DOI: 10.18721/JPM.14307 УДК 532.517

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ТЕПЛОВОГО МАНЕКЕНА НА ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН В МОДЕЛЬНОМ ПОМЕЩЕНИИ С ВЫТЕСНЯЮЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

Е.Д. Степашева, М.А. Засимова, Н.Г. Иванов

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

В работе представлены результаты численного моделирования турбулентного течения и теплообмена в модельном помещении с вытесняющей вентиляцией, в котором размещен нагретый тепловой манекен. Цель работы — оценить влияние формы манекена на структуру течения воздуха, предсказываемую расчетами. Рассмотрены три формы манекена: детальная (приближена к форме человека), а также частично и полностью упрощенные. Постановка задачи приближена к условиям тестового эксперимента P.V. Nielsen и др. (2003). Моделирование турбулентности осуществлялось с помощью RANS-подхода с привлечением стандартной *k*-є модели турбулентности в сочетании с методикой разрешения пристенной области. В результате исследования выявлена степень чувствительности решения к размерности и топологии используемой сетки, а также влияние на решение неопределенности входного распределения скорости. Показано, что расчетные результаты в целом согласуются с данными эксперимента; упрощение формы манекена оказывает существенное влияние на точность предсказания локальных параметров.

Ключевые слова: вентиляция, тепловой манекен, турбулентное течение и теплообмен, естественная конвекция

Ссылка при цитировании: Степашева Е.Д., Засимова М.А., Иванов Н.Г. Влияние формы теплового манекена на течение и теплообмен в модельном помещении с вытесняющей вентиляцией // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 3. С. 94–111. DOI: 10.18721/JPM.14307

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии СС ВУ-NC 4.0 (https://creative-commons.org/licenses/by-nc/4.0/)

THERMAL MANIKIN SHAPE INFLUENCE ON AIRFLOW AND HEAT TRANSFER IN THE MODEL ROOM WITH DISPLACEMENT VENTILATION

E.D. Stepasheva, M.A. Zasimova, N.G. Ivanov

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

The paper presents the results of numerical modeling of turbulent flow and heat transfer in the model room with displacement ventilation. The goal of the study is to assess the shape influence of the thermal manikin placed in the room on the computed airflow structure. Three manikin shapes have been considered: a detailed one (close to a human shape) and ones simplified partially and completely. The problem formulation was close to the test conditions of P.V. Nielsen et al. (2003). The RANS approach based on the standard k- ε turbulence model was applied. The study revealed solution sensitivity to the dimension and topology of the mesh used, as well as the solution dependence on the uncertainty of the inlet velocity distribution. The calculated results were shown to agree generally with the experimental data. The simplification of the manikin shape had a significant impact on the local parameter prediction accuracy.

Keywords: ventilation, thermal manikin, turbulent airflow and heat transfer, natural convection

Citation: Stepasheva E.D., Zasimova M.A., Ivanov N.G., Thermal manikin shape influence on airflow and heat transfer in the model room with displacement ventilation, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 14 (3) (2021) 94–111. DOI: 10.18721/JPM.14307

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

Введение

Системы вентиляции должны обеспечивать требуемые характеристики теплового комфорта, поддерживая подходящие для человека условия микроклимата в вентилируемых помещениях. Для практических оценок уровня теплового комфорта обычно используют следующие характеристики [1, 2]:

интенсивность сквозняка DR (англ. Draught Rating),

прогнозируемая средняя оценка качества воздушной среды – PMV (англ. Predicted Mean Vote),

прогнозируемый процент недовольных температурой среды – PPD (англ. Predicted Percentage Dissatisfied),

прогнозируемый процент недовольных локальной неоднородностью температуры – PD (англ. Percentage Dissatisfied).

Для уже введенных в эксплуатацию систем вентиляции оценку этих характеристик осуществляют на основе опросов людей, находящихся в помещении, и для этого применяется специальная методика. Оценить характеристики теплового комфорта можно также на основе первичных данных о течении воздуха: локальных и/или интегральных значений скорости, пульсаций скорости и (для неизотермических задач) температуры, используя включенные в стандарты эмпирические соотношения.

При постановке и решении прикладных задач вентиляции возникает большое число параметров, которые сложно (а часто и невозможно) определить однозначно. К таким параметрам относятся, в том числе, следующие:

положение человека в помещении и его изменение во времени,

форма тела человека (индивидуальная геометрия, положение отдельных частей тела),

индивидуальные характеристики тепловыделения (локальные и интегральные),

теплоизоляционные характеристики одежды и другие.

Полностью учесть все перечисленные параметры, существенно влияющие на характеристики течения и теплообмена, и, как следствие, на характеристики теплового комфорта, можно лишь в некоторых простых случаях. Как при проведении физического моделирования, так и при использовании средств вычислительной гидродинамики – CFD (*англ.* Computational Fluid Dynamics) часто оказывается полезным, а иногда и необходимым упрощение постановки задачи, которое в каждом случае требует обоснования.

При проведении физических экспериментов, направленных на изучение характеристик теплового комфорта в помещении с размещенными в нем людьми, широко используются тепловые манекены, имитирующие человека, включая его тепловыделение и дыхание. В расчетных исследованиях вентиляционных течений также постоянно используются «виртуальные» тепловые манекены (см., например, недавние работы [3 - 5]). Достижения в области численного моделирования воздушного течения и теплообмена в окрестности нагреваемого манекена отражены в подробном обзоре [6].

В ходе численного моделирования, особенно при проведении фундаментальных исследований, предпочтительнее рассматривать не детальную форму тела человека, а упрощенную

геометрическую форму теплового манекена, так как это позволяет более четко контролировать условия вычислительного эксперимента (например, качество сетки у твердой поверхности). Примеры расчетов течения и теплообмена в окрестности теплового манекена упрощенной формы представлены в работах [7, 8], где результаты получены на основе вихреразрешающего метода моделирования крупных вихрей. В современных физических экспериментах, однако, обычно используются стандартные тепловые манекены, имеющие детализированную форму (далее используется термин «детальная форма»), и для непосредственного сопоставления расчетных результатов, полученных при использовании упрощенного манекена, с экспериментальными данными необходимы дополнительные методические исследования.

Оценка степени влияния формы теплового манекена на структуру течения в помещении ранее выполнялась для различных конфигураций как в экспериментальных работах [9, 10], так и с использованием средств вычислительной гидродинамики, [8, 11, 12]. В работах [8 – 12] для каждой из рассмотренных задач были сделаны имеющие частный характер выводы о влиянии изменения формы манекена на локальные характеристики течения.

В литературе имеется база экспериментальных данных для двух тестовых конфигураций, отвечающих двум типам вентиляции: перемешивающей [10, 13] и вытесняющей [13]. В первом случае подача воздуха через приточные отверстия обеспечивает хорошее смешение воздуха в помещении, например, за счет глобальной циркуляции. При использовании вытесняющей вентиляции (второй случай) свежий воздух подается в нижнюю часть помещения, а вытяжные отверстия находятся у потолка, что минимизирует глобальное перемешивание. В экспериментах [10, 13] в тестовом помещении был размещен нагретый тепловой манекен, теплосъем с поверхности которого контролировался. Эксперименты, в которых были проведены измерения полей скорости и температуры в нескольких сечениях помещения, трактуются авторами как эталонные. Результаты экспериментальных измерений, хорошо документированные и размещенные авторами в виде базы данных на сайте http://www.cfdbenchmarks.com/, ранее неоднократно использовались для валидации расчетных данных [8, 14 – 16]: в работах [8, 14] представлены результаты расчетов для помещения с вытесняющей вентиляцией, а в работах [15, 16] – с перемешивающей.

В настоящей работе представлены результаты численного исследования течения и теплообмена вблизи теплового манекена для условий теста с вытесняющей вентиляцией [13].

Цель исследования — оценка степени чувствительности структуры течения в помещении к изменению геометрической формы теплового манекена.

Расчеты проведены для трех форм манекена: детальной (приближена к форме человека и в существенной степени соответствует принятой в эксперименте), частично упрощенной (блочная, состоящая из параллелепипедов) и полностью упрощенной (один цельный параллелепипед). Моделирование турбулентности осуществлялось с помощью RANS-подхода с привлечением наиболее часто использующейся при исследовании струйных течений стандартной k-є модели турбулентности.

Постановка задачи

Геометрическая модель. Рассматривается вентилируемое помещение (рис. 1,*a*); его высота, ширина и длина (в метрах) составляют H = 2,7, W = 3,0 и L = 3,5 соответственно. Использованная система координат показана на схеме помещения, начало системы координат расположено в его нижнем углу. На одной из торцевых сторон вблизи пола имеется прямоугольное входное отверстие высотой $h_{in} = 0,2$ м и шириной $w_{in} = 0,4$ м. Эквивалентный диаметр входного отверстия $D_e = (4h_{in}w_{in}/\pi)^{1/2} = 0,3$ м. Выходное отверстие имеет квадратную форму $h_{out} = w_{out} = 0,3$ м и располагается на противоположной торцевой стенке вблизи потолка помещения. Входное отверстия центрированы вдоль координаты *z*.



Рис. 1. Схема помещения (*a*) и различные формы манекена: параллелепипед (*b*), блочная (*c*), детальная (*d*). Показаны вход (Inlet), выход (Outlet) воздушных масс, геометрические параметры; линиями $l_1 - l_6$ обозначены положения сечений, для которых имеются данные эксперимента

В центре помещения располагается тепловой манекен, его поверхность удалена на расстояние h = 0,05 м от пола помещения. Рассмотрены три формы теплового манекена: параллелепипед, блочная и детальная (см. также табл. 1). Манекен установлен в вертикальном положении, его лицо обращено к приточному отверстию. Наиболее простая из рассмотренных форм манекена — это параллелепипед (рис. 1,*b*), его размеры таковы: высота $h_m = 1,7$ м, ширина $w_m = 0,4$ м и толщина $l_m = 0,1$ м. Площадь поверхности манекена составляет $S_m = 1,78$ м².

Геометрические параметры блочной формы манекена (рис. 1,*c*) приняты такими же, как в работе [8]. Манекен блочной формы составлен из параллелепипедов, совокупность которых в некоторой степени имитирует реальную форму человека. В манекене отдельно выделены следующие части: голова, две руки, туловище и две ноги (табл. 2). Площадь поверхности манекена равна $S_m = 1,48 \text{ м}^2$ (см. табл. 1).

Детальная форма манекена (рис. 1,*d*) приближена к форме теплового манекена, используемой в эксперименте. Геометрия манекена была создана с помощью специализированного программного обеспечения MakeHuman (официальный веб-сайт: *makehumancommunity.org*).

Отметим, что площадь теплового манекена, используемого в экспериментальной работе [13], составляет $S_m = 1,47 \text{ m}^2$. Это значение на 7% меньше, чем для детальной формы манекена, рассматриваемой в данной работе. Дело в том, что, несмотря на хорошую документированность результатов измерений, невозможно полностью воспроизвести форму манекена, использованного в работе [13], ввиду недостаточности описания его геометрии. Несмотря на то, что в указанном литературном источнике эксперименты проводились как для сидячего, так и для стоячего положений манекена (последнее рассматривается в настоящей работе), на сайте http://www.cfd-benchmarks.com/ геометрия приведена только для сидячего положения.

Линии $l_1 - l_6$, показанные на рис. 1,*a*, демонстрируют положения сечений, для которых имеются экспериментальные данные [13]. Все линии расположены в центральной плоскости помещения: при z = 1,5 м. Линии $l_1 - l_4$ удалены на расстояния (в метрах) 0,20, 1,55, 1,95 и 3,30 от входного отверстия. На том же рисунке символами отмечены положения точек, где вдоль указанных линий проводились измерения модуля скорости (выполнены с помощью

датчика ультразвукового анемометра) и температуры (с помощью термопары). Для линий l_5 , l_6 (их положения составляют x = 1,75 м и y = 1,60 м) в базе данных имеются значения скорости, полученные методом Particle Image Velocimetry (PIV).

Таблица 1

Форма манекена (S_m , м ²)	<i>q</i> _w , Вт/м ²	Расчетная сетка, млн.	Тип элементов	<i>у_p</i> , мм	$\langle y^+ \rangle$
Параллелепипед (1,78)	21	0,79	Гексагональный	1,0	1,12
		0,97		0,5	0,58
		0,24		5,0	4,74
		1,16		1,0	1,05
Блочная (1,48)	26	1,04	полиэдральный	1,0	1,05
Детальная (1,57)	24	1,62		1,0	1,02

Варианты расчетов, учитывающих форму манекена и внешние факторы

Обозначения: S_m – площадь поверхности, q_w – удельный тепловой поток, y_p – высота первой пристенной ячейки у поверхности манекена, $\langle y^+ \rangle$ – усредненная величина безразмерного расстояния от поверхности манекена до центра первой пристенной ячейки.

Таблица 2

Геометрические параметры манекена трех форм

	Размер для формы, м			
Параметр целого или детали	параллелепипеда	блочной	детальной	
Poct h_m	1,70	1,70	1,70	
Наибольшая ширина w_m	0,40	0,40	0,59	
Толщина <i>l</i>	0,10	0,30	0,30	
Голова		0,15×0,10		
Туловище		0,75×0,30	Использовано программное обеспечение MakeHuman	
Рука (две)	_	0,50×0,05		
Нога (две)]	0,80×0,10		
Расстояние между ногами		0,10		

П р и м е ч а н и е. Размеры деталей манекена для блочной формы даны в плоскости уг.

Физические параметры среды и граничные условия. Физические свойства воздуха принимались постоянными и соответствовали температуре 22 °C:

плотность $\rho = 1,194$ кг/м³,

динамическая вязкость $\mu = 1,789 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м·c)},$

удельная теплоемкость $C_p = 1006 \, \text{Дж}/(\text{кг·K}),$

коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,024$ Вт/(м·К).

Число Прандтля при таких параметрах составляет $\Pr = \mu C_n / \lambda = 0,69.$

Согласно документации к эксперименту [13], при постановке расчетов рекомендуется на входе в помещение задавать однородный профиль скорости $V_{in} = 0,2$ м/с. Это условие было воспроизведено в основной серии расчетов, что соответствует объемному расходу 57,6 м³/ч.

Число Рейнольдса, построенное по эквивалентному диаметру и входной скорости, в этом случае составляет $\text{Re} = \rho D_e V_{in} / \mu = 4300.$

Помимо рекомендаций, в приложении к данным эксперимента [13] на сайте содержится таблица (файл в формате Excel) измеренных значений модуля скорости на входе. Согласно этим данным, среднерасходное значение скорости на входе составляет 0,181 м/с. Для варианта с блочной формой манекена был выполнен дополнительный расчет с заданием однородного профиля скорости на входе $V_{in} = 0,181$ м/с (соответствующий расход равен 52,1 м³/ч). Кроме этого, был проведен расчет с заданием на входе неравномерного профиля скорости, полученного из решения задачи о течении в канале соответствующего сечения, среднерасходная скорость в котором составляет $V_{in} = 0,181$ м/с.

На выходе из расчетной области задавались мягкие граничные условия (постоянство давления). На стенках вентилируемого помещения и на поверхности манекена ставилось условие прилипания.

В соответствии с условиями эксперимента [13], задавались следующие тепловые граничные условия:

входная температура постоянна и равна $T_{in} = 22$ °C,

стенки помещения адиабатические.

Интегральный теплосъем с поверхности манекена для всех вариантов геометрии принимался равным $Q_w = 38$ Вт, что соответствует 50 % от значения, принятого в стандартах для спокойно стоящего человека. Уменьшение тепловыделения, характерного для человека, примерно в два раза – это методика, принятая в тех случаях, когда в расчетах для теплового манекена, как и в настоящей работе, не учитывается радиационный теплообмен. На поверхности манекена задавалось постоянное значение удельного теплового потока, определяемого как $q_w = Q_w/S_m$. Конкретные значения удельного теплового потока, использованные для разных геометрических форм манекена, приведены в табл. 1.

Математическая и вычислительная модели. Для моделирования турбулентности использовался RANS-подход, основанный на решении уравнений Навье — Стокса, осредненных по Рейнольдсу (см., например, монографию [17]). Уравнения замыкаются стандартной полуэмпирической k- ε моделью турбулентности [18] в сочетании с методикой разрешения пристенной области Enhanced Wall Treatment. В расчетах на входе в помещение были приняты следующие характеристики турбулентности:

интенсивность турбулентности I = 30 %,

отношение турбулентной вязкости к молекулярной $\mu_{t}/\mu = 44$.

Учет силы плавучести осуществлялся в приближении Буссинеска. Вектор ускорения свободного падения **g**, модуль которого g = 9,81 м/с², направлен вертикально вниз, по направлению к полу помещения (см. рис. 1,*a*). Коэффициент объемного расширения задавался как $\beta = 3,39 \cdot 10^{-3}$ K⁻¹.

В расчетах использовались квазиструктурированные сетки с гексагональными элементами, построенные в сеточном генераторе ICEM CFD 2019 R3, а также неструктурированные сетки с полиэдральными элементами, полученные в ANSYS Fluent через преобразование расчетных сеток с тетраэдральными элементами, построенных в ICEM CFD. Размер расчетных сеток, используемых в работе, а также некоторые характеристики сеток приведены в табл. 1. Внешний вид сеток с гексагональными и полиэдральными элементами показан на рис. 2,*a*,*b*. Сетки имеют сгущение к стенкам расчетной области, а также к поверхности манекена.

Сетки с гексагональными элементами использовались для наиболее простой формы манекена — параллелепипеда. Были построены два варианта сетки с гексагональными элементами, в которых варьировалась высота *y*_p первой пристенной ячейки у поверхности манекена (см. табл. 1): для первого варианта этот размер составил 1 мм, общий размер сетки при этом



Рис. 2. Общий вид расчетных сеток с гексагональными элементами (0,79 млн.) (*a*) и полиэдральными элементами (1,16 млн.) (*b*) для манекена в форме параллелепипеда, а также распределения значения *y*⁺ по поверхностям стенок помещения (сетка 1,16 млн.) (*c*) и по поверхностям манекенов трех форм: параллелепипеда (*d*), блочной (*e*) и детальной (*f*)

790 тыс. ($82 \times 109 \times 90$) ячеек, а для второго — 0,5 мм (в два раза меньше), а общий размер сетки — 970 тыс. ($98 \times 111 \times 92$) ячеек. Величина безразмерного расстояния y^+ от поверхности манекена до центра первой пристенной ячейки (см. рис. 2,*a*) в среднем для этих вариантов составляет 1,12 и 0,58 соответственно.

Для манекена в форме параллелепипеда были также построены две сетки, состоящие из полиэдральных элементов. Более экономичная сетка, с общим числом элементов 240 тыс., имела по пять призматических слоев без сгущения вблизи стенок, перпендикулярных осям x и y, а также вблизи поверхности манекена; поперечный размер ячеек в слоях составлял $y_p = 5$ мм. Остальная область — внутренняя часть помещения — была разбита на одинаковые полиэдральные ячейки, их характерный размер равен 10 см. Такая топология сетки часто используется в инженерной практике в силу простоты генерации. Вторая полиэдральная сетка, с общим числом элементов 1,16 млн., имеет сгущение в области пристенной струи, а также в области над манекеном (см. рис. 2,*b*). Характерный размер полиэдральных элементов в измельченных областях равен 5 см, а в остальной области — 10 см. Вблизи поверхности манекена при этом задавалось 10 призматических слоев с коэффициентом сгущения 1,1 к поверхности манекена; высота первого пристенного слоя $y_p = 1$ мм. Распределение y^+ для этого варианта расчетной сетки приведено на рис. 2,*c*,*d*. Значение величины y^+ на стенках помещения не превышает 10, а по поверхности манекена составляет в среднем 1,05.

Расчетные сетки для блочной и детальной форм манекена состояли из призматических слоев и полиэдральных ячеек с характеристиками, сходными с полиэдральной сеткой со сгущением для манекена в форме параллелепипеда. Распределение величины y^+ по поверхности манекенов для этих случаев показано на рис. 2,*e*,*f*. Значения y^+ по поверхности манекена в среднем также составили около единицы (см. табл. 1).

Все расчеты производились в CFD-пакете ANSYS Fluent 2019 R3. Аппроксимация уравнений осуществлялась со вторым порядком точности. Для организации итерационного процесса был выбран метод SIMPLE. Использовались ресурсы кластера научно-исследовательской лаборатории гидроаэродинамики (максимально 24 ядра).

Результаты методических расчетов и их обсуждение

Чувствительность решения к используемой сетке. На рис. 3 показаны профили модуля скорости в шести сечениях помещения $l_1 - l_6$, полученные в расчетах для манекена в форме параллелепипеда при использовании сеток разной размерности и топологии (см. табл. 1).



Рис. 3. Профили скорости (a - f), построенные вдоль линий $l_1 - l_6$ (см. рис. 1), полученные в решениях с использованием сеток разной размерности, млн. ячеек: 0,79 (1), 0,97 (2), 0,24 (3) и 1,16 (4); g – схема расположения сечений

На графиках для сечений l_1 и l_2 (рис. 3,*a*,*b*) можно отметить область распространения приточной пристенной струи (при y < 0,6 м). Интенсивность струи падает вниз по потоку; значение модуля скорости изменяется от входного, равного 0,20 м/с, до соответствующего значения перед поверхностью манекена, равного 0,15 м/с. Профили скорости, показанные в сечениях l_1 и l_2 , слабо меняются при изменении расчетной сетки, хотя заметно, что решение на самой грубой сетке *3* здесь несколько отличается от остальных. Существенная чувствительность получаемого решения к используемой расчетной сетке проявляется в области следа за манекеном, что можно отметить на графиках скорости в сечениях l_3 и l_4 для нижней части помещения при y < 1,8 м (рис. 3,*c*,*d*). Здесь течение характеризуется пониженными значениями скорости. Решение, полученное с использованием сетки с меньшим числом элементов (240 тыс.), заметно отличается от решений на более подробных сетках.

Графики скорости, построенные в сечениях l_5 и l_6 (рис. 3,*e*,*f*), а также в верхней области помещения в сечениях l_2 и l_3 при $y \ge 1,8$ м (рис. 3,*b*,*c*), иллюстрируют свободноконвективное течение, которое возникает вблизи поверхности теплового манекена и в тепловом факеле над ним за счет действия силы плавучести. Вблизи поверхности манекена формируется свободноконвективный пограничный слой, характерные значения скорости в котором в верхней части манекена достигают 0,25 м/с (рис. 3,*f*). В этой области наблюдается слабая зависимость решения от размерности сетки, используемой в расчетах. Некоторая чувствительность решения к сетке имеется в области теплового факела, который формируется над манекеном. Анализ данных по распределению скорости, показанных на рис. 3,*e*, позволяет отметить, что значения скорости в этой области, вычисленные с использованием сетки в 240 тыс. ячеек, на 15 % ниже, чем для остальных сеток. Важно также отметить, что поля температуры, по-



Рис. 4. Профили скорости (a - f), построенные вдоль линий $l_1 - l_6$ (см. рис. 1), полученные при задании различных входных распределений скорости: однородное, равное 0,181 м/с (1); неравномерный профиль со среднерасходной скоростью 0,181 м/с (2); однородное, равное 0,200 м/c (3); g - схема расположения сечений

лученные в расчетах с использованием всех рассматриваемых сеток, практически совпадают между собой.

Следует указать, что три решения, полученные с использованием двух гексагональных сеток, а также сетки с полиэдральными элементами со сгущением, практически не различаются. Это позволяет заключить, что решение, полученное на сетке с полиэдральными ячейками со сгущением, можно признать слабо зависящим от сетки. В силу этого, для вариантов с блочной и детальной формами манекена использовались сетки аналогичной топологии и размерности.

Чувствительность решения к входному распределению скорости. Исследование указанной чувствительности было выполнено для варианта с блочной формой манекена. Были заданы три варианта входного распределения:

однородное распределение скорости $V_{in} = 0,2$ м/с, рекомендованное в работе [13]; однородное распределение $V_{in} = 0,181$ м/с (среднее значение по данным эксперимента, приведенным в приложении к работе [13]);

распределение, полученное путем дополнительного расчета течения в канале прямоугольного сечения $h_{in} \times w_{in}$ протяженностью 15 h_{in} , со среднерасходной скоростью 0,181 м/с.

На рис. 4 приведены профили скорости в сечениях $l_1 - l_6$, полученные в решениях с различными входными распределениями скорости. На графике, представленном на рис. 4,а для сечения l₁, можно заметить различия в полученных решениях: максимальные значения скорости в области пристенной струи (при y < 0,6 м) находятся в диапазоне 0,19 - 0,23 м/с. В остальных сечениях $(l_2 - l_6)$, вдали от входной области, профили скорости на рис. 4 отличаются друг от друга незначительно: некоторые различия имеются в области пониженных скоростей в сечениях l_3 и l_4 , а также в области теплового факела над манекеном (сечение l_5). Данные, представленные на рис. 4, позволяют сделать вывод о том, что полученное решение слабо меняется в рассмотренном диапазоне расходов на входе. В основной серии расчетов использовалось однородное распределение $V_{in} = 0,2$ м/с.

Влияние формы манекена на течение и теплообмен

Описание структуры течения. Структуру течения в вентилируемом помещении иллюстрирует рис. 5, на котором изображены линии тока, окрашенные в соответствии со значениями модуля скорости (рис. 5, a - c), а также поля модуля скорости в нескольких сечениях помещения (рис. 5, d - f), построенные для трех вариантов формы манекена.

Полученные решения позволяют выделить две области течения. Первая — это область распространения пристенной струи в нижней части помещения и ее взаимодействия с манекеном. Вторая — это область свободноконвективного подъемного течения воздуха, вызванного действием силы плавучести. Такое течение формируется вблизи поверхности нагретого манекена и над ним, образуя тепловой факел, который инициирует вторичное течение в верхней части помещения. Обе области характеризуются сопоставимыми значениями скорости, при этом они слабо взаимодействуют между собой.

На рис. 6 изображены поля скорости в двух средних сечениях помещения: z = 1,50 м и x = 1,75 м (поля скорости на рис. 5,d - f даны в изометрии для этих же сечений). Для всех вариантов формы манекена в расчетах получена структура течения, несимметричная относительно центральной плоскости z = 1,5 м. Пристенная струя распространяется от входного отверстия вдоль пола, взаимодействует с манекеном, после чего, ослабев, сталкивается с торцевой стенкой, противоположной от входа. При взаимодействии струи со стенкой расход разделяется неравномерно, и после разворота возвратное течение вдоль одного из нижних углов помещения оказывается более интенсивным, чем вдоль противоположно-



Рис. 5. Линии тока (a - c), окрашенные в соответствии со значениями модуля скорости, а также поля модуля скорости (d - f) в нескольких сечениях помещения, полученные в расчетах с использованием трех форм манекена: параллелепипеда (a, d), блочной (b, e), детальной (c, f)



Рис. 6. Распределения модуля скорости в двух сечениях помещения: z = 1,50 м (a - c) и x = 1,75 м (d - f), полученные в расчетах с использованием трех форм манекена: параллелепипед (a, d), блочная (b, e), детальная (c, f)

го угла. Это видно по локальным максимумам скорости в нижней правой части помещения (рис. 6, d, e, f). Отметим, что несимметричное решение было получено для обеих топологий расчетной сетки, которые использовались для манекена в форме параллелепипеда.

На рис. 5 и 6 представлены результаты для решения с прилипанием струи к правой боковой стенке, которое, как оказалось, не является единственным. Для варианта манекена в форме параллелепипеда были получены два устойчивых решения (сошедшихся по невязкам) с прилипанием струи к противоположным боковым стенкам вентилируемого помещения. Тот факт, что решение было не единственным, обнаружен для обеих топологий расчетной сетки.

Полученные данные показывают, что глобальная структура течения, формирующаяся в помещении, слабо меняется при изменении формы манекена. Однако в зависимости от формы манекена изменяются локальные характеристики потока. Так, в области струйного течения различия полей скорости наблюдаются при взаимодействии струи с манекеном (см. рис. 6). В области свободноконвективного течения наблюдаются различия характерных значений скорости в тепловом факеле над манекеном. Максимальные значения скорости в тепловом факеле для манекена в форме параллелепипеда составили 0,180 м/с, для блочной формы — 0,230 м/с, для детальной — 0,255 м/с. Таким образом, для манекенов детальной и блочной форм интенсивность формируемого свободноконвективного течения выше, чем для варианта манекена в форме параллелепипеда.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных. Результаты численного моделирования были сопоставлены с экспериментальными данными [13] (рис. 7). На рис. 7, *а* схематично показано расположение сечений I и II, в которых проводились PIV-измерения в работе [13]. Оба сечения находятся в центре помещения (z = 1,5 м): сечение I – над манекеном, а сечение II – перед ним, в окрестности лица. Распределения модуля скорости вблизи поверхности манекена в сечениях I и II по данным эксперимента [13] показано на рис. 7,*b*,*c*. Модуль скорости построен по двум компонентам V_x и V_y , однако в работе [13] расположение координатных осей x', y' при представлении экспериментальных данных точно не описано. Поля модуля скорости, полученные по данным численного моделирования для вариантов с разной формой манекена, приведены на рис. 7,*d*,*e*,*f*. Модуль скорости построен по трем компонентам, но вклад компоненты скорости V_z в среднем сечении минимален.



Рис. 7. Схема расположения сечений I и II (*a*), а также сравнение распределений модуля скорости в сечениях I (*b*) и II (*c*) по данным эксперимента [13] с расчетными результатами для трех форм манекена: параллелепипед (*d*), блочная (*e*), детальная (*f*) (показана центральная плоскость *z* = 1,5 м)

При изменении формы теплового манекена структура подъемного течения вблизи его поверхности существенно меняется: характерные значения скорости перед манекеном (при x < 1,7 м) в вариантах с блочной формой и формой параллелепипеда заметно выше, чем в варианте с детальной формой. В случае упрощенной (плоской) формы манекена, в отсутствие на поверхности каких-либо неоднородностей, постановка приближена к задаче о свободноконвективном течении вблизи нагретой пластины, в которой подъемная скорость увеличивается вверх по течению. В варианте с детальной формой манекена, в близи передней части торса формируется сложное трехмерное свободноконвективное подъемное течение, которое меняет свое направление в области плеч манекена, и, как показывают линии тока (см. рис. 5,d), поднявшийся вблизи торса воздушный поток перетекает над плечами на заднюю часть манекена и далее движется вверх вдоль задней части головы. Таким образом, значения скорости в области лица оказываются заметно ниже для детального манекена, чем полученные для манекенов упрощенной формы (параллелепипед и блочная).

На рис. 8 приведены распределения скорости в нескольких сечениях помещения, полученные в эксперименте и в результате расчетов с использованием трех форм манекена. Линия l_6 , распределение скорости вдоль которой показано на рис. 8,*c*, расположена в сечении II; координата *x* ′ отсчитывается от поверхности лица манекена. Полученная в расчетах структура течения вблизи детального манекена в сечении II (вблизи лица) как качественно (см. рис. 7), так и количественно (рис. 8,*c*) согласуется со структурой течения, полученной в эксперименте. При использовании более простых форм манекена (и блочной, и параллелепипеда) значения скорости в этой области оказываются завышенными приблизительно в два раза.

По значениям скорости в сечении I можно оценить интенсивность формирующегося над манекеном теплового факела. Распределение скорости вдоль находящейся в этом сечении линии l_s показано на рис. 8,*b*. Как было отмечено ранее, изменение формы манекена суще-



Рис. 8. Схема расположения сечений (*a*), а также профили модуля скорости, построенные вдоль линий $l_1 - l_6 (b - g)$, которые получены в решениях с использованием трех форм манекена: параллелепипед (*1*), блочная (*2*) и детальная (*3*)

ственно меняет положение теплового факела и характерные скорости подъемного течения. Наиболее приближенные к эксперименту данные о скорости в сечении I можно получить при использовании как детальной, так и блочной форм манекена.

Распределения скорости вдали от поверхности манекена показаны на рис. 8,*d*,*e*,*g*. Анализ графиков позволяет отметить удовлетворительное согласие результатов расчета и данных эксперимента в области пристенной струи (сечения l_1 и l_2 при y < 0,3 м): расчетные значения скорости в струе, правда, несколько выше, чем данные эксперимента. В области низкоскоростного течения перед манекеном (сечение l_1 при y > 0,3 м и l_2 при 0,6 < y < 2,1 м) характерные значения скорости составляют 0,025 м/с. Здесь данные расчета в целом соответствуют экспериментальным значениям скорости. Наблюдается достаточно слабое влияние изменения формы манекена на структуру течения в этой области.

Более существенное влияние формы манекена на структуру течения можно отметить в сечении l_3 , расположенном непосредственно за манекеном вблизи его поверхности (рис. 8, f). Диапазон изменения характерных значений скорости в этой области не превышает 0,1 м/с. Экспериментальные значения скорости ниже, чем полученные в расчетах с использованием всех форм манекена. По всей видимости, различия расчетных и экспериментальных данных в этой области связаны с тем, что при постановке численного моделирования, даже в случае детальной геометрии манекена, расположение его ног не воспроизводится точно. В то же время в сечении l_4 (рис. 8,g) расчетные результаты, относящиеся к скорости, для трех различных вариантов форм манекена совпадают как между собой, так и с данными эксперимента. Некоторые различия данных имеются в нижнем углу помещения при y < 0,6 м.

Параметры теплоотдачи от поверхности манекена. Распределения температуры T_w по поверхности теплового манекена, полученные в вариантах задачи с различной формой мане-



Рис. 9. Расчетные распределения температуры (*a* – *c*) и числа Нуссельта (*d* – *f*) по поверхностям манекенов различной формы: параллелепипеда (*a*, *d*), блочной (*b*, *e*) и детальной (*c*, *f*)

кена, приведены на рис. 9,*a*-*c*. Соответствующие распределения безразмерной теплоотдачи – числа Нуссельта

$$\mathrm{Nu} = q_{w}l_{w}/\lambda(T_{in}-T_{w}),$$

где $l_m = 0,1$ м для всех форм манекена, представлены на рис. 9,*d*,*e*,*f*.

В табл. 3 приведены пределы диапазонов изменения температуры по поверхностям манекенов различной формы: минимальный $T_{w,min}$, максимальный $T_{w,max}$; представлены также усредненные по поверхности манекена значения температуры $\langle T_w \rangle^{w,max}$ и числа Нуссельта $\langle Nu \rangle$.

Для всех рассмотренных форм манекена распределения температуры с наветренной (противоположной направлению оси *x*) и подветренной (по направлению оси *x*) сторон различаются. С подветренной стороны значения температуры выше, чем с наветренной; в соответствии с этим теплоотдача с этой стороны ниже. Имеются локальные различия распределений температуры для разных форм манекена. Так, для наиболее простой формы (параллелепипед) распределение практически однородно в *z*-направлении, тогда как для детальной формы наблюдается неоднородное распределение.

Следует отметить увеличение температуры и уменьшение теплоотдачи по высоте теплового манекена. Минимальное значение температуры по поверхности манекена расположено в его нижней части, это значение приближено к температуре приточной воздушной струи $T_{in} = 22$ °C, и оно слабо изменяется от одной формы манекена к другой. Максимальное значение температуры расположено в верхней части манекена, вблизи изгибов поверхности. Величина $T_{w,max}$ существенно зависит от формы манекена и принимает значения 33,6 °C для параллелепипеда, 41,7 °C для блочной формы и 51,4 °C для детальной (см. табл. 3). Широкий диапазон изменения максимальных значений температуры при детализации формы манекена свидетельствует о том, что при оценке локальных параметров те-

Таблица 3

Параметр	Расчетное	Эксперимент		
	параллелепипед	блочная	детальная	детальная
$T_{w,\min}, ^{\circ}\mathrm{C}$	23,18	23,21	22,33	_
$T_{w,\max}, {}^{\circ}\mathrm{C}$	33,60	41,70	51,40	_
$\langle T_{_{\scriptscriptstyle W}} \rangle, ^{\circ}\mathrm{C}$	30,50	31,30	30,70	32,2
Nu	13,2	12,1	12,6	10,6

Сравнение расчетных и экспериментальных значений параметров теплоотдачи с поверхностей манекенов различной формы

плового комфорта упрощение формы манекена может привести к большим погрешностям. Следует отметить, впрочем, что при столь высоких локальных значениях температуры, которые фиксировались на поверхности манекена детальной формы, в реальных условиях включаются механизмы терморегуляции; пренебрежение же последними может привести к существенно бо́льшим неопределенностям.

Среднее значение температуры — интегральный параметр для данной задачи — слабо зависит от используемой геометрической формы манекена и составляет около 31 °C. Важно отметить, что экспериментальное значение средней температуры согласуется с расчетным.

Заключение

Проведено численное исследование влияния формы нагретого теплового манекена на течение и теплообмен воздуха в модельном помещении с вытесняющей вентиляцией. Рассмотрены три варианта формы манекена: параллелепипед, блочная и детальная. Расчеты выполнены на основе RANS-подхода с использованием стандартной k- ε модели турбулентности.

Для самой простой формы — параллелепипеда — проведено исследование чувствительности решения к топологии и размерности расчетной сетки. Показано, что сетка с полиэдральными элементами размерностью примерно один миллион ячеек с измельчением в области приточной струи и теплового факела позволяет получить решение, слабо зависящее от параметров сетки. Исследовано влияние входных динамических условий на получаемое решение: в рассмотренном диапазоне скоростей установлена слабая чувствительность структуры течения в окрестности манекена от входного профиля скорости.

В ходе расчетов было обнаружено, что глобальная структура течения, формирующаяся в помещении, не симметрична относительно центральной плоскости. Для одного из вариантов геометрии было получено два сошедшихся решения, в которых струя отклоняется к противоположным боковым стенкам.

Установлено, что при использовании детальной и блочной форм манекена, интенсивность свободноконвективного течения выше, чем для манекена самой простой формы — одиночного параллелепипеда. Установлено также, что упрощение формы манекена существенно влияет на локальные характеристики течения и теплообмена. В то же время интегральные параметры слабо зависят от используемой формы манекена.

В целом можно сделать вывод о том, что при необходимости использование упрощенной формы манекена оправдано и не приводит к существенному искажению решения.

Исследование проведено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №20-58-18013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fanger P.O., Melikov A.K., Hanzawa H., Ring J. Air turbulence and sensation of draught // Energy and Buildings. 1988. Vol. 12. No. 1. Pp. 21–39.

2. ANSI/ASHRAE Standard 62.1–2019. Ventilation for acceptable indoor air quality. 2019. https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2

3. **Pei J., Rim D.** Quality control of computational fluid dynamics (CFD) model of ozone reaction with human surface: Effects of mesh size and turbulence model // Building and Environment. 2021. Vol. 189. February. P. 107513.

4. Al Assaad D., Ghali K., Ghaddar N., Katramiz E., Ghani S. Evaluation of different personalized ventilation air terminal devices: Inhalation vs. clothing-mediated exposures // Building and Environment. 2021. Vol. 192. April. P. 107637.

5. Ma J., Qian H., Nielsen P.V., Liu L., Li Y., Zheng X. What dominates personal exposure? Ambient airflow pattern or local human thermal plume // Building and Environment. 2021. Vol. 196. June. P. 107790.

6. Liu J., Zhu S., Kim M.K., Srebric J. A review of CFD analysis methods for personalized ventilation (PV) in indoor built environments // Sustainability. 2019. Vol. 11. No. 15. P. 4166.

7. Berrouk A.S., Lai A.C.K., Cheung A.C.T., Wong S.L. Experimental measurements and large eddy simulation of expiratory droplet dispersion in a mechanically ventilated enclosure with thermal effects // Building and Environment. 2010. Vol. 45. No. 2. Pp. 371–379.

8. **Taghinia J.H., Rahman M.M., Lu X.** Effects of different CFD modeling approaches and simplification of shape on prediction of flow field around manikin // Energy and Buildings. 2018. Vol. 170. 1 July. Pp. 47–60.

9. **Zukowska D., Melikov A., Popiolek Z.** Thermal plumes above a simulated sitting person with different complexity of body geometry // Proceedings of Roomvent 2007, The Tenth International Conference on Air Distribution in Rooms. Helsinki, Finland, June 13–15, 2007. Vol. 3. Pp. 191–198.

10. **Topp C., Hesselholt P., Trier M.R., Nielsen P.V.** Influence of geometry of thermal manikins on room airflow // Proceedings of ISIAQ 7th International Conference "Healthy Buildings 2003". Singapore, December 7–22, 2003. 6 p.

11. **Brohus H., Nielsen P.V.** CFD models of persons evaluated by full-scale wind channel experiments // Proceedings of Roomvent'96, The Fifth International Conference on Air Distribution in Rooms. Yo-kohama, Japan, July 17–19, 1996. Vol. 2. Pp. 137–144.

12. Yan Y., Li X., Yang L., Tu J. Evaluation of manikin simplification methods for CFD simulations in occupied indoor environments // Energy and Buildings. 2016. Vol. 127. 1 September. Pp. 611–626.

13. Nielsen P.V., Murakami S., Kato S., Topp C., Yang J.-H. Benchmark tests for a computer simulated person. Aalborg, Denmark: Indoor Environmental Engineering, Aalborg University, 2003. 7 p.

14. Deevy M., Sinai Y., Everitt P., Voigt L., Gobeau N. Modelling the effect of an occupant on displacement ventilation with computational fluid dynamics // Energy and Buildings. 2008. Vol. 40. No. 3. Pp. 255–264.

15. **Martinho N., Lopes A., Silva M.** CFD modelling of benchmark tests for flow around a detailed computer simulated person // Proceedings of the 7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting (at University of Coimbra). September, 2008. 6 p.

16. Martinho N., Lopes A., da Silva M.G. Evaluation of errors on the CFD computation of air flow and heat transfer around the human body // Building and Environment. 2012. Vol. 58. December. Pp. 58–69.

17. **Wilcox D.C.** Turbulence modeling for CFD. 3^{-th} Ed. La Cañada, California: DCW Industries, Inc., 2006. 515 p.

18. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in mathematical models of turbulence. London: Academic Press, 1972. 169 p.

Статья поступила в редакцию 27.06.2021, принята к публикации 20.08.2021.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СТЕПАШЕВА Екатерина Дмитриевна — студентка Физико-механического института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29 momoirin@yandex.ru

ЗАСИМОВА Марина Александровна — кандидат физико-математических наук, 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, заведующий научно-исследовательской лабораторией гидроаэродинамики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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

REFERENCES

1. Fanger P.O., Melikov A.K., Hanzawa H., Ring J., Air turbulence and sensation of draught, Energy and Buildings. 12 (1) (1988) 21–39.

2. ANSI/ASHRAE Standard 62.1–2019. Ventilation for acceptable indoor air quality. 2019. https:// www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2

3. **Pei J., Rim D.,** Quality control of computational fluid dynamics (CFD) model of ozone reaction with human surface: Effects of mesh size and turbulence model, Building and Environment. 189 (February) (2021) 107513.

4. Al Assaad D., Ghali K., Ghaddar N., et al., Evaluation of different personalized ventilation air terminal devices: Inhalation vs. clothing-mediated exposures, Building and Environment. 192 (April) (2021) 107637.

5. Ma J., Qian H., Nielsen P.V., et al., What dominates personal exposure? Ambient airflow pattern or local human thermal plume, Building and Environment. 196 (June) (2021) 107790.

6. Liu J., Zhu S., Kim M.K., Srebric J., A review of CFD analysis methods for personalized ventilation (PV) in indoor built environments, Sustainability. 11 (15) (2019) 4166.

7. Berrouk A.S., Lai A.C.K., Cheung A.C.T., Wong S.L., Experimental measurements and large eddy simulation of expiratory droplet dispersion in a mechanically ventilated enclosure with thermal effects, Building and Environment. 45 (2) (2010) 371–379.

8. Taghinia J.H., Rahman M.M., Lu X., Effects of different CFD modeling approaches and simplification of shape on prediction of flow field around manikin, Energy and Buildings. 170 (1 July) (2018) 47–60.

9. Zukowska D., Melikov A., Popiolek Z., Thermal plumes above a simulated sitting person with different complexity of body geometry, Proceedings of Roomvent 2007, The Tenth International Conference on Air Distribution in Rooms, Helsinki, Finland, June 13–15, 3 (2007) 191–198.

10. **Topp C., Hesselholt P., Trier M.R., Nielsen P.V.,** Influence of geometry of thermal manikins on room airflow, Proceedings of ISIAQ 7th International Conference "Healthy Buildings 2003", Singapore, December 7–22, 2003.

11. **Brohus H., Nielsen P.V.,** CFD models of persons evaluated by full-scale wind channel experiments, Proceedings of Roomvent'96, The Fifth International Conference on Air Distribution in Rooms, Yokohama, Japan, July 17–19, 1996. 2 (1996) 137–144.

12. Yan Y., Li X., Yang L., Tu J., Evaluation of manikin simplification methods for CFD simulations in occupied indoor environments, Energy and Buildings. 127 (1 September) (2016) 611–626.

13. Nielsen P.V., Murakami S., Kato S., et al., Benchmark tests for a computer simulated person, Indoor Environmental Engineering, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2003.

14. **Deevy M., Sinai Y., Everitt P., et al.,** Modelling the effect of an occupant on displacement ventilation with computational fluid dynamics, Energy and Buildings. 40 (3) (2008) 255–264.

15. **Martinho N., Lopes A., Silva M.,** CFD modelling of benchmark tests for flow around a detailed computer simulated person, Proceedings of the 7th International Thermal Manikin and Modelling Meeting (at University of Coimbra), September, 2008.

16. Martinho N., Lopes A., da Silva M.G., Evaluation of errors on the CFD computation of air flow and heat transfer around the human body, Building and Environment. 58 (December) (2012) 58–69.

17. **Wilcox D.C.**, Turbulence modeling for CFD, 3^{-th} Ed., DCW Industries, Inc., La Cañada, California, 2006.

18. Launder B.E., Spalding D.B., Lectures in mathematical models of turbulence. Academic Press, London, 1972.

Received 27.06.2021, accepted 20.08.2021.

THE AUTHORS

STEPASHEVA Ekaterina D.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation momoirin@yandex.ru

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

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021