

DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-16



Численное исследование микроклимата помещения с использованием СПО

¹ А.А. Цынаева, ORCID: 0000-0003-4973-6169 <a.tsynaeva@gmail.com>^{1,2} Е.А. Цынаева, ORCID: 0000-0001-5380-5513 <bertyf@mail.ru>¹ Самарский государственный технический университет,
443010, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244² Ульяновский государственный университет,
432063, Россия, Ульяновск, улица Льва Толстого, д. 42

Аннотация. Работа посвящена численному исследованию микроклимата жилого помещения, оборудованного системой управления микроклиматом, обозначаемой термином «умный дом». Численное моделирование микроклимата помещений является актуальной задачей, поскольку эффективное проектирование систем «умный дом» предполагает необходимость прогнозирования теплофизических параметров помещения с целью обеспечения возможности своевременного изменения этих параметров. Математическое моделирование было произведено на базе уравнения сохранения массы (уравнение неразрывности), уравнения сохранения количества движения (уравнение Навье-Стокса) и уравнения энергии. Замыкание системы уравнений осуществлено на основе использования $k-\omega$ sst модели турбулентности. Численное решение было получено методом конечных объемов с помощью программного кода Code_Saturne, относящегося к свободному программному обеспечению (СПО). Построение сетки выполнено в программном комплексе Salome, также имеющем свободную лицензию. В работе проведена проверка адекватности получаемого численного решения. Для разрешения поля скорости применена схема второго порядка (SOLU), для поля давления – схема (Multigrid), для кинетической энергии турбулентности, ее диссипации и для поля температур использованы автоматические настройки, максимальное количество итераций по каждому циклу задано равным 10000, точность решателя (Solver Precision) принята 10^{-8} . Для получения связанного решения уравнений баланса импульса и неразрывности использован алгоритм SIMPLEC. Верификация математической модели показала, что относительное отклонение температур от значений, полученных другими авторами, составило не более 0,8-1,2%. Таким образом, представленную математическую модель можно признать адекватной. На базе выполненного математического моделирования была получена оценка теплофизических параметров микроклимата в жилом помещении, которое оборудовано системой управления «умный дом». Математическое моделирование поля температур жилого помещения показало, что при использовании систем управления микроклимата значения температур в помещениях, имеющих различное назначение, не выходят за рамки требований комфортности. Математическое моделирование скоростей движения воздуха в различных жилых помещениях не нарушают требований комфортности для таких типов помещений и принимают значения от 0,12 до 0,15 м/с.

Ключевые слова: свободное программное обеспечение; математическое моделирование; микроклимат помещения; умный дом; верификация модели; энергосбережение

Для цитирования: Цынаева А.А., Цынаева Е.А. Численное исследование микроклимата помещения с использованием СПО. Труды ИСП РАН, том 33, вып. 5, 2021 г., стр. 259-270. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-16

Благодарности: Авторы благодарят Самарский государственный технический университет и Ульяновский государственный университет за организацию совместных исследований.

Numerical simulation of indoor microclimate using free software

¹ A.A. Tsynaeva, ORCID: 0000-0003-4973-6169 <a.tsynaeva@gmail.com>^{1,2} E.A. Tsynaeva, ORCID: 0000-0001-5380-5513 <bertyf@mail.ru>¹ Samara State Technical University,
244, Mododogvardeyskaya st., Samara, 443001, Russia² Ulyanovsk State University,
42, Lev Tolstoy Street, Ulyanovsk, 432063, Russia

Abstract. The work is devoted to the numerical study of indoor microclimate. Accurately predicting the distributed microclimate inside the residential space equipped with a microclimate control system called the «smart house» allows to save thermal energy significantly. Mathematical modeling was carried out by means of the Navier-Stokes equation, the energy equation, the continuity equation. The system of equations used was closed using the $k-\omega$ -sst turbulence model. The resulting numerical solution was performed in the Code_Saturne, which has a free license. The Salome free software package was used to build a grid. In this context, a second-order scheme (SOLU) was used to resolve the velocity field, a MULTIGRID scheme was used for the pressure field, automatic settings were used for the kinetic energy of turbulence and her dissipation and for the temperature field, the maximum number of iterations for each cycle was equal to 10000, the Solver Precision accuracy was 10^{-8} . The SIMPLEC algorithm is used to obtain a connected solution of the momentum balance and continuity equations. The paper provides an example of numerical solution verification, which is showed the relative temperature deviation from the values obtained by other authors was no more than 0.8-1.2%. Numerical simulation of the air velocity field in the residential space showed values from 0.12 to 0.15 m/s. Based on the results of the obtained solution, an analysis of the saving of thermal energy was carried out when regulating the supply of heat.

Keywords: free software; mathematical modeling; indoor microclimate; smart home; model verification; energy saving

Forcitation: Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A. Numerical simulation of indoor microclimate using free software. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 33, issue 5, 2021, pp. 259-270 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(5)-16

Acknowledgements. We are grateful to Samara State Technical University and Ulyanovsk State University for their full cooperation.

1. Введение

Математическое моделирование широко используется при исследовании тепломассообменных процессов в энергетике и технике [1,2].

При создании проекта на стадии проектирования или реконструкции систем обеспечения микроклимата [2] численное моделирование является способом снижения затрат времени и материальных средств. Численное решение подобных задач может проводиться на базе свободного программного обеспечения (СПО), например, OpenFoam или Code_Saturne. [3,4]. Эти программные коды могут быть с графическим интерфейсом или без него. Основное достоинство СПО с открытым кодом состоит в том, что пользователь самостоятельно подбирает метод численного исследования в соответствии со своими требованиями и возможностями.

При проектировании и эксплуатации систем обеспечения микроклимата с системой «умный дом» встает задача снижения затрат тепловой энергии при условии сохранения необходимых требований комфортности в помещении [2,5,6]. Повышение эффективности таких систем может быть достигнуто корректировкой эксплуатационных параметров на основе результатов математического моделирования параметров микроклимата помещения [2, 6-8], оборудованного системой регулирования микроклимата [6-9].

Использование численного моделирования позволит повысить эффективность работы системы регулирования микроклимата за счет моделирования различных режимов

управления (режим выходного дня, режим суточного регулирования, ночные режимы и пофасадное регулирование и т.д.) [6-9].

Для проведения численного исследования авторами был выбран программный код Code_Saturne [2]. Математический аппарат Code_Saturne позволяет моделировать гидродинамику и теплообмен энергетических установок [2], исследовать вынужденную и естественную конвекцию [10], теплоотдачу в каналах с неглубокими подковообразными лунками [11].

С учетом особенностей математического моделирования микроклимата жилых помещений исследование проводится в следующем порядке:

- 1) формулировка математической модели;
- 2) верификация сформулированной математической модели;
- 3) математическое моделирование микроклимата помещения, оснащенного системами управления теплопотреблением;
- 4) обобщенный анализ полученных результатов;
- 5) разработка решений по повышению эффективности работы систем управления микроклиматом (умный дом) на основе результатов математического моделирования.

2. Формулировка задачи

В работе проводилось численное исследование микроклимата жилого помещения. В качестве рабочей среды принят воздух с начальной температурой $T_0 = 20^\circ\text{C}$, начальным давлением $p_0 = 101325$ Па.

2.1 Математическая модель

Математическое моделирование систем обеспечения микроклимата и их элементов проводилось в Code_Saturne посредством RANS подхода.

Математическая модель состоит из уравнения сохранения массы (уравнение неразрывности), уравнения сохранения количества движения (Навье-Стокса), уравнения энергии. Уравнения используются в записи из монографии [12]:

$$\begin{aligned}\rho \frac{du}{dt} &= g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]; \\ \rho \frac{dv}{dt} &= g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]; \\ \rho \frac{dw}{dt} &= g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \text{div} \vec{V} \right) \right],\end{aligned}\quad (1)$$

где ρ – значение плотности; u, v, w – проекции вектора скорости потока соответственно на оси x, y, z ; t – время; g_x, g_y, g_z – проекции вектора внешней массовой силы на координатные оси; P – давление; μ – значение коэффициента динамической вязкости.

Поскольку в рассматриваемой задаче отсутствуют источники массы, уравнение неразрывности запишется в виде:

$$\frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0, \quad (2)$$

уравнение энергии:

$$\rho \frac{de}{dt} = -\text{div}(\underline{q''}) + \underline{q'''} - P \text{div}(\vec{V}) + S, \quad (3)$$

тогда диссипативную функцию S может быть описана выражением [2,12]:

$$S = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\}, \quad (4)$$

где e – внутренняя энергия; $\underline{q''}$ – вектор потока теплоты, равный $\underline{q''} = -\lambda \nabla T$ [2,12]; $\underline{q'''} = 0$ – тепловая мощность внутренних источников теплоты; λ – значение коэффициента теплопроводности; T – температура.

Поскольку в рассматриваемой задаче рабочим телом выступает воздух, то уравнение состояния выражается уравнением Менделеева-Клапейрона [12]:

$$\frac{P}{\rho} = \frac{R_m}{m_g} \cdot T, \quad (5)$$

здесь R_m – универсальная газовая постоянная; m_g – молекулярная масса.

Для замыкания системы дифференциальных уравнений применялась $k-\omega$ sst модель турбулентности [13]. Применение $k-\omega$ sst модель турбулентности проводилось с учетом опыта множества исследований [8-12].

Уравнения интегрировались по каждому контрольному объему Ω_i сетки [2], а численное решение было получено методом конечных объемов.

Численное решение было получено в программном комплексе Code_Saturne, имеющем интуитивно понятный графический интерфейс. Граничные условия в Code_Saturne могут быть заданы как условия Дирихле или Неймана. Численное решение получено итерационным методом. Для разрешения поля скорости применена схема второго порядка (SOLU), для поля давления – схема (Multigrid), так же, как в работах [10,11], для кинетической энергии турбулентности, ее диссипации и для поля температур использованы автоматические настройки, максимальное количество итераций по каждому циклу задано равным 10000, точность решателя (Solver Precision) принята 10^{-8} . Для получения связанного решения уравнений баланса импульса и неразрывности использован алгоритм SIMPLEC [10,11].

2.2 Верификация математической модели

Для верификации математической модели проводилось сравнение результатов математического моделирования с результатами, полученными другими авторами [6,14] по параметрам микроклимата тестового помещения.

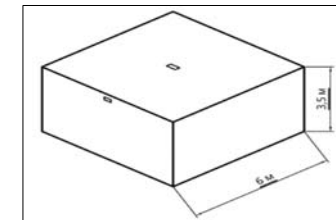


Рис. 1. Геометрия тестового помещения принятого для верификации математической модели

Fig. 1. Geometry of the room for verification of the mathematical model

Физическая постановка задачи верификации:

- помещение имеет размеры $6 \text{ м} \times 6 \text{ м} \times 3,5 \text{ м}$;
- в помещении установлены приточная и вытяжная решетка, для осуществления циркуляции воздуха;

- в помещении в определенных точках размещены 4 человека;
- общая сумма явных тепловыделений от людей составляет 300 Вт.

По имеющимся параметрам [6,14] была построена геометрия тестового помещения, представленная на рис. 1.

При помощи программного комплекса Salome, исходя из геометрии помещения, была создана неструктурированная расчетная сетка.

Для построения расчетной сетки в Salome использовались инструменты Tetrahedron (3D), Netgen 3D Parameters (диапазон размеров $0 \div 0.2$ м), Netgen 1D-2D, Netgen 2D Parameters (диапазон размеров $0 \div 0.2$ м). Полученная расчетная сетка представлена на рис. 2.

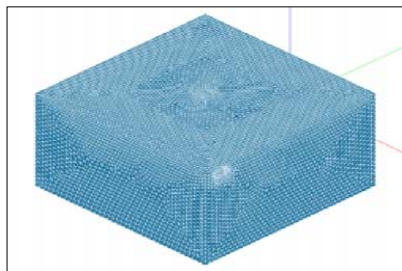


Рис. 2. Расчетная сетка для тестового помещения
Fig. 2. Calculation grid of the room

По результатам проведенного анализа сетки построенная расчетная сетка не имеет дефектов по ортогональности ячеек, по смещению центра, по градиенту наименьших объемов, по соотношению и т.д.

В качестве начальных условий моделирования приняты следующие теплофизические свойства рабочей среды (воздуха в помещении): плотность, $\rho = 1,2041 \text{ кг/м}^3$; молекулярная вязкость, $\mu = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$; изобарная теплоемкость, $c_p = 1005 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; теплопроводность, $\lambda = 0.0259 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

На рис. 3 показано поле температур помещения, использованное для верификации результатов математического моделирования, представленное в доступных источниках [6, 14].

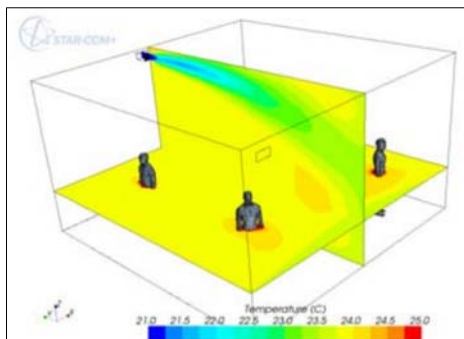


Рис. 3. Поле температур для тестового помещения из [6, 14]
Fig. 3. Temperature field of the test room from [6, 14]

Рис. 4 показывает поле температур помещения в вертикальном продольном сечении, полученное авторами при помощи СПО.

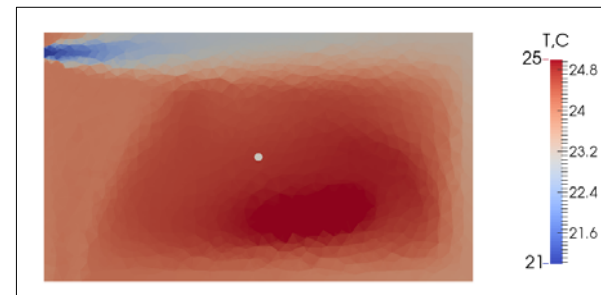


Рис. 4. Поле температур, полученное авторами, для тестового помещения в вертикальном продольном сечении
Fig. 4. The temperature field of the room in the vertical longitudinal section produced by the authors

Анализируя полученные данные, можно сказать, что температура воздуха в характерных точках вертикального продольного сечения составляет на входе 21°C , а вблизи человека 24.8°C .

При сравнении данные моделирования с результатами, полученными другими исследователями [6,14], видно, что их расхождение составляет $0,3^\circ\text{C}$ или в относительном выражении $1,2\%$.

На рис. 5 показано поле температур помещения в горизонтальном сечении. Люди расположены в соответствии с условиями [6,14].

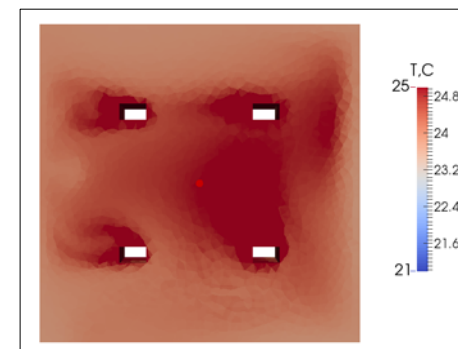


Рис. 5. Поле температур для тестового помещения в горизонтальном сечении, полученное авторами
Fig. 5. The temperature field of the room in horizontal section produced by the authors

Если сравнить значения температур в характерных точках (вблизи людей) с данными, полученными другими исследователями [6, 14], можно увидеть, что температура воздуха в этих точках у авторов получилась равной 24.8°C , а в исследовании [6, 14] принимала значение 25°C .

Таким образом, разность между значениями температур, полученными в расчете авторов и в исследованиях [6, 14] составляет $0,2^\circ\text{C}$ или в относительном выражении $0,8\%$.

Это говорит о том, что принятая математическая модель адекватна и метод исследования, реализованный с помощью программного кода Code_Saturne, можно использовать для численного исследования микроклимата помещения.

3. Математическое моделирование микроклимата жилого помещения с системой «умный дом»

При обеспечении комфортных условий в помещении снижение затрат тепловой энергии возможно при использовании результатов математического моделирования для прогнозирующего управления системами регулирования микроклимата [6-8, 15], например, «умный дом».

При этом возможно снизить затраты теплоты в некоторые периоды суток, когда потребитель не находится в зданиях общественного назначения или в ночное время в жилых зданиях без нарушения условий комфортности [16].

Физическая постановка задачи
Объект численного моделирования: жилое помещение площадью 130 м², находящееся на 5-м этаже 9-ти этажного дома, оконные проемы помещения выходят на южную и западную стороны света.

План объекта математического моделирования показан на рис. 6.

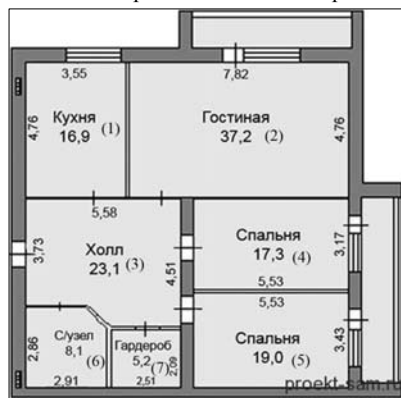


Рис. 6. План объекта математического моделирования

Fig. 6. Plan of the Residential space is an object of numerical simulation

3.2 Геометрия расчетной области и расчетная сетка

Геометрия расчетной области представлена на рис. 7.

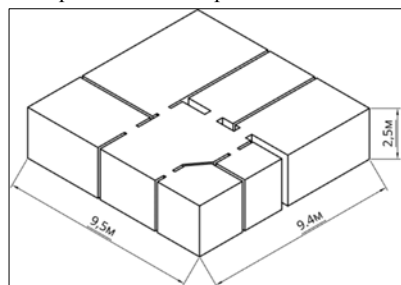


Рис. 7. Геометрия расчетной области
Fig. 7. The geometry of the estimated region

Расчетная сетка была создана при помощи программного комплекса Salome. Расчетная сетка не является структурированной и состоит из пирамидальных ячеек. Расчетная сетка показана на рис.8.

Для построения расчетной сетки применялись следующие инструменты: Tetrahedron (3D), Netgen 3D Parameters (диапазон размеров 0÷0.4 м), Netgen 1D-2D, Netgen 2D Parameters (диапазон размеров 0÷0.4 м)

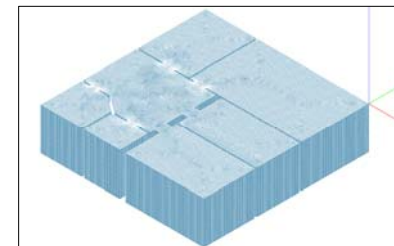


Рис. 8. Расчетная сетка
Fig. 8. Calculation grid

Проведенный анализ качества сетки с помощью встроенных инструментов программного кода Code_Saturne не выявил в ней дефектов.

3.3 Начальные и граничные условия

Начальные и граничные условия задавались в соответствии с физической постановкой задачи. Принимались следующие начальные условия:

- начальная температура среды – $T = 20$ °C;
- начальное давление – $p_0 = 101325$ Па.

Температура наружного воздуха бралась по наблюдениям в городе Самара и аппроксимировалась функцией:

$$T_n = -4 - 4,5 \sin\left(\left(\frac{t}{3600}\right) - 40\right), \quad (6)$$

t – время, с.

Выражение для определения температуры поверхности радиаторов при наличии системы управления получено преобразованием уравнения из работы [17] путем подстановки условий проектирования объекта:

$$T_3 = T_g + \Delta t' \frac{T_g - (T_n)^{0.8}}{\delta T} - 0,5 \theta \left(\frac{T_n}{\delta T} \right), \quad (7)$$

$\delta T = T_{но} - T_v$, $T_{но}$ – проектная температура наружного воздуха для систем отопления, °C, T_g – проектная температура воздуха в помещении, °C, θ – расчетный перепад температур в местной системе отопления, °C, $\Delta t'$ – температурный напор радиатора, °C.

Согласно физической постановке задачи граничные условия задавались следующим образом: на окнах, например для поверхностей со свойствами «окно 1» (Wall) задано отсутствие шероховатости и температура поверхности, равная минус 31°C, на выходе из помещения задана поверхность «Щель 1» (Outlet), на поверхностях радиаторов задавалась динамически изменяемая во времени температура поверхности «Радиатор 1» согласно уравнению (7), наружные стены заданы, как поверхности без шероховатости с отрицательным тепловым потоком в размере 31 Вт/м², задана поверхность «Змеевик» с положительным тепловым потоком в 80 Вт/м², на входе в помещение задавался объемный поток воздуха на единицу площади.

4. Результаты численного моделирования и их обсуждение

На рис. 9 показано поле температур жилого помещения, полученное с целью прогнозирующего управления системами регулирования микроклимата при сохранении условий комфортности.

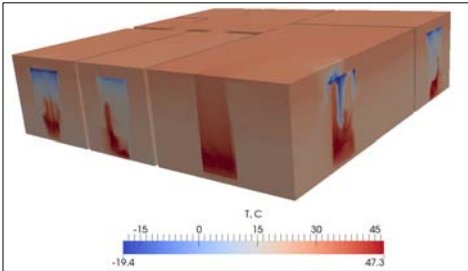


Рис. 9. Поле температур жилого помещения
Fig. 9. The temperature field of the residential space

Значения полученных температур по результатам моделирования представлены в табл. 1.

Табл. 1. Значения температур в жилом помещении
Table 1. Temperature in the residential space

Наименование помещений	Температура, полученная в результате моделирования	Температура согласно нормативных требований [16]
Кухня (1)	20,8 °C	19-21 °C
Гостиная (2)	21,2 °C	20-22 °C
Холл (3)	20,7 °C	19-21 °C
Спальня (4)	21,6 °C	20-22 °C
Спальня (5)	21,7 °C	20-22 °C
С/узел (6)	24,8 °C	24-26 °C
Гардероб (7)	19,6 °C	19-21 °C

Таким образом, математическое моделирование микроклимата позволяет применять прогнозирующее управление системами регулирования микроклимата без потери комфортности по температуре.

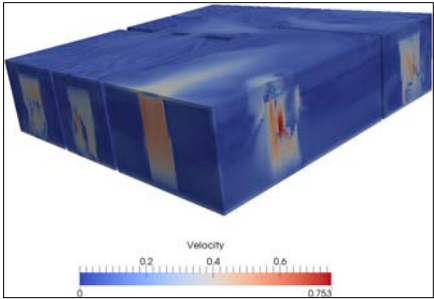


Рис. 10. Поле скоростей движения воздуха в жилом помещении
Fig. 10. The field of air velocity in the the residential space

Поля скоростей движения воздуха в жилом помещении показаны на рис. 10. Значения полученных скоростей движения воздуха по результатам моделирования представлены в табл. 2.

Табл. 2. Значения скоростей движения воздуха в жилом помещении
Table 2. Air velocity in the residential space

Наименование помещений	Скорость движения воздуха в жилом помещении, полученная в результате моделирования	Скорость движения воздуха в жилом помещении согласно нормативных требований [16]
Кухня (1)	0,13 м/с	0,15 м/с
Гостиная (2)	0,13 м/с	0,15 м/с
Холл (3)	0,14 м/с	0,15 м/с
Спальня (4)	0,12 м/с	0,15 м/с
Спальня (5)	0,12 м/с	0,15 м/с
С/узел (6)	0,15 м/с	0,15 м/с
Гардероб (7)	0,12 м/с	0,15 м/с

Таким образом, математическое моделирование показало, что применение систем регулирования параметров микроклимата позволяет без потери комфортности экономить около 118,75 Гкал за отопительный период от одного 9-ти этажного дома.

5. Заключение

В ходе данного исследование была выполнена математическая формулировка задачи для моделирования микроклимата жилого помещения с системами управления «умный дом». Численное моделирование микроклимата проведено с помощью программного кода Code_Saturne с открытым программным кодом. Проверка адекватности сформулированной математической модели осуществлена на базе сравнения результатов моделирования микроклимата тестового помещения, полученных авторами с результатами других исследователей. Выявлена адекватность сформулированной математической модели и использованных программных средств. В результате исследования выявлено, что математическое моделирование микроклимата позволяет применять прогнозирующее управление системами регулирования микроклимата без потери комфортности в помещении. Такой подход позволит экономить около 118,75 Гкал за отопительный период с одного 9-ти этажного жилого дома.

Список литературы / References

[1] Z. Zhang, H.-S. Dou et al. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer in Energy Science and Engineering. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2013, Article ID 241646, 3 p.

[2] Ю. Табунщиков, М. Бродач. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. Москва, АВOK-ПРЕСС, 2002 г., 194 стр. / Yu. Tabunshchikov, M. Brodach. Mathematical modeling and optimization of the thermal efficiency of buildings. Moscow, AVOK-PRESS, 2002, 194 p. (in Russian).

[3] Code-Saturne. Available at: <http://code-saturne.org>, accessed 05.09.2021.

[4] Open Foam. Available at: <http://www.openfoam.com/>, accessed 05.09.2021.

[5] I. Sultanguzin, H. Toepfer et al. Mathematical modeling and control system of nearly zero energy building. Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska, vol. 8, no. 2, 2018, pp. 21-24.

[6] Д.М. Денисихина. Оценка теплового комфорта в помещениях на основе анализа результатов математического моделирования. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, no. 3, 2015 г., стр. 183-193 / D.M. Denisikhina. Mathematical simulation of room climate parameters. Vestnik of Tomsk state university of architecture and building, no. 3, 2015, pp. 183-193 (In Russian).

[7] N. Fumo, P. Mago, and R. Luck, Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. Energy and Buildings, vol. 42, issue 12, 2010. pp. 2331-2337.

[8] X. Jiang, Z. Jing et al. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system. Energy, vol. 64, 2014. pp. 375-388.

- [9] S. Cho, M. Zaheer-uddin. Predictive control of intermittently operated radiant floor heating systems, Energy Conversion and Management, vol. 44, issue 8, 2003. pp. 1333-1342.
- [10] M. Nikitin. Modeling of natural convection. In Proc. of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, 2016, pp. 1-4.
- [11] А. Цынаева, С. Разоренов, В. Белая. Численное исследование теплоотдачи в каналах с неглубокими подковообразными лунками. Труды ИСП РАН, том 29, вып. 5, 2017 г., стр. 329-344 / А. Tsynaeva, S. Razorenov, V. Belaya. Numerical modeling of heat transfer of channel with shallow curly dimples. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 29, issue 5, 2017. pp. 329-344 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(5)-16.
- [12] Н. Ковальногов. Прикладная механика жидкости и газа. Ульяновск, Изд. УлГТУ, 2010 г., 219 стр. / N. Kovalnogov. Applied Mechanics of Liquid and Gas. Ulyanovsk, Ed. UISTU, 2010, 219 p. (in Russian).
- [13] F. Menter. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA Journal, vol. 32, № 8, 1994, pp. 1598-1605.
- [14] Д.М. Денисихина. Модель человека в задачах расчета распределенных параметров микроклимата в помещении. Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, no. 2, 2015 г., стр. 192-199 / D.M. Denisikhina. Human shapes for CFD simulation of thermal environment in rooms. News of the Kazan State University of Architecture and Engineering, no. 2, 2015, pp. 192-199 (in Russian).
- [15] D.Craft. Local energy management through mathematical modeling and optimization. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2004, 223 p.
- [16] ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях / GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures (in Russian).
- [17] Н. Ковальногов, А. Цынаева, Е. Цынаева. Способ выбора места установки регулирующего устройства в автоматизированных системах управления отоплением. Патент на изобретение RU 2340834 C1, 2008 г. / N. Kovalnogov, A. Tsynaeva, E. Tsynaeva. Method of control system placing in automated heat control systems. Patent for invention RU 2340834 C1, 2008 (in Russian).

Информация об авторах/ Information about authors

Анна Александровна ЦЫНАЕВА – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция». Сфера научных интересов: численное моделирование устройств и объектов теплоэнергетики и теплотехники.

Anna Alexandrovna TSYNAEVA – Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Associate Professor. She is Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. Research interests: numerical simulation of devices and objects of thermal power engineering and heat engineering, mathematical modeling and optimization

Екатерина Александровна ЦЫНАЕВА – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры физических методов в прикладных исследованиях Ульяновского государственного университета, доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» Самарского государственного технического университета. Сфера научных интересов: численное моделирование устройств и объектов теплоэнергетики и теплотехники.

Ekaterina Alexandrovna TSYNAEVA – Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Associate Professor. She is Associate Professor of the Department of Physical Methods in Applied Research of Ulyanovsk State University. She is Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation of Samara State Technical University. Research interests: numerical simulation of devices and objects of thermal power engineering and heat engineering, mathematical modeling and optimization