

Численное исследование воздухораспределения в помещениях квартир при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов

Николай Николаевич Монаркин¹, Виктор Александрович Яковлев²,
Татьяна Владимировна Монаркина¹

¹ Вологодский государственный университет (ВоГУ); г. Вологда, Россия;

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ); г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В гражданских зданиях существуют проблемы вентиляции, связанные с нарушением требуемого воздухообмена и высокими потерями теплоты. Одним из решений таких проблем является применение децентрализованных компактных реверсивных вентиляционных устройств с функцией утилизации теплоты вытяжного воздуха. К подобным устройствам относятся стационарные переключающиеся регенеративные теплоутилизаторы (СПРТ). Они дают высокую степень энергосбережения при небольших расходах воздуха. При применении СПРТ важен вопрос эффективности воздухообмена и воздухораспределения в помещении. Проведено исследование по оценке подвижности воздуха в помещениях типовых квартир при использовании данных устройств при различных характерных расходах воздуха.

Материалы и методы. Применен метод вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование) работы механической приточно-вытяжной вентиляции на основе компактного регенератора в двухкомнатной квартире. Для моделирования использован программный комплекс Ansys Fluent. Рассмотрена изотермическая постановка задачи. Модель турбулентности принята $k-\omega$ ($k-\omega$).

Результаты. Приведены поля распределения скорости движения воздуха в плане помещений на различной высоте при различных характерных расходах воздуха. Показаны увеличение подвижности воздуха в помещениях при увеличении производительности вентиляции; совместное действие механической децентрализованной вентиляции и естественной централизованной вытяжной вентиляции жилых зданий.

Выводы. По результатам моделирования определено, что при применении вентиляционных устройств типа СПРТ возможно обеспечение требуемой подвижности воздуха в помещениях, что способствует эффективному воздухообмену. Выявлено, что допустимая подвижность воздуха в помещениях устанавливается для расходов воздуха в диапазоне 50–100 м³/ч. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании механических систем вентиляции жилых многоквартирных зданий на основе компактных установок типа СПРТ, а также при сочетании естественной и механической вентиляции. В дальнейшем необходимо провести исследование воздухораспределения для других видов и типов квартир, что позволит расширить базу данных для выработки рекомендаций и создания методики проектирования систем вентиляции на основе компактных реверсивных устройств. Также требуется подтверждение моделирования экспериментом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СПРТ, теплоутилизатор, подвижность воздуха, воздухораспределение, воздухообмен, реверсивная вентиляция, скорость движения

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00080 (URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00080/>). Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Монаркин Н.Н., Яковлев В.А., Монаркина Т.В. Численное исследование воздухораспределения в помещениях квартир при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 2. С. 246–256. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.246-256

Автор, ответственный за переписку: Николай Николаевич Монаркин, nikolay-monarkin@yandex.ru.

Numerical study of air distribution in apartment premises using compact regenerative heat exchangers

Nikolay N. Monarkin¹, Viktor A. Iakovlev², Tat'yana V. Monarkina¹

¹ Vologda State University; Vologda, Russian Federation;

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU);
St. Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Civil buildings have ventilation problems associated with inadequate air exchange and high heat loss. One solution to these problems is the use of decentralized compact reversible ventilation units with an exhaust air heat recovery function. They are called stationary switching regenerative heat exchangers (SSRHE). SSRHE provide a high degree of energy saving with low air flows. When using SSRHE, the issue of the effectiveness of air exchange and air distribution in the room is important. Therefore, a study was conducted to assess the mobility of air in the premises of typical apartments when using such devices at various characteristic air flow rates.

Materials and methods. The CFD method of modelling the operation of mechanical supply and exhaust ventilation based on a compact regenerator in a two-room apartment is applied. The Ansys Fluent software package was used for modelling. The isothermal formulation of the problem is considered. The turbulence model is adopted by k - ω (k - ω).

Results. The distribution fields of air velocity in the plan of rooms at different heights with different characteristic air flow rates are presented. An increase in indoor air mobility is shown with an increase in ventilation performance. The combined effect of mechanical decentralized ventilation and natural centralized exhaust ventilation of residential buildings is shown.

Conclusions. Based on the simulation results, it was determined that when using ventilation devices of the SSRHE type, it is possible to ensure the required air mobility in the premises, which contributes to effective air exchange. It is determined that the permissible indoor air mobility is set for air flow rates in the range of 50–100 m³/h. The results of the study can be used in the design of mechanical ventilation systems for residential multi-apartment buildings based on compact SSRHE-type installations, as well as in the combination of natural and mechanical ventilation. In the future, it is necessary to conduct a study of air distribution for other types of apartments, which will expand the database to develop recommendations and create a methodology for designing ventilation systems based on compact reversible devices. Experimental confirmation of the simulation is also required.

KEYWORDS: SSRHE, heat exchanger, air distribution, reversible ventilation, air velocity

Acknowledgements. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 22-79-00080 (URL: <https://rscf.ru/project/22-79-00080/>). The authors express gratitude to anonymous reviewers.

FOR CITATION: Monarkin N.N., Iakovlev V.A., Monarkina T.V. Numerical study of air distribution in apartment premises using compact regenerative heat exchangers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(2): 246-256. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.2.246-256 (rus.).

Corresponding author: Nikolay N. Monarkin, nikolay-monarkin@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В жилых зданиях на территории России и многих других стран в подавляющем большинстве применяются естественные системы вентиляции квартир [1]. Это вызвано, в первую очередь, простотой их конструкции и низкими затратами на создание и эксплуатацию [2].

Однако системы естественной вентиляции имеют ряд недостатков, к которым относятся [3]:

- неустойчивая работа, сопряженная с прямой зависимостью качества проветривания от параметров наружного воздуха;
- сложность регулирования производительности;
- сложность или невозможность нагрева приточного воздуха, его очистки и прочей обработки;
- сложность или невозможность утилизации теплоты вытяжного воздуха.

Исходя из вышеуказанных недостатков, в жилых зданиях существуют проблемы, связанные с нарушением микроклимата из-за некачественной вентиляции, а также вызванные высокими потерями тепловой энергии с вентиляционными выбросами.

Одним из решений указанных проблем может быть применение компактных вентиляционных устройств с функцией утилизации теплоты вытяжного воздуха. Такие компактные устройства обладают устойчивостью, как механические системы, не требуют большого пространства для размещения, имеют низкое энергопотребление, а также способны утилизировать теплоту вытяжного воздуха. Наиболее энергетически эффективными являются устройства,

основанные на принципе действия регенеративного теплообменного аппарата, поэтому их, в том числе, называют регенераторами или более емко стационарными переключающимися регенеративными теплоутилизаторами (СПРТ) [4, 5]. Подобные регенераторы способны возвращать в помещение до 90 % тепловой энергии, теряемой с вентиляционными выбросами, при этом затраты на их установку и использование в разы ниже по сравнению с центральными системами вентиляции [6]. Такие устройства позволяют создавать устойчивую вентиляцию помещений с возможностью регулирования производительности и утилизации теплоты вытяжного воздуха. Также они дают возможность осуществлять очистку приточного воздуха как от крупных пылевых частиц, так и от микроскопических частиц путем применения фильтров высокой эффективности.

Кроме того, применение СПРТ дает неявный социальный эффект, заключающийся в профилактике несчастных случаев выпадения детей из окон высотных зданий, так как использование таких устройств исключает необходимость открытия окон для проветривания помещений.

Учитывая низкую производительность (до 100 м³/ч) СПРТ, возникает вопрос эффективности воздухообмена и воздухораспределения при их применении, т.е. насколько эффективно приточный воздух растворяется во внутреннем, достаточна ли подвижность воздуха, присутствуют ли в помещении застойные зоны и т.д.

С точки зрения ассимиляции вредных веществ эффективность работы СПРТ доказана эксперимен-

тально в работе [7], где показано снижение уровня концентрации углекислого газа до допустимых значений для различных конфигураций использования СПРТ. Это позволяет сделать вывод о том, что при применении СПРТ приточный воздух эффективно перемешивается во внутреннем воздухе помещения, неся ассимилирующую функцию.

Однако вопрос обеспечения достаточной подвижности воздуха при использовании СПРТ остается открытым. На подвижность воздуха в помещении влияют вертикальные конвективные потоки от нагретых поверхностей, вентиляционные струи, движение и дыхание человека и т.д. Высокая скорость движения воздуха в помещении вызывает негативный эффект сквозняка, а неподвижный воздух создает вокруг человека оболочку из перегретого и насыщенного водяными парами воздуха, что также оказывает негативное влияние. К тому же малоподвижный воздух способствует накоплению и локализации вредных веществ в отдельных частях объема помещения, в том числе повышенному уровню углекислоты вокруг человека. Для жилых комнат согласно ГОСТ 30494–2011¹ скорость движения воздуха для холодного периода ограничивается значением 0,15 м/с по оптимальной норме и 0,2 м/с по допустимой, для теплого периода указаны значения 0,2 и 0,3 м/с соответственно.

Экспериментально определять скорость движения воздуха во множестве точек внутреннего объема помещений сложно и трудоемко, поэтому для оценки применяется метод вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование). Точное и эффективное моделирование воздушного потока способствует обеспечению теплового комфорта и качества воздуха в помещении. CFD-моделирование широко используется для визуализации воздушных потоков в жилых зданиях, примерами служат работы коллег из Китая [8–10], Европы [11, 12], России [13, 14]. Однако моделирование воздушораспределения в типовых российских квартирах для малопроизводительной механической вентиляции в существующих работах не рассматривается.

Цель исследования — оценка подвижности воздуха в помещениях типовых квартир при использовании компактных вентиляционных устройств типа СПРТ при различных характерных расходах воздуха.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применен метод CFD-моделирования работы механической приточно-вытяжной вентиляции на основе компактного регенератора в двухкомнатной квартире. CFD-моделирование состоит из следующих основных этапов:

- создание геометрической модели;

¹ ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. URL: https://www.abok.ru/for_spec/norm_doc/norm/gost30494.pdf

- формирование сетки — разбиение модели на мелкие ячейки (сетки), что обеспечивает точность расчетов;

- задание граничных условий — установка входных и выходных потоков, температурных и тепловых условий;

- решение уравнений — численный расчет уравнений Навье – Стокса для определения потоков и температур;

- анализ результатов — визуализация распределения воздуха в геометрии модели.

Рассматривается геометрия типовой двухкомнатной квартиры в многоквартирном здании (рис. 1).

Размеры и площади помещений для выбранной конфигурации квартиры приведены на рис. 2. Приточно-вытяжные устройства типа СПРТ располагаются в наружной стене сбоку от окна на высоте 2,3 м от пола. Такое расположение характерно для исследуемых устройств, а именно предполагает размещение притока на уровне или выше роста человека для снижения эффекта сквозняка.

Также, согласно геометрии на кухне, в туалете и ванной комнате предполагается наличие естественной вытяжной вентиляции, характерной для квартир в многоэтажных зданиях.

Моделирование осуществляется с помощью программного комплекса Ansys Fluent. Применяемые методы и настройки представлены в таблице [15–20].

Расход воздуха при моделировании принимался в соответствии с рекомендуемым минимальным расходом наружного воздуха на одного человека для жилых помещений согласно СП 60.13330.2020². Принято минимальное значение для помещений с естественным проветриванием 30 м³/ч, которое затемкратно увеличивалось. Воздухообмен, равный 30 м³/ч, соответствует нахождению одного человека в помещении, 60 м³/ч — двум людям и т.д. Согласно Жилищному кодексу РФ³, средняя норма площади на человека в квартире зависит от региона, вида жилья и статуса претендента и составляет 15–18 м². Учитывая это, можно принять, что двухкомнатные квартиры рассчитаны на 2–3 жильцов.

Так как СПРТ имеет переключающийся режим работы, необходимо понимать, что общий воздухообмен, м³/ч, при использовании одного устройства будет составлять половину от производительности притока или вытяжки при условии их равенства. В случае применения двух СПРТ с одинаковой производительностью, которые будут работать в противофазе, общий воздухообмен будет равен расходу одного устройства.

² СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.

³ Жилищный кодекс Российской Федерации. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51057/

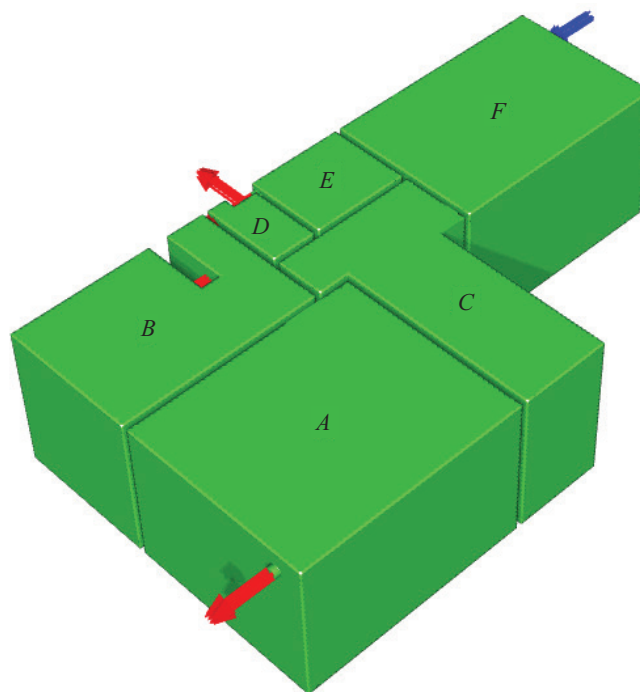


Рис. 1. Геометрия исследуемой квартиры: *A* — первая жилая комната; *B* — кухня; *C* — прихожая (коридор); *D* — туалет; *E* — ванная комната; *F* — вторая жилая комната

Fig. 1. Geometry of the apartment: *A* — first living room; *B* — kitchen; *C* — entrance hall (corridor); *D* — toilet; *E* — bathroom; *F* — second living room

При моделировании приняты следующие допущения:

- используется изотермическая постановка задачи;
- перепадом давлений между наружной и внутренней средой пренебрегаем;
- прочие приточные и вытяжные потоки воздуха отсутствуют;
- наличием мебели и прочих бытовых предметов пренебрегаем.

Использование изотермической постановки задачи объясняется тем, что СПРТ за счет высокой энергетической эффективности в холодный период нагревает приточный воздух до температуры, близкой к температуре внутреннего воздуха, а в теплый период аналогично охлаждает приточный воздух [4]. То есть регенератор практически полностью сглаживает влияние температуры наружной среды на температуру помещения, что сводит влияние неизоотермичности приточной струи к минимуму и позволяет пренебрегать этим в расчетах.

Перепад давлений между наружной и внутренней средой в реальности оказывает влияние на производительность СПРТ и их энергетическую эффективность вследствие нарушения баланса между притоком и вытяжкой. Воздействие естественной вентиляции зависит от этажа, на котором располагается квартира. Чем ниже этаж, тем сильнее влияние естественной тяги, увеличивающей производительность СПРТ. И наоборот, на верхних этажах возмож-

на картина опрокидывания естественной системы. Согласно исследованию [21], несбалансированные режимы работы регенераторов, на которые влияет естественная вентиляция, приводят к низкой тепловой эффективности, различным скоростям воздухообмена на разных этажах здания и не могут быть проигнорированы в многоэтажных зданиях. Для решения этой проблемы следует выбирать новые системы управления и компоненты для такого типа децентрализованных устройств. Например, в труде [22] благодаря специальной стратегии управления работой СПРТ были сбалансированы этапы работы устройства, при этом эффективность рекуперации теплоты увеличилась более чем на 10 % по сравнению со стандартным режимом функционирования.

Дополнительными приточными и вытяжными потоками воздуха в реальной квартире могут быть потоки через окна и входные двери. Такие потоки могут оказывать влияние на воздухообмен и эффективность работы СПРТ. Однако применение СПРТ исключает необходимость проветривания помещений через окна. Кроме того, современные оконные и дверные конструкции имеют высокую герметичность, что позволяет также пренебречь фактором прочих воздушных потоков.

Учет в помещениях мебели и бытовых предметов значительно усложняет моделирование воздухораспределения по нескольким причинам:

- усложнение геометрии: мебель, бытовая техника и предметы интерьера создают множество пре-

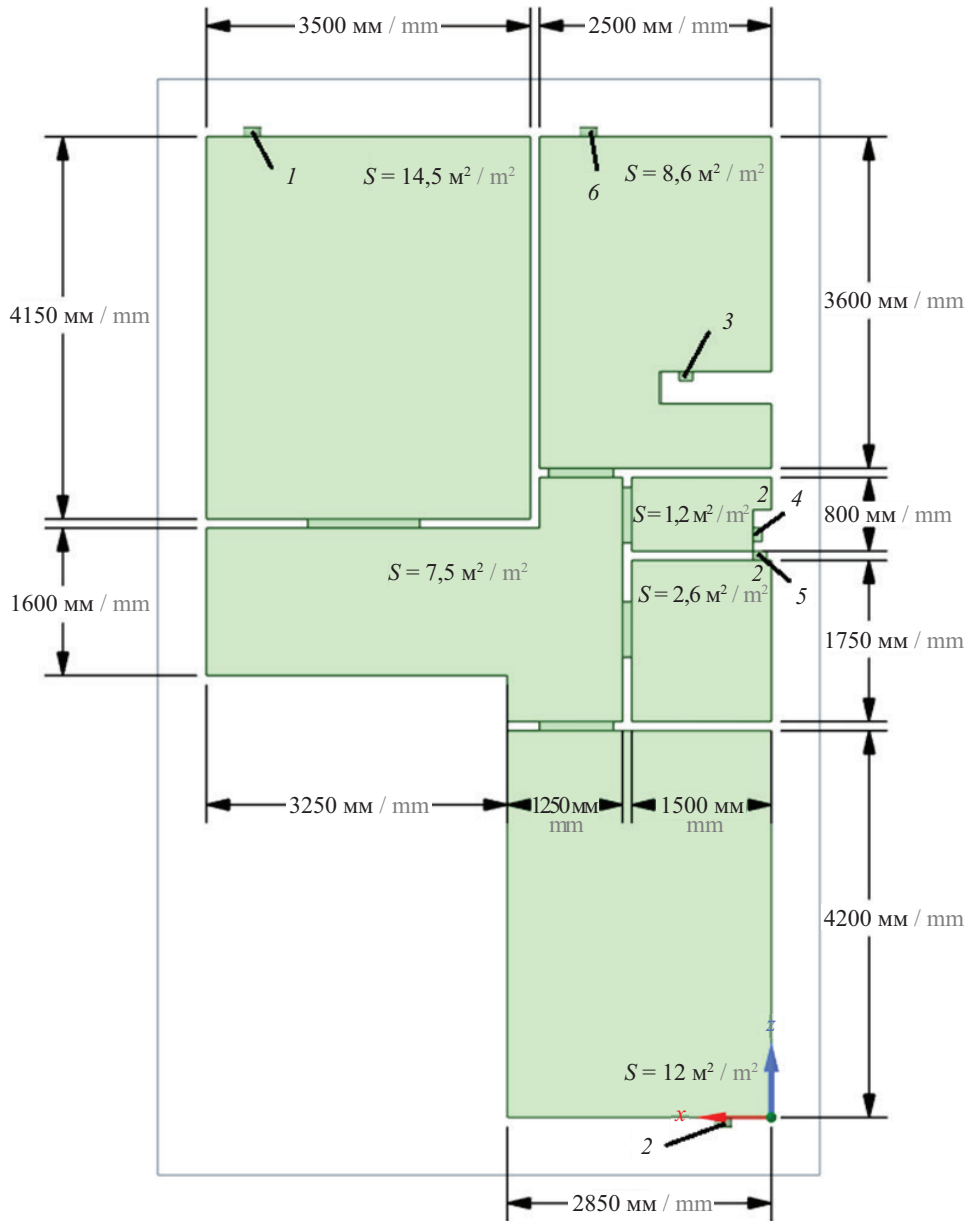


Рис. 2. План исследуемой квартиры: 1, 2 — места расположения регенераторов; 3–5 — вытяжные отверстия естественной вентиляции на кухне и в санузле; 6 — приток для компенсации естественной вытяжки

Fig. 2. The plan of the apartment: 1, 2 — locations of the regenerators; 3–5 — exhaust vents of natural ventilation in the kitchen and bathroom; 6 — inflow to compensate for natural exhaust

пятствий и узких проходов, что затрудняет расчет потоков воздуха;

- повышение турбулентности: наличие мебели вызывает локальные турбулентные зоны, завихрения и изменение направления потоков, что трудно точно моделировать;
- взаимодействие с поверхностями: мебель и предметы могут влиять на теплообмен и создавать дополнительные источники тепла или холода, что в итоге влияет на распределение скорости воздуха;
- отсутствие точных данных: параметры расположения и размеров мебели, а также их тепловые характеристики могут быть разнообразными, суще-

ственно отличающимися для каждой рассматриваемой квартиры, меняющимися со временем, а также зачастую неизвестными;

- высокая вычислительная сложность: моделирование с учетом всех препятствий требует сложных численных методов и значительных ресурсов.

В результате моделирование воздухораспределения в квартире с мебелью — трудоемкая задача, требующая использования сложных методов численного моделирования и вычислительных мощностей. В постановке рассматриваемой задачи учет таких факторов является нерациональным для получения общей картины результатов.

Настройки программного комплекса Ansys Fluent

Programme configurations Ansys Fluent

Тип сетки Type of Mesh	Полиэдральная Polyhedral
Количество элементов Number of elements	> 1 млн > 1 million
Настройка «Offset method tape» Configure the Offset tape method	Плавный переход Smooth-transition
Количество слоев в пограничном слое The number of layers in the boundary layer	6
Модель вязкости Viscosity model	$k-\omega$ (2 уравнения), SST $k-\omega$ (2 equations), SST
Методы решателя Solver Methods	Соединение давления и скорости: Pressure-Velocity Coupling: • scheme – coupled Пространственная дискретизация: Spatial Discretization: • gradient – Green-Gauss Node Based; • Pressure – PRESTO; • momentum – Third-Order MUSCL; • turbulent kinetic energy – Third-Order MUSCL; • specific dissipation rate – Third-Order MUSCL

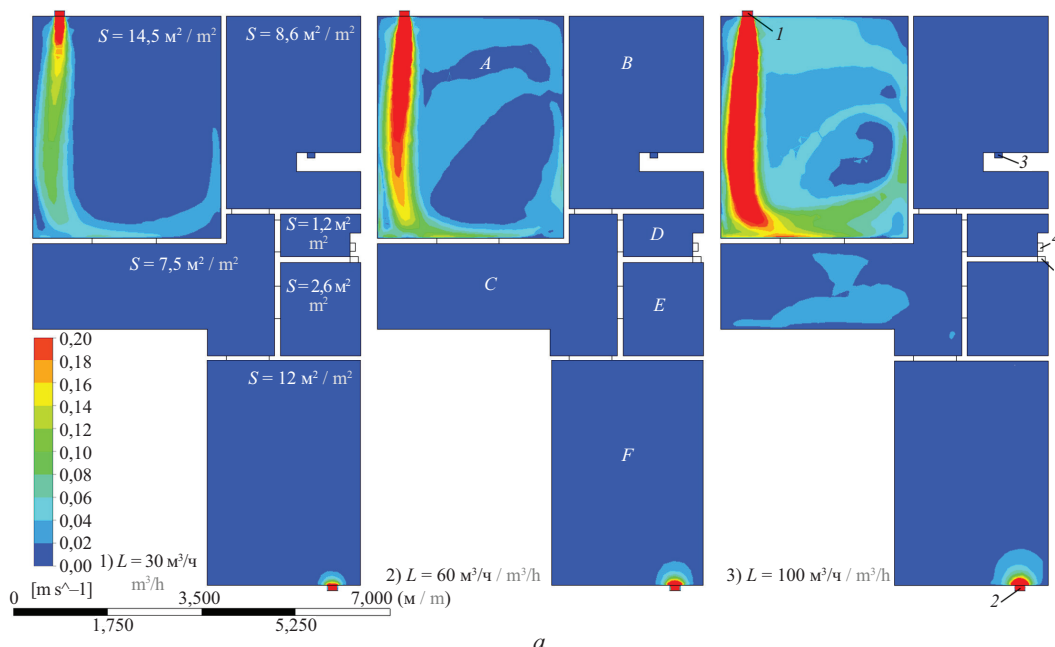
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве результатов исследования приведены поля скоростей движения воздуха в плане квартиры на фиксированной высоте.

На рис. 3, а показаны поля распределения скорости движения воздуха в плане квартиры на высоте 2,3 м от пола. Представлены три случая иллюстрации подачи и удаления воздуха для трех различных расходов воздуха 30, 60 и 100 м³/ч. Воздух подается в комнату А, а удаляется из комнаты F. Расходы приточного и вытяжного воздуха равны для каждого случая. При моделировании в качестве граничных условий заданы: для приточного 1 и вытяжного 2 проемов

массовый расход воздуха, рассчитанный через указанный объемный расход и плотность воздуха, равную 1,2 кг/м³; для вытяжных проемов на кухне и санузле 3–5 — нулевое давление (свободный выход). На рис. 3, а скорость движения воздуха ограничена максимальным значением 0,2 м/с для более детального отображения низкоскоростных потоков.

Для расхода 30 м³/ч наблюдается крайне низкая подвижность воздуха в помещении, где осуществляется приток. Максимальная скорость движения воздуха видна только в самом начале струи. Струя быстро затухает и не создает необходимой подвижности воздуха в этом помещении. В остальных помещениях воздух неподвижен. Всасывающий факел



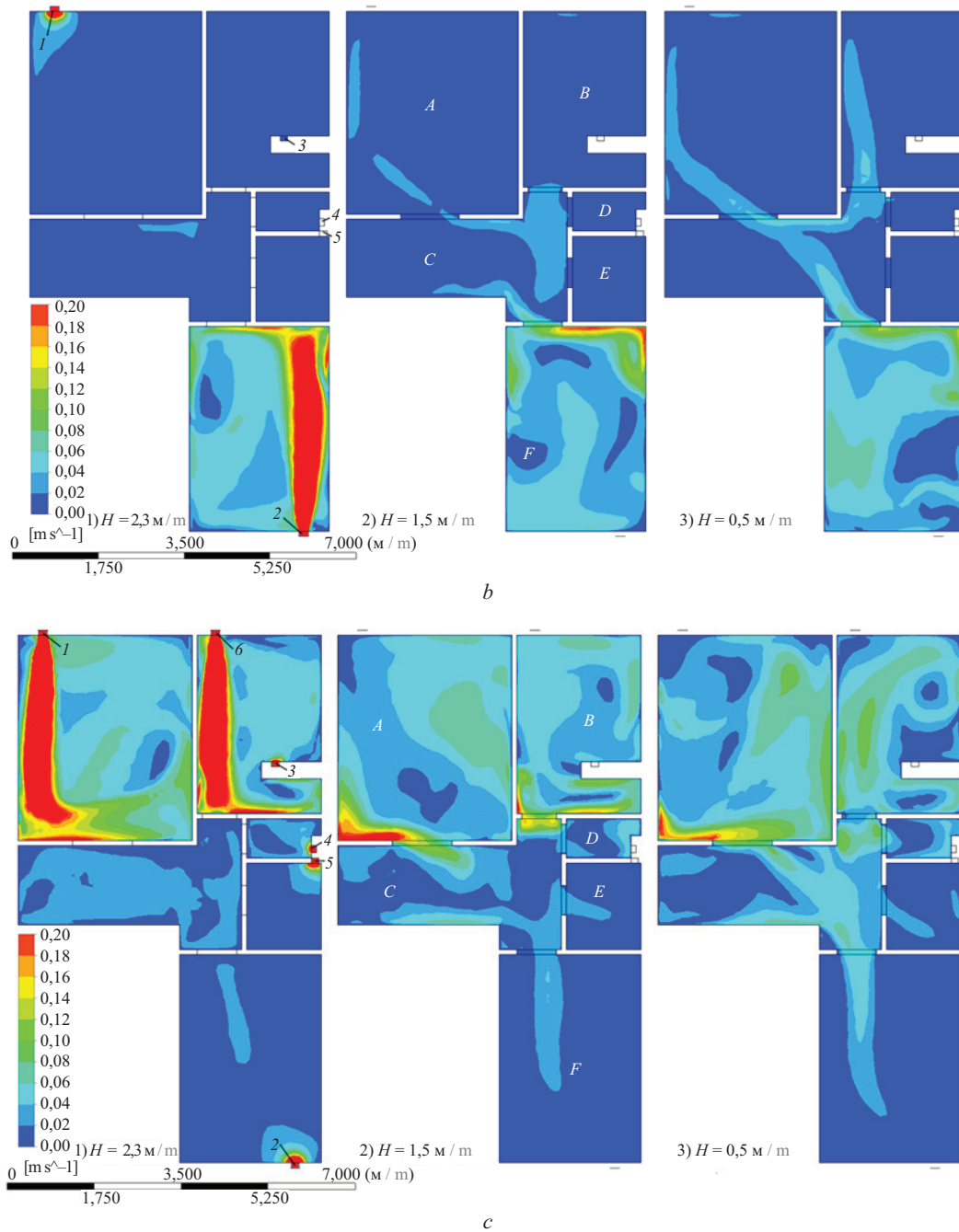


Рис. 3. Поля распределения скорости движения воздуха в плане: *a* — на высоте 2,3 м при подаче воздуха в комнату *A* и удалении из комнаты *F*; *b* — на различных высотах при подаче воздуха в комнату *F* и удалении из комнаты *A*; *c* — на различных высотах при подаче воздуха в помещения *A* и *B* и удалении из помещений *B*, *D*, *E*, *F*

Fig. 3. Air velocity distribution fields in the plan: *a* — at a height of 2.3 m when air is supplied to room *A* and removed from room *F*; *b* — at different heights when air is supplied to room *F* and removed from room *A*; *c* — at different heights when air is supplied to rooms *A* and *B* and removed from rooms *B*, *D*, *E*, *F*

не оказывает влияния на подвижность воздуха в помещении.

Для расхода 60 м³/ч воздух в помещении *A* более подвижен по сравнению с предыдущим случаем. Струя с такой произвольностью уже способна вовлекать в движение окружающий ее внутренний воздух. Скорость движения воздуха в основном объеме помещения меняется от 0 до 0,05 м/с, что может быть оценено как минимальный допустимый уро-

вень подвижности воздуха. В остальном картина воздухораспределения аналогична предыдущему случаю.

Для расхода 100 м³/ч подвижность воздуха высокая — около 0,05–0,1 м/с. Воздух активно циркулирует по объему помещения *A*, приточная струя создает круговое движение воздуха внутри помещения. Наблюдается переток воздуха через коридор *C* в комнату *F*.

С точки зрения обновления воздуха в помещении, т.е. замещения отработавшего внутреннего воздуха свежим приточным, наличие зон циркуляции является негативным эффектом. Так как обмен между свежим воздухом приточных струй и зонами циркуляции затруднен, зоны циркуляции становятся застойными зонами, в которых параметры воздуха будут отклоняться от требуемых. Вариантом снижения циркуляции воздуха может быть отказ от компактных прямооточных струй в пользу, например, веерных путем замены типа воздухораспределителя.

Кроме того, по рис. 3, *a* видно, что при характерном размещении СПРТ сбоку от оконного проема происходит настиление приточной струи на стену, что увеличивает ее дальноточность и может способствовать увеличению подвижности воздуха.

Необходимо отметить, что для всех приведенных случаев отмечается нулевая скорость движения воздуха в вытяжных отверстиях 3–5. Это может быть объяснено тем, что при заданных одинаковых расходах приточного и вытяжного воздуха в задаче устанавливается баланс массы. При задании ненулевого значения давления в данных проемах картина движения воздуха не меняется.

При отображении полей скорости на различной высоте картина воздухораспределения будет несколько меняться. На рис. 3, *b* приведены скоростные поля для трех уровней: 2,3, 1,5 и 0,5 м от уровня пола. Здесь воздух подается в помещение *F* и удаляется из помещения *A*, т.е. картина воздухообмена меняется на противоположную, что соответствует периодическому характеру работы СПРТ. Остальные настройки для данного случая полностью совпадают с предыдущим.

Согласно рис. 3, *b*, снижение высоты иллюстрирует перетекание воздуха из помещения, в которое он подается, в соседние помещения. В том числе наблюдается поступление воздуха через коридор на кухню *B*. Предположительно, данный эффект перетекания воздуха будет усиливаться при снижении температуры притока.

Для нагруженных условий могут требоваться повышенные значения воздухообмена. Например, при размещении четырех человек в такой квартире: по два человека в каждой жилой комнате, а также при наличии газовой плиты на кухне потребуются следующие расходы воздуха согласно СП 54.13330.2022⁴:

- для комнат *A* и *F*: 120 м³/ч для создания воздухообмена 60 м³/ч в каждой комнате;
- для кухни *B*: 100 м³/ч;
- для туалета *D*: 25 м³/ч;
- для ванной комнаты *E*: 50 м³/ч.

На рис. 3, *c* представлены результаты моделирования для указанных условий, при этом при-

нято, что приток в кухню компенсируется вытяжкой из ванной, туалета, а также кухни, т.е. расходы по выходам приняты следующими: 3 — 25 м³/ч, 4 — 25 м³/ч, 5 — 50 м³/ч.

Учитывая переключающийся режим работы СПРТ в жилых комнатах, подвижность воздуха во всех помещениях квартиры может считаться достаточной. Наблюдается активное перетекание воздуха между комнатами, что обеспечивает эффективный воздухообмен во всей квартире. Нахождение человека в зоне приточной струи может вызывать дискомфорт, что опять может быть решено заменой воздухораспределителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Применение CFD-моделирования позволяет визуализировать скоростные поля движения вентиляционного воздуха в помещениях зданий. Такие модели помогают оптимизировать качество воздуха в помещении, тепловой комфорт и энергоэффективность применяемого оборудования, способствуя устойчивому проектированию и эксплуатации зданий. CFD-моделирование дает возможность прогнозировать характеристики воздухораспределения, что может быть использовано для улучшения конструкции вентиляционных установок и расположения приточных и вытяжных устройств, чтобы получить наилучшие результаты в создании комфорта воздушной среды помещения.

В результате проведенного исследования выявлены особенности распределения скорости движения воздуха при различных режимах работы системы приточно-вытяжной вентиляции на основе компактных устройств типа СПРТ в типовой двухкомнатной квартире. Анализ показал, что при низких значениях воздухообмена (30 м³/ч) отмечается недостаточная подвижность воздуха, что негативно сказывается на эффективности воздухообмена и, как итог, комфорте человека. При увеличении расхода до 60 м³/ч наблюдается улучшение циркуляции, достигающее минимально допустимых значений скоростей, а при 100 м³/ч и более обеспечивается активная циркуляция и эффективное обновление воздуха в помещениях. Важным фактором служит расположение приточных устройств, которое влияет на картину воздухораспределения в целом и ограничено особенностью конструкции изучаемых устройств. Моделирование при различных высотах продемонстрировало, что режим периодической работы системы способствует перетеканию воздуха между помещениями, что обеспечивает достаточный воздухообмен при условии правильного выбора режима работы вентиляции. При повышенных расходах воздуха могут требоваться мероприятия по избавлению от эффекта сквозняка и застойных зон, например, путем применения специальных воздухораспределителей.

⁴ СП 54.13330.2022. СНиП 31-01–2003. Здания жилые многоквартирные. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/223332/>

В целом результаты подтверждают эффективность использования компактных установок типа СПРТ и возможность создания комфортных условий микроклимата в помещениях с их помощью. При этом определена необходимость оптимизации конструкции и режима работы таких систем вентиляции для повышения комфорта и качества воздуха в жилых помещениях.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании механических систем вен-

тиляции жилых многоквартирных зданий на основе компактных установок типа СПРТ, а также при сочетании естественной и механической вентиляции.

В дальнейшем следует провести исследование воздухораспределения для других видов и типов квартир, а также других видов воздухораспределителей, что позволит расширить базу данных для выработки рекомендаций и создания методики проектирования систем вентиляции на основе компактных реверсивных устройств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Malyavina E., Agakhanova K.* Computational study of a natural exhaust ventilation system during the heating period // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Pp. 116–124. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_12
2. *Кутайцева Е.Х., Малявина Е.Г.* Естественная вентиляция жилых зданий // *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 1999. № 3. С. 35–40. EDN TYXBBV.
3. *Куреев А.* Вентиляция в многоквартирных домах: проблемы и перспективы // *Сантехника, Отопление, Кондиционирование*. 2022. № 6 (246). С. 66–68. EDN RIZKMA.
4. *Monarkin N., Monarkina T.* Experimental Research of a Regenerative Heat Exchanger // *Processes*. 2022. Vol. 10. Issue 1. DOI: 10.3390/pr10010100. EDN SWPPKR.
5. *Монаркин Н.Н.* Обеспечение требуемого воздухообмена в помещениях при использовании компактных регенеративных теплоутилизаторов // *Вестник МГСУ*. 2023. Т. 18. № 3. С. 455–462. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.455-462. EDN ZXZSIV.
6. *Zender-Swiercz E.* A review of heat recovery in ventilation // *Energies*. 2021. Vol. 14. Issue 6. P. 1759. DOI: 10.3390/en14061759. EDN VNRBFP.
7. *Monarkin N.* Reversible decentralized ventilation: Experimental determination of efficiency by carbon dioxide level // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 78. P. 107675. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.107675. EDN UNDJBA.
8. *Li Y., Nielsen P.V.* CFD and ventilation research // *Indoor Air*. 2011. Vol. 21. Issue 6. Pp. 442–453. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2011.00723.x
9. *Quang T.V., Doan D.T., Phuong N.L., Yun G.Y.* Data-driven prediction of indoor airflow distribution in naturally ventilated residential buildings using combined CFD simulation and machine learning (ML) approach // *Journal of Building Physics*. 2024. Vol. 47. Issue 4. Pp. 439–471. DOI: 10.1177/17442591231219025
10. *Van Quang T., Phuong N.L., Doan D.T.* Efficient Prediction of Indoor Airflow in Naturally Ventilated Residential Buildings Using a CFD-DNN Model Approach // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. Pp. 759–770. DOI: 10.1007/978-981-99-9947-7_76
11. *Nielsen P.V.* Fifty years of CFD for room air distribution // *Building and Environment*. 2015. Vol. 91. Pp. 78–90. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.035
12. *Raczkowski A., Suchorab Z., Brzyski P.* Computational fluid dynamics simulation of thermal comfort in naturally ventilated room // *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 252. P. 04007. DOI: 10.1051/mateconf/201925204007
13. *Агафонова В.В., Скибин А.П., Волков В.Ю.* Моделирование воздухообмена в офисном помещении при применении микроперфорированного текстильного воздуховода // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2021. № 2. С. 52–57. DOI: 10.35776/VST.2021.02.06. EDN UOQQLZ.
14. *Засимова М.А., Маринова А.А., Иванов Н.Г., Подмаркова А.Д.* Численное моделирование воздушных потоков при обтекании сидящего теплового манекена в помещении с перемешивающей вентиляцией // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. 2022. Т. 15. № 3. С. 111–131. DOI: 10.18721/JPM.15309. EDN BBMIUJ.
15. *Teodosiu R., Ilie V., Teodosiu C.* Computational Fluid Dynamics prediction of indoor air quality // *International Journal of Material Science & Engineering*. 2014.
16. *Du L., Yang C., Dominy R., Yang L., Hu C., Du H. et al.* Computational Fluid Dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 159. Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.compag.2019.02.020
17. *Küçüktopçu E., Cemek B., Simsek H.* Modeling Environmental Conditions in Poultry Production: Computational Fluid Dynamics Approach // *Animals*. 2024. Vol. 14. Issue 3. P. 501. DOI: 10.3390/ani14030501
18. *Cao Q., Liu M., Li X., Lin C., Wei D., Ji S. et al.* Influencing factors in the simulation of airflow and particle transportation in aircraft cabins by CFD // *Building and Environment*. 2022. Vol. 207. P. 108413. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108413

19. *Ghibeche I., Nourani A., Naas T.T., Benzi-ouche S.E., Buchholz M., Buchholz R.* A computational fluid dynamics (CFD) modeling in a new design of closed greenhouse // *Studies in Engineering and Exact Sciences*. 2024. Vol. 5. Issue 1. Pp. 649–666. DOI: 10.54021/seesv5n1-037

20. *Abu-Zidan Y., Mendis P., Gunawardena T.* Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings // *Heliyon*. 2021. Vol. 7. Issue 4. P. e06723. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06723

21. *Penev A., Tsokov L.* Influence of buoyancy forces in multi-storey buildings on the efficiency of a regenerative air handling unit with heat recovery // *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1032. Issue 1. P. 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/1032/1/012029

22. *Koper P.* Influence of Control Strategy on Heat Recovery Efficiency in a Single-Duct Periodic Ventilation Device // *Energies*. 2024. Vol. 17. Issue 22. P. 5801. DOI: 10.3390/en17225801

Поступила в редакцию 4 июня 2024 г.

Принята в доработанном виде 7 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 7 декабря 2025 г.

ОБ АВТОРАХ: **Николай Николаевич Монаркин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоводоснабжения; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 831464, Scopus: 56027718900, ResearcherID: O-9932-2017, ORCID: 0000-0002-4411-5753; nikolay-monarkin@yandex.ru;

Виктор Александрович Яковлев — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоводоснабжения и вентиляции; **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)**; 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4; РИНЦ ID: 248647, ORCID: 0000-0001-6639-598X; yakovlevspv@rambler.ru;

Татьяна Владимировна Монаркина — аспирант кафедры теплогазоводоснабжения; **Вологодский государственный университет (ВоГУ)**; 160000, г. Вологда, ул. Ленина, д. 15; РИНЦ ID: 1131504, Scopus: 57396272900, ORCID: 0009-0005-5822-1628; monarkinatv@vogu35.ru.

Вклад авторов: все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Malyavina E., Agakhanova K. Computational study of a natural exhaust ventilation system during the heating period. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020; 116-124. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_12

2. Kitaytseva E.Kh., Malyavina E.G. Natural ventilation of residential buildings. *AVOK*. 1999; 3:35-40. EDN TYXBBV. (rus.).

3. Kireev A. Ventilation in apartment buildings: problems and prospects. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2022; 6(246):66-68. EDN RIZKMA. (rus.).

4. Monarkin N., Monarkina T. Experimental Research of a Regenerative Heat Exchanger. *Processes*. 2022; 10(1). DOI: 10.3390/pr10010100. EDN SWPPKR.

5. Monarkin N.N. Maintenance of the required indoor air exchange rate by using compact regenerative heat exchangers. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(3): 455-462. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.455-462. EDN ZXZSIV. (rus.).

6. Zender-Swiercz E. A review of heat recovery in ventilation. *Energies*. 2021; 14(6):1759. DOI 10.3390/en14061759. EDN VNRBFP.

7. Monarkin N. Reversible decentralized ventilation: Experimental determination of efficiency by car-

bon dioxide level. *Journal of Building Engineering*. 2023; 78:107675. DOI: 10.1016/j.jobee.2023.107675. EDN UNDJBA.

8. Li Y., Nielsen P.V. CFD and ventilation research. *Indoor Air*. 2011; 21(6):442-453. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2011.00723.x

9. Quang T.V., Doan D.T., Phuong N.L., Yun G.Y. Data-driven prediction of indoor airflow distribution in naturally ventilated residential buildings using combined CFD simulation and machine learning (ML) approach. *Journal of Building Physics*. 2024; 47(4):439-471. DOI: 10.1177/17442591231219025

10. Van Quang T., Phuong N.L., Doan D.T. Efficient Prediction of Indoor Airflow in Naturally Ventilated Residential Buildings Using a CFD-DNN Model Approach. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024; 759-770. DOI: 10.1007/978-981-99-9947-7_76

11. Nielsen P.V. Fifty years of CFD for room air distribution. *Building and Environment*. 2015; 91:78-90. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.035

12. Raczkowski A., Suchorab Z., Brzyski P. Computational fluid dynamics simulation of thermal comfort in naturally ventilated room. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 252:04007. DOI: 10.1051/mateconf/201925204007

13. Agafonova V., Skibin A., Volkov V. Modeling air exchange in office premises using a microperforated fabric air duct. *Water Supply and Sanitary Technique*. 2021; 2:52-57. DOI: 10.35776/VST.2021.02.06. EDN UOQQLZ. (rus.).
14. Zasimova M.A., Marinova A.A., Ivanov N.G., Podmarkova A.D. Numerical simulation of turbulent airflow and heat transfer around a seated thermal manikin in the room with mixing ventilation. *St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2022; 15(3):111-131. DOI: 10.18721/JPM.15309. EDN BBMIUJ. (rus.).
15. Teodosiu R., Ilie V., Teodosiu C. Computational Fluid Dynamics prediction of indoor air quality. *International Journal of Material Science & Engineering*. 2014.
16. Du L., Yang C., Dominy R., Yang L., Hu C., Du H. et al. Computational Fluid Dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019; 159:1-15. DOI: 10.1016/j.compag.2019.02.020
17. Küçüktopçu E., Cemek B., Simsek H. Modeling Environmental Conditions in Poultry Production: Computational Fluid Dynamics Approach. *Animals*. 2024; 14(3):501. DOI: 10.3390/ani14030501
18. Cao Q., Liu M., Li X., Lin C., Wei D., Ji S. et al. Influencing factors in the simulation of airflow and particle transportation in aircraft cabins by CFD. *Building and Environment*. 2022; 207:108413. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108413
19. Ghibeche I., Nourani A., Naas T.T., Benziouche S.E., Buchholz M., Buchholz R. A computational fluid dynamics (CFD) modeling in a new design of closed greenhouse. *Studies in Engineering and Exact Sciences*. 2024; 5(1):649-666. DOI: 10.54021/sees-v5n1-037
20. Abu-Zidan Y., Mendis P., Gunawardena T. Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings. *Heliyon*. 2021; 7(4):e06723. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06723
21. Penev A., Tsokov L. Influence of buoyancy forces in multi-storey buildings on the efficiency of a regenerative air handling unit with heat recovery. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2021; 1032(1):012029. DOI: 10.1088/1757-899X/1032/1/012029
22. Koper P. Influence of Control Strategy on Heat Recovery Efficiency in a Single-Duct Periodic Ventilation Device. *Energies*. 2024; 17(22):5801. DOI: 10.3390/en17225801

Received June 4, 2024.

Adopted in revised form on October 7, 2025.

Approved for publication on December 7, 2025.

B I O N O T E S : **Nikolay N. Monarkin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Heat and Gas and Water Supply; **Vologda State University**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 831464, Scopus: 56027718900, ResearcherID: O-9932-2017, ORCID: 0000-0002-4411-5753; nikolay-monarkin@yandex.ru;

Viktor A. Iakovlev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of the Heat and Gas Supply and Ventilation; **Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**; 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., St. Petersburg, 190005, Russian Federation; ID RSCI: 248647; ORCID: 0000-0001-6639-598X; yakovlevspv@rambler.ru;

Tat'yana V. Monarkina — postgraduate student of the Department of Heat and Gas and Water Supply; **Vologda State University**; 15 Lenina st., Vologda, 160000, Russian Federation; ID RSCI: 1131504, Scopus: 57396272900, ORCID: 0009-0005-5822-1628; monarkinatv@vogu35.ru.

Authors' contribution: all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.