



УДК 697.92, 628.854

Бройда Владимир Аронович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: broida@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Дорофеев Николай Сергеевич

инженер-проектировщик

E-mail: ndorofeenko@yandex.ru

ООО «Производственное предприятие «ТехВент»

Адрес организации: 421001, Россия, г. Казань, ул. Нигматуллина, д. 1/47

Шарафеева Алина Робертовна

инженер-проектировщик

E-mail: shalinar977@mail.ru

ООО «Галакси Констракшн»

Адрес организации: 420107, Россия, г. Казань, ул. Петербургская, д. 65А

Численное исследование полей скоростей и температур воздуха в жилом помещении с учетом влияния естественного притока

Аннотация

Постановка задачи. Естественная вентиляция широко используется в жилых зданиях. Нерегулируемый естественный приток в холодный период года приводит к возрастанию расхода воздуха, что осложняет поддержание подвижности воздуха и температуры в помещении. В связи с этим изучение подвижности и температуры воздуха в помещении в зависимости от естественного притока является актуальным. Цель исследования – выявление влияния подачи возрастающего расхода холодного наружного воздуха на подвижность и температуру воздуха в жилом помещении. Оценка такого влияния выполнена на основе численного моделирования полей скорости и температуры.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в полученных численным моделированием полях скоростей и температур при двух вариантах расходов наружного холодного воздуха – нормативном и вдвое повышенном, встречающемся при отсутствии регулирования естественной вентиляции. Установлено, что как при нормативном, так и при повышенном расходе, несмотря на увеличение скорости движения воздуха и некотором возрастании отклонения температур, их нормативные пределы не превышаются.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что повышение расхода наружного воздуха вдвое не приводит к чрезмерному возрастанию подвижности воздуха, она остается ниже нормативного предела. Температура внутреннего воздуха также немного изменяется, но, при компенсации большего охлаждения помещения за счет повышения тепловой мощности отопительного прибора, также остается в рамках допустимых значений.

Ключевые слова: скорость движения воздуха, температура, расход, жилое помещение, естественный приток, численное моделирование.

Введение

Системы обеспечения микроклимата предназначены для создания благоприятных условий для человека и для реализации технологических процессов, требующих определенных качеств воздушной среды. От эффективности работы систем вентиляции зависит качество воздуха в помещениях. Недооценка влияния воздухообмена, который часто осуществляется средствами естественной вентиляции [1, 2], на состояние воздушной среды в помещениях квартир приводит к ухудшению самочувствия находящихся в них людей.

Производительность систем естественной вентиляции зависит от гравитационного давления, ее расчетная величина определяется при температуре наружного воздуха +5 °С. С понижением температуры наружного воздуха, гравитационное давление

увеличивается, что при отсутствии должного регулирования приводит к значительному возрастанию расхода приточного и удаляемого воздуха.

Современные направления изучения микроклимата и режимов работы систем вентиляции помещений включают экспериментальные исследования [3-5], применение математических методов [6-8] и методов численного моделирования воздушных потоков [9-11].

В жилых помещениях в холодный период года нормативными документами, (например, ГОСТ 30494-2011 Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата), устанавливаются значения температуры и подвижности воздуха. Кроме того, существенным фактором, влияющим на здоровье людей, является обеспечение нормативного воздухообмена – подача свежего наружного воздуха, и соответственно, удаление загрязненного воздуха. Как известно, самым простым и дешевым способом является устройство естественной вытяжной вентиляции, осуществляемой за счет гравитационного давления и силы ветра, существенным моментом в реализации которой, является способ ввода приточного воздуха в помещение [12].

Использование нерегулируемой или плохо регулируемой системы естественной вентиляции в холодный период года приводит к значительному перерасходу тепловой энергии на нагревание возрастающего расхода наружного воздуха, а также к проблемам с распределением возросшего расхода холодного воздуха, который может создавать повышенную подвижность и зоны пониженной температуры воздуха в помещении.

Цель исследования

Целью данного исследования является оценка влияния подачи возрастающего расхода холодного наружного воздуха на подвижность и температуру воздуха в жилом помещении, выполненная на основе численного моделирования полей скорости и температур. На основании результатов такого исследования можно сделать заключение о влиянии повышенного расхода приточного воздуха и, если требуется, предложить мероприятия для поддержания требуемых скоростей и температур для жилых помещений.

Основная часть

В качестве объекта для численного моделирования рассматривается жилая комната со следующими исходными данными:

– расчетная температура воздуха в помещении – $t_B=20^{\circ}\text{C}$, расчетная температура наружного воздуха (г. Москва) $t_H=-25^{\circ}\text{C}$;

– размеры помещения – $6\times 6\times 3$ м, имеется одна наружная стена и окно в ней, размеры окна – $1,8\times 1,8$ м;

– теплотехнические характеристики наружных ограждений определены в соответствии с действующими нормами теплозащиты (СП 50.13330.2012. Тепловая защита): сопротивление теплопередачи наружной стены $R_{CT}=1,98$ м²·C/Вт, сопротивление теплопередачи окна $R_{OK}=0,55$ м²·C/Вт;

– при указанных условиях потери тепла через наружную стену составляют $Q_{HC}=450$ Вт, через окно – $Q_{OK}=210$ Вт, суммарные теплопотери помещения – $Q_{ТП}=Q_{HC}+Q_{OK}=660$ Вт;

– расчетный расход вентиляционного воздуха, при норме подачи 3 м³/ч на 1 м² жилой площади, составляет около $L_{ВЕНТ}=100$ м³/ч, а затраты тепла на его нагревание – $Q_{ВЕНТ}=1740$ Вт;

– в качестве прибора отопления выбран секционный радиатор PRADO с температурами горячей и обратной воды 90/70°C, размер отопительного прибора – $1,4\times 0,5$ м, который компенсирует суммарные потери тепла помещения $Q_{П}=Q_{ТП}+Q_{ВЕНТ}=2400$ Вт.

Трехмерная схема рассматриваемого помещения представлена на рис. 1а. Реальная пространственная задача на данном этапе исследования заменяется более простой двухмерной (плоской) задачей, которая требует значительно меньше ресурсов машинного времени для осуществления численного решения.

Для этого рассчитываются эквивалентные размеры элементов помещения, с учетом того, что поперечный размер помещения $l=6$ м (рис. 1б).

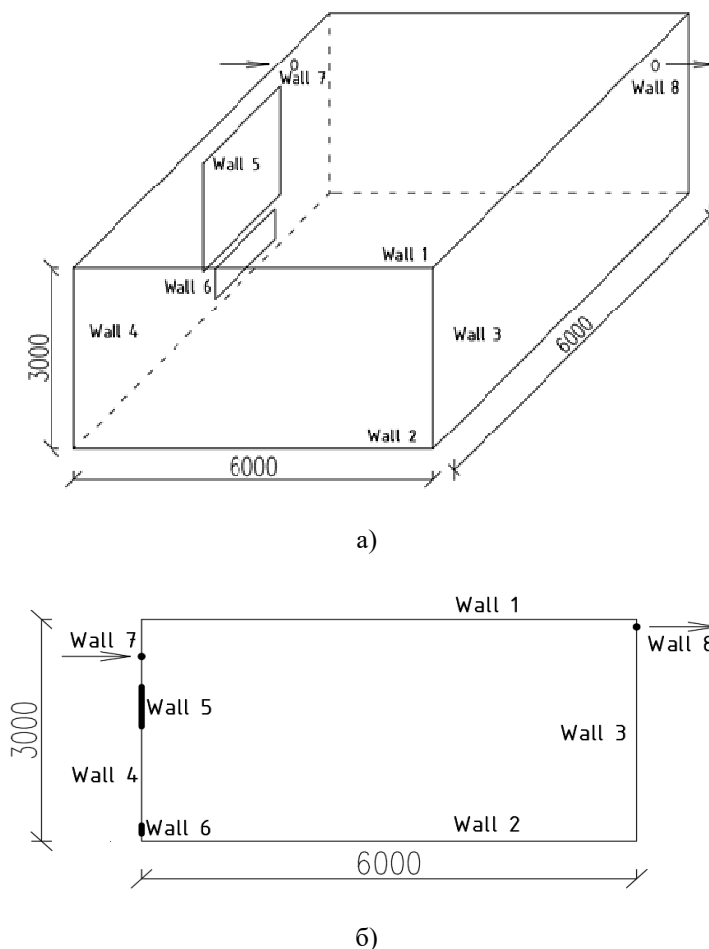


Рис. 1. Модель жилой комнаты (иллюстрация авторов):

а) трехмерная схема модели помещения; б) схема эквивалентной двухмерной модели

Высота окна:

$$h_{\text{ОК}} = F_{\text{ОК}}/l = (1,8 \cdot 1,8)/6 = 0,54 \text{ м.} \quad (1)$$

Площадь приточной и вытяжной решеток (приняты одинаковыми):

$$F_P = L_{\text{ВЕНТ}}/(3600 \cdot v) = 100/(3600 \cdot 0,8) = 0,034 \text{ м}^2. \quad (2)$$

Высота решеток для двухмерной задачи:

$$h_P = F_P/l = 0,034/6 = 0,0058 \text{ м.} \quad (3)$$

Площадь отопительного прибора:

$$F_{\text{ПРИБ}} = h \cdot l = 0,5 \cdot 1,4 = 0,7 \text{ м}^2. \quad (4)$$

Высота отопительного прибора:

$$h_{\text{ПРИБ}} = F_{\text{ПРИБ}}/l = 0,7/6 = 0,117 \text{ м.} \quad (5)$$

Решение задач находилось численным моделированием скоростных и температурных полей методом CFD, для этого применялись комплексы программ фирмы ANSYS: FLUENT и GAMBIT.

При численном моделировании используется стандартная k -epsilon модель турбулентности, которая относится к классу дифференциальных моделей с двумя уравнениями – в ней задействованы два дополнительных уравнения переноса для осредненных пульсационных характеристик, через которые выражается коэффициент турбулентной вязкости. Для того чтобы учесть изменение температуры потока воздуха, в моделирование включается уравнение энергии. При численном моделировании течений, в которых определенную роль играют термогравитационные силы, учитывается изменение плотности воздуха. В данном решении используется модель Буссинеска, которая описывает зависимость плотности воздуха от температуры. Также учитывается фактор гравитации – величина и направление ускорения свободного падения $g = -9,81 \text{ м/с}^2$.

Задаются граничные условия, соответствующие двумерной постановке задачи, и присваиваются следующие обозначения соответствующим геометрическим границам области течения (рис. 1б):

Wall 1 (потолок) – WALL (тип твердая стенка);

Wall 2 (пол) – WALL (тип твердая стенка);

Wall 3 (правая стенка) – WALL (тип твердая стенка);

Wall 4 (левая стенка) – WALL (тип твердая стенка);

Wall 5 (окно) – WALL (тип твердая стенка);

Wall 6 (радиатор) – WALL (тип твердая стенка);

Wall 7 (приток) – VELOCITY INLET (отверстие для втекания наружного воздуха в помещение);

Wall 8 (вытяжка) – PRESSURE OUTLET (отверстие для свободного выхода удаляемого воздуха в атмосферу);

Рассчитывается плотность теплового потока, проходящего через наружную стену помещения (Wall 4):

$$q_{CT}=450/(18-(1,8 \cdot 1,8)-(1,4 \cdot 0,5))=32 \text{ Вт/м}^2. \quad (6)$$

Аналогично, плотность теплового потока, проходящего через окно (Wall 5):

$$q_{OK}=210/(1,8 \cdot 1,8)=64,8 \text{ Вт/м}^2. \quad (7)$$

Указывается плотность теплового потока от отопительного прибора (Wall 6):

$$q_{ПРИБ}=2400/(1,4 \cdot 0,5)=3428,6 \text{ Вт/м}^2. \quad (8)$$

Потолок, пол и противоположная окну (правая) стена комнаты считаются адиабатическими. Полагается, что это внутренние ограждения, разность температур, действующая на эти ограждения, близка к нулю. В численном расчете на этих ограждениях тепловой поток равен нулю, ($Flux=0$).

На приточном отверстии (Wall 7) – VELOCITY INLET, задается расчетная скорость втекания, которая при заданном расходе воздуха составляет $v=0,8$ м/с и температура втекающего наружного воздуха $T_H=273+(-25)=248$ К.

Схождения процесса счета контролируются наблюдением за изменением величин невязок в ходе итерационного процесса. Невязка является мерой того, насколько хорошо текущее решение удовлетворяет дискретной форме основных уравнений. В задаче для всех уравнений устанавливается абсолютный критерий сходимости со значением 10^{-4} , кроме уравнений энергии и лучистого теплообмена, для них сохранено значение невязки, принятое в программе по умолчанию – 10^{-6} . После нахождения первого решения, ввиду крупности первоначальной сетки были выполнены ее измельчения – адаптации, что позволяет получить более точное решение. Процедура адаптации позволяет сократить время на построение качественной мелкой сетки, решение численной задачи и обработку результатов. Сетка измельчается вблизи поверхностей (левая и правая стенки, приточное отверстие, вытяжное отверстие, окно, отопительный прибор), тип примененных адаптаций – Boundary. Последовательно проводятся 10 адаптаций расчетной сетки.

В данной задаче наиболее показательной величиной, которая позволяет судить о сходимости результатов расчета, является средняя температура воздуха в вытяжном отверстии. Кроме того, контролируется безразмерный геометрический параметр Y^+ .

Результаты решения

Результаты расчетов для оценки сходимости последовательно 10 адаптаций типа Boundary представлены в таблице.

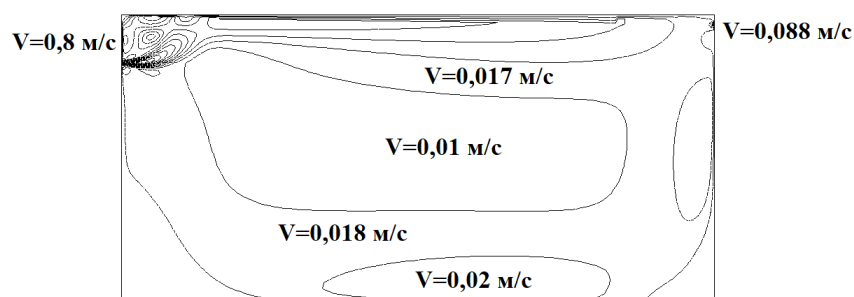
Целевое значение средней температуры воздуха в вытяжном отверстии составляет $t_{yD}=20$ °С или $T_{yD}=273+20=293$ К. В ходе последних адаптаций полученное значение величины T_{yD} практически не изменяется – $T_{yD}=292,9$ °С, следовательно, можно сделать вывод о том, что при 10 адаптациях решение сходится. Величина Y^+ уменьшается в ходе выполнения адаптаций и достигает в последней адаптации значения $Y^+=0,96$. Значения параметра $Y^+<1$, что говорит о достаточном измельчении сетки вблизи стенок и о достаточной точности решении задачи. Первоначальное количество расчетных ячеек – 7320, окончательное количество расчетных ячеек в двумерной задаче – 229863.

Таблица

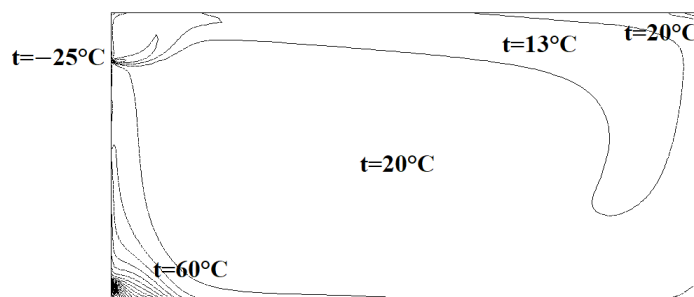
**Оценка сходимости результатов численного расчета
при использовании адаптаций типа Boundary**

Номер адаптации/ Число ячеек в слое (Number of Cells)	Температура (Total Temperature), K		Скорость (Velocity Magnitude), м/с		Безразмерный геометрический параметр (размер) Y+	
	Приток	Вытяжка	Приток	Вытяжка	Приток	Вытяжка
1/30	258,8	285,5	0,4	0,29	5,69	8,24
2/25	254,7	286,3	0,59	0,48	4,45	6,15
3/20	251,8	286,8	0,69	0,62	3,65	4,72
4/15	250	287,6	0,75	0,74	3,25	4,15
5/10	249,2	289,4	0,77	0,8	2,93	3,89
6/5	249	291,2	0,78	0,82	2,73	3,47
7/4	248,9	291,8	0,78	0,84	2,45	3
8/3	248,3	292,5	0,79	0,87	2,05	2,95
9/2	248	292,9	0,8	0,88	1,88	2,61
10/1	248	292,9	0,8	0,88	0,91	0,96

В результате численного моделирования рассчитаны поля скоростей и температур, представленные на рис. 2.



а)



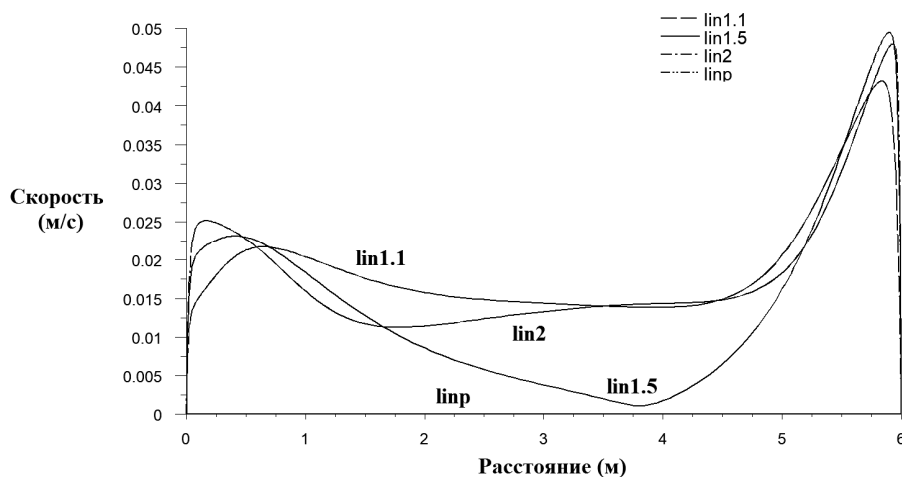
б)

Рис. 2. Расчетные поля скоростей (а) и температур (б) в поперечном сечении помещения (иллюстрация авторов)

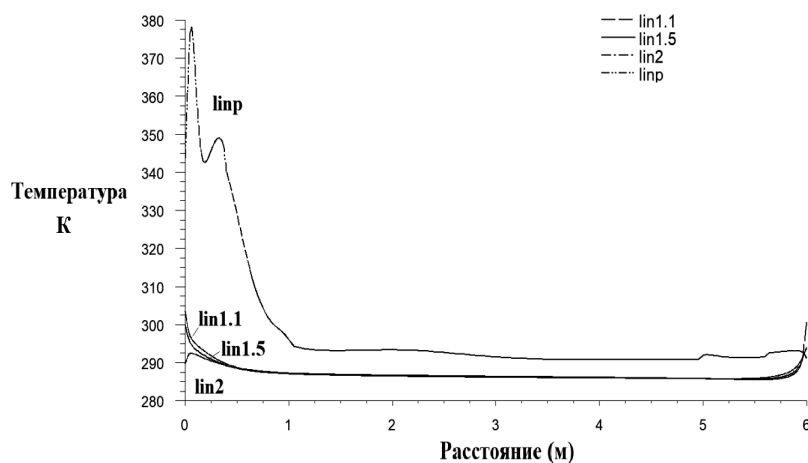
Кроме того, рассчитаны величины скоростей движения воздуха и температур на разных уровнях по высоте помещения: над уровнем пола (linp); на уровне 1,1 м (lin1.1); на уровне 1,5 м (lin1.5); на уровне 2 м (lin2). Эти данные расчета представлены на рис. 3.

Из анализа данных, представленных на рис. 2-3, можно сделать следующие выводы.

Максимальные скорости воздуха наблюдаются в зоне приточного и вытяжного отверстий. На графике (рис. 2а) хорошо заметны очертания приточной струи холодного воздуха, которая настигает на потолок помещения. В центре объема помещения хорошо видны циркуляционные зоны с небольшими скоростями воздуха порядка 0,01-0,02 м/с.



а)



б)

Рис. 3. Расчетные поля скоростей (а) и температур (б) на нескольких уровнях над полом помещения (иллюстрация авторов)

Из графиков распределения скорости (рис. 3а) видно, что скорости движения воздуха, вызываемые притоком, в плоской постановке задачи очень невелики, нигде не превышают 0,1 м/с, особенно малые скорости на высоте 1,5 м на расстоянии около 4 метров от наружной стены. Скорости возрастают с приближением к стене, противоположной приточному отверстию.

Вблизи приточного отверстия, откуда поступает холодный наружный воздух, температура понижена – -6°C . В зоне действия приточной струи температура остается сниженной, порядка 13°C . Вблизи расположения отопительного прибора температура достаточно высокая, около 60°C , а в центральной части объема помещения температура распределяется достаточно равномерно и практически близка 20°C , что соответствует заданной нормативной величине. Расчеты температуры воздуха на указанных уровнях также свидетельствуют о ее достаточно равномерном распределении по большей части помещения, повышенная температура наблюдается в зоне расположения отопительного прибора, что вполне логично.

При нерегулируемом режиме естественной вентиляции с понижением температуры наружного воздуха до $-25^{\circ}\text{C} \div -30^{\circ}\text{C}$ расход воздуха возрастает приблизительно вдвое. Второй вариант численного моделирования был выполнен при увеличенном вдвое расходе холодного наружного воздуха. При этом соответственно, была увеличена теплоотдача отопительного прибора. Геометрические и теплозащитные характеристики

помещения оставались неизменными. Рассчитанные при этих условиях поля скорости движения воздуха и температуры в помещении представлены на рис. 4.

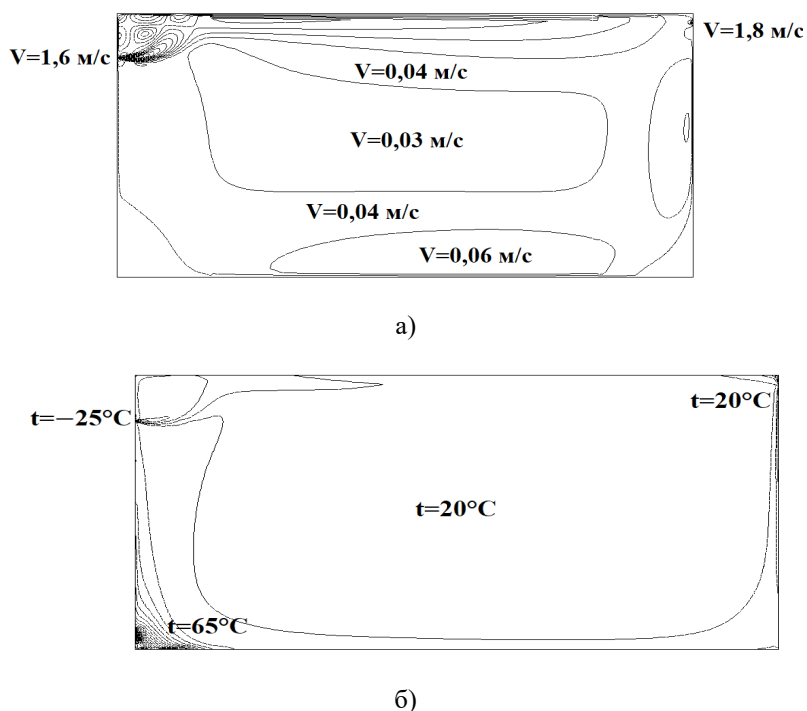


Рис. 4. Расчетные поля скоростей (а) и температур (б) в поперечном сечении помещения при вдвое увеличенном расходе холодного наружного воздуха (иллюстрация авторов)

В этом случае в центральной зоне помещения скорость движения воздуха несколько выше и составляет и приблизительно 0,03-0,04 м/с, а на уровне пола – 0,06 м/с, что также не превышает нормируемого значения. Максимальное значение температуры воздуха также наблюдается в зоне расположения отопительного прибора и достигает $t=65^{\circ}\text{C}$. В центральной зоне помещения величина температуры воздуха приблизительно равна ожидаемому значению 20°C . В целом поля скоростей и температур близки к рассмотренным ранее. Таким образом, повышение расхода холодного приточного воздуха в указанных пределах, при условии соответствующего повышения теплоотдачи отопительного прибора, не приводит к существенному изменению полей скоростей и температур и не требует заметной коррекции способа подачи приточного воздуха.

Заключение

Из представленных материалов следует, что полученные результаты численного моделирования не противоречивы. Численное моделирование, выполненное в двухмерной постановке задачи, дает верное качественное представление о развитии течения и формировании поля температур в помещении.

Количественно полученные значения скорости и температуры воздуха в помещении отвечают нормам.

Сравнивая два рассмотренных варианта решения, можно отметить, что повышение расхода холодного приточного воздуха вдвое, при условии соответствующего повышения мощности отопительного прибора, не приводит к превышению нормативных значений скорости движения воздуха в рабочей зоне помещения. Поле температур внутреннего воздуха также приблизительно сохраняется. Следовательно, дополнительных мероприятий по совершенствованию подачи наружного воздуха в этих условиях не требуется.

Результаты двухмерного моделирования можно рассматривать как качественные и несколько приближенные. В дальнейшем планируется провести подобное исследование в более полной трехмерной, приближенной к реальности, постановке.

Список библиографических ссылок

1. Жилина Т. С., Вяткина С. Д., Вяткина Ю. С. Эффективность работы систем естественной вентиляции в жилых зданиях // *Фундаментальные исследования*. 2017. № 7. С. 25–29.
2. Жилина Т. С. Влияние работы систем естественной вентиляции на микроклимат помещений в жилых зданиях // *Международный научный журнал «Молодой ученый»*. 2016. № 8 (112). С. 214–218.
3. Guan Y., Li A., Zhang Y., Jiang, C., Wang Q. Experimental and numerical investigation on the distribution characteristics of wind pressure coefficient of airflow around enclosed and open-window buildings // *Building Simulation*. 2016. № 9. P. 551–568.
4. Wang J., Wang S., Zhang T., Battaglia F. Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations // *Energy and Buildings*. 2017. № 139. P. 762–779.
5. Pan W., Liu S., Li S., Cheng X., Zhang H., Long Z., Zhang T., Chen Q. A model for calculating single-sided natural ventilation rate in an urban residential apartment // *Building and Environment*. 2019. 147. P. 372–381.
6. Симбирев О. В., Жилина Т. С. Анализ процессов движения воздуха и его параметров в системах естественной вентиляции при помощи математического моделирования // *Вестник ИШ ДВФУ*. 2018. № 3. С. 112–117.
7. Дячек П. И., Макаревич С. А., Захаревич А. Э., Ливанский Д. Г. Математические методы в отоплении, вентиляции и кондиционировании воздуха // *Вестник МГСУ*. 2011. Вып. 7. С. 143–147.
8. Maklakov D. V., Posohin V. N., Safiullin R. G., Kareeva J. R. Intake rate through openings in the side wall of the duct // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 94 (2). P. 65–80. DOI: 10.18720/MCE.94.6.
9. Денисихина Д. М. Особенности численного моделирования поведения воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов // *Науковедение*. 2014. № 3 (22). С. 8–10.
10. Liu S., Pan W., Cao Q., Long Z., Jiang Y., Chen Q. CFD simulations of natural cross ventilation through an apartment with modified hourly wind information from a meteorological station // *Energy and Buildings*. 2019. № 195. P. 16–25.
11. Liu S., Pan W., Lin X., Qing K., Zhang W., Long Z., Chen Q. CFD Simulations of Cross Natural Ventilation through an Apartment with Modified Inflow Boundary Conditions // *Proceedings of the 16th IBPSA Conference / Rome, Italy, Sept. 2-4, 2019*. P. 3794–3801.
12. Кривошеин А. Д. Прогнозирование работы систем естественной вентиляции жилых зданий с организованным притоком воздуха // *Известия вузов. Строительство*. 2011. № 4. С. 43–52.

Broyda Vladimir Aronovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: broida@mail.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Dorofeenko Nikolay Sergeevich

design engineer

E-mail: ndorofeenko@yandex.ru**LLC «Production Enterprise «TechVent»**

The organization address: 421001, Russia, Kazan, Nigmatullina st., 1/47

Sharafeeva Alina Robertovna

design engineer

E-mail: shalinar977@mail.ru**LLC «Galaxy Construction»**

The organization address: 420107, Russia, Kazan, Petersburg st., 65A

Numerical study of the fields of air velocity and temperature in a residential building, taking into account the influence of the natural influx

Abstract

Problem statement. Natural ventilation is widely used in residential buildings. The unregulated natural influx in the cold season leads to an increase in airflow, which complicates the maintenance of mobility and air temperature in the room. In this regard, the study of the mobility and temperature of the air in the room, depending on the natural flow, is relevant. The purpose of the study is to identify the effect of the supply of increasing consumption of cold outdoor air on the mobility and temperature of the air in the living room. Evaluation of this effect is based on numerical simulation of the velocity and temperature fields.

Results. The main results of the study are obtained by numerical simulation of the velocity and temperature fields at two external cold airflow rates, standard and twice as high, which occurs in the absence of regulation of natural ventilation. It was established that both at the normative and increased flow rate, despite the increase in the air velocity and a slight increase in temperature deviation, their normative limits are not exceeded.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry lies in the fact that a doubling of the outdoor airflow does not lead to an excessive increase in air mobility, it remains below the normative limit. The temperatures of the internal air also vary slightly, but when compensating for greater cooling of the room due to an increase in the heat output of the heater, they also remain within the acceptable values.

Keywords: air speed, temperature, flow rate, living quarters, natural influx, numerical modelling.

References

1. Zhilina T. S., Vyatkina S. D., Vyatkina Yu. S. Efficiency of natural ventilation systems in residential buildings // *Fundamentalnyye issledovaniya*. 2017. № 7. P. 25–29.
2. Zhilina T. S. The effect of natural ventilation systems on the microclimate of premises in residential buildings // *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Molodoy uchenyy»*. 2016. № 8 (112). P. 214–218.
3. Guan Y., Li A., Zhang Y., Jiang C., Wang Q. Experimental and numerical investigation on the distribution characteristics of wind pressure coefficient of airflow around enclosed and open-window buildings // *Building Simulation*. 2016. № 9. P. 551–568.
4. Wang J., Wang S., Zhang T., Battaglia F. Assessment of single-sided natural ventilation driven by buoyancy forces through variable window configurations // *Energy and Buildings*. 2017. № 139. P. 762–779.
5. Pan W., Liu S., Li S., Cheng X., Zhang H., Long Z., Zhang T., Chen Q. A model for calculating single-sided natural ventilation rate in an urban residential apartment // *Building and Environment*. 2019. № 147. P. 372–381.
6. Symbirev O. V., Zhilina T. S. Analysis of the processes of air movement and its parameters in natural ventilation systems using mathematical modelling // *Vestnik ISH DVFU*. 2018. № 3. P. 112–117.
7. Dyachek P. I., Makarevich S. A., Zakharevich A. E., Livansky D. G. Mathematical methods in heating, ventilation and air conditioning // *Vestnik MGSU*. 2011. V. 7. P. 143–147.
8. Maklakov, D.V., Posohin, V.N., Safiullin, R.G., Kareeva, J.R. Intake rate through openings in the side wall of the duct // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 94 (2). P. 65–80. DOI: 10.18720/MCE.94.6.
9. Denisikhina D. M. Features of numerical modelling of the behaviour of air flows in the volumes of concert and theater halls // *Naukovedeniye*. 2014. № 3 (22). P. 8–10.
10. Liu S., Pan W., Cao Q., Long Z., Jiang Y., Chen Q. CFD simulations of natural cross ventilation through an apartment with modified hourly wind information from a meteorological station // *Energy and Buildings*. 2019. № 195. P. 16–25.
11. Liu S., Pan W., Lin X., Qing K., Zhang W., Long Z., Chen Q. CFD Simulations of Cross Natural Ventilation through an Apartment with Modified Inflow Boundary Conditions // *Proceedings of the 16th IBPSA Conference / Rome, Italy, Sept. 2-4. 2019*. P. 3794–3801.
12. Krivoshein A. D. Forecasting the operation of natural ventilation systems of residential buildings with organized airflow // *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. 2011. № 4. P. 43–52.