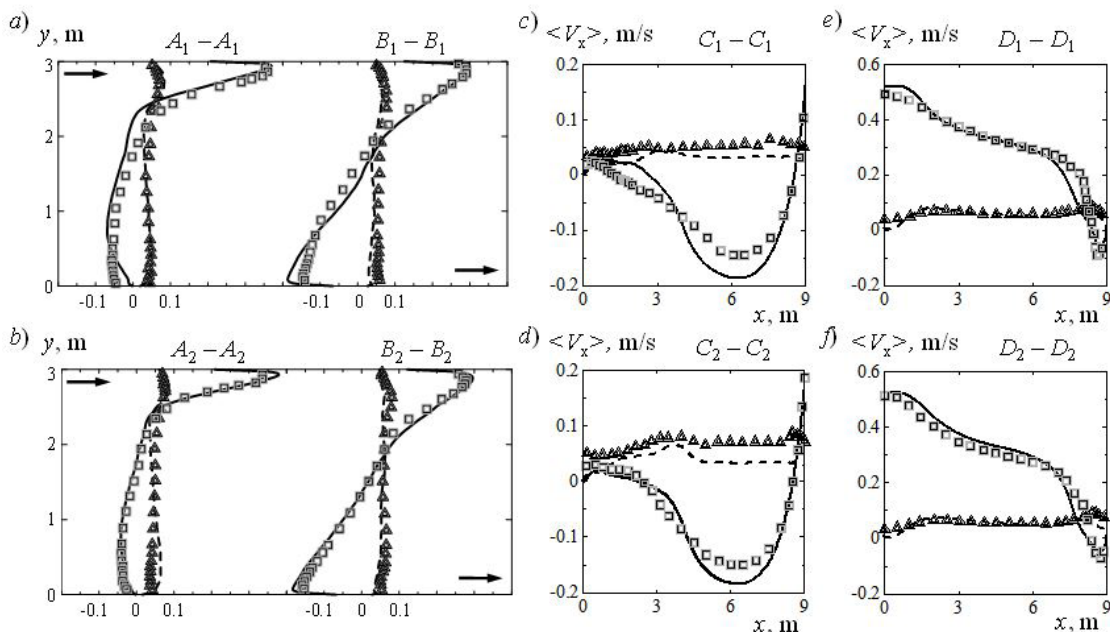


Рис. 4. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (квадратные символы) профили скорости, а также профили ее пульсаций (пунктиры и треугольные символы соответственно) в нескольких сечениях геометрической модели помещения (см. рис. 1, a)

рис. 4, *a, b*). Определенное рассогласование расчетных и экспериментальных результатов можно отметить и по данным скорости и ее пульсаций в горизонтальных сечениях помещения, расположенных в зоне возвратного течения (линии *C-C* на рис. 4, *c, d*), где наблюдаются локальные максимумы скорости потока. Напротив, вдоль горизонтальных линий *D-D* (см. рис. 4, *e, f*) расчет хорошо согласуется с экспериментом.

Из сопоставления представленных результатов с данными работ прошлых лет других авторов, в которых численно моделируются условия эксперимента [7] (см. таблицу), можно заключить, что результаты настоящих исследований лучше согласуются с данными эксперимента [7] как по профилям скорости, так и по пульсационным характеристикам. Особенно наглядно это видно в области струи (сечения *D-D* на рис. 4, *e, f*), где в настоящей работе получено количественное согласие расчетных и экспериментальных данных, и при этом положение точки отрыва струи от верхней стенки предсказано точно. В области вторичного течения (сечения *C-C* на рис. 4, *c, d*) представленные расчеты предсказывают более интенсивное движение, чем наблюдалось в эксперименте – значения скорости и ее пульсаций по расчетным данным оказываются завышенными. Все опублико-

ванные ранее работы других авторов указывали на существенное рассогласование расчета и эксперимента в зоне возвратного течения с относительно низкими скоростями.

Особенности течения при уменьшении ширины входного отверстия (вариант 2, $w_{in} = 0,5H$). Особенности течения для варианта 2 с входным отверстием, ширина которого вдвое меньше ширины расчетной области, иллюстрирует рис. 5, где сопоставлены структуры течения для обоих рассмотренных вариантов. На рисунке изображены трехмерные изоповерхности Q -критерия, имеющего вид $Q = 0,5(\Omega^2 - S^2)$, на которых величина Q принимает значение, равное $0,1 \text{ с}^{-2}$; изоповерхности окрашены в соответствии со значениями модуля скорости. Уменьшение ширины входной области в два раза приводит к появлению дополнительных слоев смешения в трансверсальном (z -) направлении, развитие которых заметно в припотолочной зоне в углах помещения: в осредненном течении здесь проявляется принципиально трехмерный характер течения. При удалении от входа различия картин распространения струи сглаживаются; в области взаимодействия струи с противоположной торцевой стенкой численные решения демонстрируют практически одинаковые распределения Q -критерия.

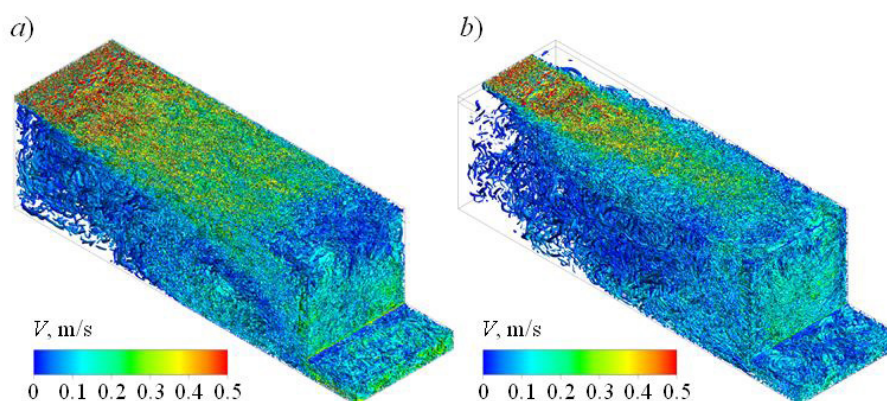


Рис. 5. Мгновенные изоповерхности Q -критерия, окрашенные в соответствии с величиной модуля скорости; построены для двух вариантов расчета: $w_{in} = H$ (*a*) и $0,5H$ (*b*)

В целом можно заключить, что глобальная структура течения для двух вариантов, которые различаются шириной входного отверстия, идентична, за исключением области в окрестности входа.

Сравнение осредненных по времени профилей x -компоненты скорости, полученных в расчетах, с экспериментальными данными [8] вдоль вертикальных линий $A-A$ и $B-B$ показано на рис. 6 (отметим, что для задачи с уменьшенной шириной входа доступен лишь весьма ограниченный набор экспериментальных данных). На рис. 6,*a* приведены распределения вдоль линий в центральном сечении, когда $z = 1,5$ м, а на рис. 6,*b* – распределения вдоль линий в боковом сечении, при $z = 0,3$ м (это значение поперечной координаты находится уже за пределами входного отверстия). На графиках видно, что в ближнем следе (линии $A-A$) результаты расчета полностью согласуются с экспериментальными данными. В области помещения, расположенной ближе к выходу (линии $B-B$), проявляются различия между расчетными и экспериментальными профилями скорости, особенно в боковом сечении. Причины отмеченного рассогласования могут проистекать как из недостатков методики численного моделирования, так и в силу неопределенности экспериментальных данных [8]. Следует отметить, что в расчетах была выявлена сильная чувствительность осредненных

характеристик течения к продолжительности выборки, использующейся для осреднения: в представляемых расчетах независимость от промежутка осреднения достигнута (при выборках, превышающих 1500 с).

В расчетах показано, что для течения с существенно трехмерной картиной осредненного течения, характерной для варианта 2, использование при осреднении достаточно продолжительной выборки имеет принципиальное значение. Сведения о методике осреднения (в том числе о продолжительности выборок), которая применялась в эксперименте, в работах [7, 8] не указаны. Известно также, что в области низкоскоростного течения погрешности измерений скорости могут резко возрастать, а именно – в этой области наблюдается большее рассогласование расчетных и экспериментальных данных.

Заключение

На основе вихреразрешающего подхода WMLES проведено численное моделирование турбулентного течения воздуха в помещении квадратного поперечного сечения, вентилируемом плоской воздушной струей, которая подается из расположенного под потолком щелевого отверстия; при этом число Рейнольдса $Re = 5 \cdot 10^3$. Задача ставилась в постановке, максимально полно воспроизводящей условия тестового эксперимента. Рассмотрены две геометрические конфигу-

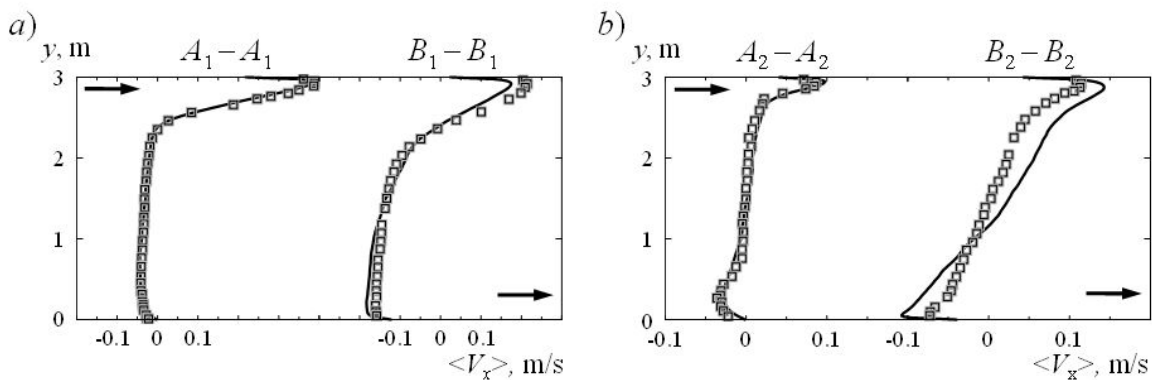


Рис. 6. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные [8] (символы) профили продольной компоненты скорости в сечениях $A-A$ и $B-B$ для варианта 2, $w_{in} = 0,5H$

рации, отличающиеся шириной входного отверстия. Расчеты проводились в гидродинамическом коде общего назначения ANSYS Fluent, обеспечивающем второй порядок дискретизации по времени и пространству.

Несмотря на геометрическую простоту, течение, формирующееся в помещении, сочетает множество факторов, осложняющих моделирование: под потолком помещения развивается плоская пристенная струя; после разворота нисходящая струя натекает на нижнюю стенку; определенную роль играют боковые стенки, которые формируют трехмерную структуру осредненного течения.

Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными в пристенной струе, однако наблюдается за-

метное рассогласование результатов расчетов с экспериментом в зоне возвратного течения (обитаемой зоне), для которой характерны сравнительно малые значения скорости.

Благодарности

Авторы выражают благодарность доценту Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого А.В. Гарбаруку и директору научно-образовательного центра «Компьютерные технологии в аэродинамике и теплотехнике» того же университета В.В. Рису за ценные советы и замечания.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы повышения конкурентоспособности ведущих университетов Российской Федерации (Проект 5-100-2020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гримитлин М.И.** Распределение воздуха в помещениях. 3-е изд., доп. и испр. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2004. 320 с.
2. **Рейнольдс О.** Динамическая теория движения несжимаемой вязкой жидкости и определение критерия // Проблемы турбулентности. Сб. переводных статей под ред. М.А. Великанова и Н.Т. Швейковского. Москва-Ленинград: ОНТИ НКТП СССР, 1936. С. 185–227.
3. **Launder B.E., Spalding D.B.** Lectures in mathematical models of turbulence. London, New-York: Academic Press, 1972. 169 p.
4. **Гуляев А.Н., Козлов В.Е., Секундов А.Н.** К созданию универсальной однопараметрической модели для турбулентной вязкости // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1993. № 4. С. 69–81.
5. **Sagaut P.** Large Eddy Simulation for incompressible flows: An introduction. 3rd Ed. Heidelberg: Springer, 2006. 556 p.
6. **Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л.** Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. 234 с.
7. **Nielsen P.V., Restivo A., Whitelaw J.H.** The velocity characteristics of ventilated room // J. Fluids Engineering. 1978. Vol. 100. No. 3. Pp. 291–298.
8. **Nielsen P.V.** Specification of a two dimensional test case // Aalborg: Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet, Denmark, Gul Serie. 1990. Vol. R9040. No. 8. Pp. 1–15.
9. **Засимова М.А., Иванов Н.Г., Марков Д.** Численное моделирование циркуляции воздуха в помещении при подаче из плоской щели. I. Отработка применения вихреразрешающего подхода с использованием периодической постановки // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 3. С. 56–74.
10. **Heikkinen J., Piira K.** Simulation of simple (two-dimensional) test cases // Technical Research Center of Finland. Laboratory of Heating and Ventilation. Espoo, Finland. 1991. Annex report. No. AN20.1-SF-91-VTT07. 16 p.
11. **Vogl N., Renz U.** Simulation of simple test cases // Energy Conservation in Buildings and in Community Systems. Annex 20. Airflow Patterns within Buildings. No. 1. 46. Aachen, Germany, 1991. 10 p. www.cfd-benchmarks.com.
12. **Skalicky T., Morgenstern G., Auge A., Hanel B., Rosler M.** Comparative studies of se-

- lected discretization methods for the numerical solution of room air flow problems // Proc. of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms 'ROOMVENT-92' (Aalborg, Denmark, September 2–4, 1992). 1992. Pp. 226–240.
13. **Rosler M., Hanel B.** Numerical computation of flow and heat transfer in air-conditioned rooms by a special velocity-pressure iteration and a multigrid method // Proc. of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms 'ROOMVENT-92' (Aalborg, Denmark, September 2–4, 1992). 1992. Pp. 178–199.
14. **Chen Q.** Comparison of different k - ϵ models for indoor air flow computations // Numerical Heat Transfer, An International Journal of Computation and Methodology, Part B. Fundamentals. 1995. Vol. 28. No. 3. Pp. 353–369.
15. **Chen Q.** Prediction of room air motion by Reynolds – Stress models // J. Building and Environment. 1996. Vol. 31. No. 3. Pp. 233–244.
16. **Peng S.-H., Davidson L., Holmberg S.** The two-equation turbulence k - ω model applied to recirculating ventilation flows. Chalmers University of Technology, Sweden. Department of Thermodynamics and Fluid Dynamics. 1996. 26 p.
17. **Davidson L., Nielsen P.V.** Large eddy simulations of the flow in a three dimensional ventilated room // Proc. of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms 'ROOMVENT-96' (Yokohama, Japan, July 17–19). 1996. Vol. 2. Pp. 161–168.
18. **Davidson L.** Implementation of a Large Eddy Simulation method applied to recirculating flow in a ventilated room. Aalborg University, Denmark. Department of Building Technology and Structural Engineering. 1996. 28 p.
19. **Bennetsen J.C.** Numerical simulation of turbulent airflow in livestock buildings. The Technical University of Denmark. The Department of Mathematical Modeling. Ph. D thesis. 1999. 205 p.
20. **Voight L.K.** Navier– Stokes simulations of airflow in rooms and around human body. International Center for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark. Department of Energy Engineering. Ph. D thesis. 2001. 169 p.
21. **Jiang Y., Chen Q.** Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation // J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2001. Vol. 89. No. 13. Pp. 1155–1178.
22. **Jiang Y., Su M., Chen Q.** Using large eddy simulation to study airflows in and around buildings // ASHRAE Transactions. 2003. Vol. 109. No. 2. Pp. 517–526.
23. **Mora L., Gadgil A.J., Wurtz E.** Comparing zonal and CFD model predictions of isothermal indoor airflows to experimental data // Indoor Air. 2003. Vol. 13. No. 2. Pp. 77–85.
24. **Ivanov N., Smirnov E., Lacor C.** Computational fluid dynamics analysis of pollutant dispersion in a metro carriage // Proc. of the 17th Air-Conditioning and Ventilation Conference (Prague, Czech. Republic, May 17–19, 2006). 2006. Pp. 117–122.
25. **Rong L., Nielsen P.V.** Simulation with different turbulence models in an annex 20 room benchmark test using Ansys CFX 11.0. Denmark, Aalborg University, Department of Civil Engineering, 2008. DCE Technical Report. No. 46. 16 p.
26. **Dreau J.L., Heiselberg P., Nielsen P.V.** Simulation with different turbulence models in an Annex 20 benchmark test using Star-CCM+. Denmark, Aalborg University, Department of Civil Engineering, 2013. DCE Technical Report. No. 147. 22 p.
27. **Ivanov N.G., Zasimova M.A.** Large Eddy Simulation of airflow in a test ventilated room // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1038. International Conference PhysicA.SPb/2017, 24–26 October 2017, Saint-Petersburg, Russia. P. 012136.
28. **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: Conf. Series. 2018. Vol. 1135. International Conference PhysicA.SPb/2018, 23–25 October 2018, Saint-Petersburg, Russia. P. 012106.
29. **Yuce B.E., Pulat E.** Forced, natural and mixed convection benchmark studies for indoor thermal environments // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 92. March. Pp. 1–14.
30. **Van Hoof T., Blocken B.** Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: A numerical analysis using computational fluid dynamics // Indoor and Built Environment. 2019. Special issue –

New Building Ventilation Technologies. November. Pp. 1–18. DOI: 10.1177/1420326X19884667

31. **Piomelli U.** Large eddy simulations in 2030 and beyond // Phil. Trans. R. Soc. A. 2014. Vol. 372. No. 2022. P. 20130320.

32. **Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.K., Travin A.K.** A hybrid RANS-LES approach with

delayed-DES and wall-modelled LES capabilities // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2008. Vol. 29. No. 6. Pp. 1638–1649.

33. **Mathey F.** Aerodynamic noise simulation of the flow past an airfoil trailing-edge using a hybrid zonal RANS-LES // Computers & Fluids. 2008. Vol. 37. No. 7. Pp. 836–843.

Статья поступила в редакцию 20.04.2020, принята к публикации 23.07.2020.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЗАСИМОВА Марина Александровна – ассистент Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
zasimova_ma@spbstu.ru

ИВАНОВ Николай Георгиевич – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
ivanov_ng@spbstu.ru

МАРКОВ Детелин – PhD, доцент Софийского технического университета, г. София, Болгария.

1000, Болгария, г. София, бульвар Климента Орхидского, 8
detmar@tu-sofia.bg

REFERENCES

1. **Grimtlin M.I.**, Raspređenje vozdukhа v pomeshcheniyakh [Air distribution in the rooms], 3rd Ed., AVOK Severo-Zapad, St. Petersburg, 2004 (in Russian).

2. **Reynolds O.**, IV. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, Phil. Trans. Roy. Soc. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 186 (December) (1895) 123–164.

3. **Launder B.E., Spalding D.B.**, Lectures in mathematical models of turbulence, Academic Press, London, New-York, 1972.

4. **Guliaev A.N., Kozlov V.E., Sekundov A.N.**, A universal one-equation model for turbulent viscosity, Fluid Dynamics. 28 (4) (1993) 485–494.

5. **Sagaut P.**, Large Eddy Simulation for incompressible flows: An introduction, 3rd Ed., Springer, Heidelberg, 2006.

6. **Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Travin A.K.**,

Shur M.L., Sovremennyye podkhody k modelirovaniyu turbulentsnosti [Modern approaches to turbulence modelling], St. Petersburg Polytechnic University Publishing, St. Petersburg, 2016 (in Russian).

7. **Nielsen P.V., Restivo A., Whitelaw J.H.**, The velocity characteristics of ventilated room, J. Fluids Engineering. 100 (3) (1978) 291–298.

8. **Nielsen P.V.**, Specification of a two dimensional test case, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet, Denmark, Gul Serie, Aalborg. R9040 (8) (1990)1–15.

9. **Zasimova M.A., Ivanov N.G., Markov D.**, Numerical modeling of air distribution in a test room with 2D sidewall jet. I. Foundations for eddy resolving approach application based on periodical formulation, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics 13 (3) (2020) 56–74.

10. **Heikkinen J., Piira K.**, Simulation of simple (two-dimensional) test cases, Technical Research Center of Finland, Laboratory of Heating and Ventilation, Espoo, Finland, Annex report No. AN20.1-SF-91-VTT07 (1991).
11. **Vogl N., Renz U.**, Simulation of simple test cases, In: Energy Conservation in Buildings and in Community Systems, Annex 20. Airflow Patterns within Buildings. No. 1.46. Aachen, Germany, 1991. www.cfd-benchmarks.com.
12. **Skalicky T., Morgenstern G., Auge A., et al.**, Comparative studies of selected discretization methods for the numerical solution of room air flow problems, Proc. of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms 'ROOMVENT-92' (Aalborg, Denmark, September 2–4, 1992), (1992) 226–240.
13. **Rosler M., Hanel B.**, Numerical computation of flow and heat transfer in air-conditioned rooms by a special velocity-pressure iteration and a multigrid method, Proc. of the 3rd International Conference on Air Distribution in Rooms 'ROOMVENT-92' (Aalborg, Denmark, September 2–4, 1992), (1992) 178–199.
14. **Chen Q.**, Comparison of different k - ϵ models for indoor air flow computations, J. Numerical Heat Transfer, An International Journal of Computation and Methodology, Part B. Fundamentals. 28 (3) (1995) 353–369.
15. **Chen Q.**, Prediction of room air motion by Reynolds–Stress models, J. Building and Environment. 31 (3) (1996) 233–244.
16. **Peng S.-H., Davidson L., Holmberg S.**, The two-equation turbulence k - ω model applied to recirculating ventilation flows, Chalmers University of Technology, Sweden, Department of Thermo- and Fluid Dynamics, 1996.
17. **Davidson L., Nielsen P.V.**, Large eddy simulations of the flow in a three dimensional ventilated room, Proc. of the 5th International Conference on Air Distribution in Rooms 'ROOMVENT-96' (Yokohama, Japan, July 17–19, 1996). 2 (1996) 161–168.
18. **Davidson L.**, Implementation of a Large Eddy Simulation method applied to recirculating flow in a ventilated room, Aalborg University, Denmark, Department of Building Technology and Structural Engineering, 1996.
19. **Bennetsen J.C.**, Numerical simulation of turbulent airflow in livestock buildings, The Technical University of Denmark, The Department of Mathematical Modeling, Ph. D thesis, 1999.
20. **Voight L.K.**, Navier – Stokes simulations of airflow in rooms and around human body, International Center for Indoor Environment and Energy, Technical University of Denmark, Department of Energy Engineering, Ph. D thesis, 2000.
21. **Jiang Y., Chen Q.**, Study of natural ventilation in buildings by large eddy simulation, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 89 (13) (2001) 1155–1178.
22. **Jiang Y., Su M., Chen Q.**, Using large eddy simulation to study airflows in and around buildings, ASHRAE Transactions. 109 (2) (2003) 517–526.
23. **Mora L., Gadgil A.J., Wurtz E.**, Comparing zonal and CFD model predictions of isothermal indoor airflows to experimental data, Indoor Air. 13 (2) (2003) 77–85.
24. **Ivanov N., Smirnov E., Lacor C.**, Computational fluid dynamics analysis of pollutant dispersion in a metro carriage, Proc. of the 17th Air-Conditioning and Ventilation Conference (Prague, Czech. Republic, May 17–19, 2006) (2006) 117–122.
25. **Rong L., Nielsen P.V.**, Simulation with different turbulence models in an annex 20 room benchmark test using Ansys CFX 11.0, Denmark, Aalborg University, Department of Civil Engineering, 2008. DCE Technical Report. No. 46.
26. **Dreau J.L., Heiselberg P., Nielsen P.V.**, Simulation with different turbulence models in an Annex 20 benchmark test using Star-CCM+. Denmark, Aalborg University, Department of Civil Engineering, 2013. DCE Technical Report. No. 147.
27. **Ivanov N.G., Zasimova M.A.**, Large Eddy Simulation of airflow in a test ventilated room // Journal of Physics: Conf. Series. 1038 (2018) 012136.
28. **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: Conf. Series. 1135 (2018). 012106.
29. **Yuce B.E., Pulat E.**, Forced, natural and mixed convection benchmark studies for indoor

thermal environments, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 92 (March) (2018) 1–14.

30. **Van Hoof T., Blocken B.**, Mixing ventilation driven by two oppositely located supply jets with a time-periodic supply velocity: A numerical analysis using computational fluid dynamics, *Indoor and Built Environment*, Special issue – New Building Ventilation Technologies. (November) (2019) 1–18. DOI: 10.1177/1420326X19884667

31. **Piomelli U.**, Large eddy simulations in 2030

and beyond, *Phil. Trans. R. Soc. A*. 372 (2022) (2014) 20130320.

32. **Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.K., Travin A.K.**, A hybrid RANS LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities, *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 29 (6) (2008) 1638–1649.

33. **Mathey F.**, Aerodynamic noise simulation of the flow past an airfoil trailing-edge using a hybrid zonal RANS-LES, *Computers & Fluids*. 37 (7) (2008) 836–843.

Received 20.04.2020, accepted 23.07.2020.

THE AUTHORS

ZASIMOVA Marina A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

zasimova_ma@spbstu.ru

IVANOV Nikolay G.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

ivanov_ng@spbstu.ru

MARKOV Detelin

Technical University of Sofia

8 Kliment Ohridsky boulevard, Sofia, 1000, Bulgaria

detmar@tu-sofia.bg