

Термогравитационная вентиляция жилых зданий

Адхам Иминжанович Гиясов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматриваются концептуальные основы модели системы термогравитационной вентиляции жилых зданий, основанные на исследовании зданий с низкими потребностями в вентиляции в климатических условиях, где температурные различия между внутренним и внешним воздухом значительны. Исследуется гравитационная вентиляция в контексте термического режима стен при инсоляции фасадов зданий, возводимых в регионах с доминированием высокого уровня солнечного теплового потока.

Материалы и методы. Для анализа и мониторинга светоинсоляционного и ветрового режимов территорий стран с продолжительным теплым периодом использован метод, основанный на базе данных гидрометеорологических справочников. Процесс естественной вентиляции изучен с помощью методов солнечно-инсоляционного анализа конструктивной оболочки зданий в программе Revit, а также на основе натурных исследований инсоляционного и термического режимов этой оболочки.

Результаты. Разработано теоретическое положение термогравитационной вентиляции зданий для регионов с продолжительным теплым периодом. Составлена физико-математическая модель системы термогравитационной вентиляции, описывающая естественный процесс циркуляции воздуха в помещениях, основанный на разнице плотностей воздуха внутри и снаружи здания. Изучен механизм естественной аэрации квартир в зданиях с использованием комплексного подхода, включающего натурные экспериментальные исследования, математическое моделирование микроклиматических и теплофизических процессов, а также применение программного обеспечения и тепловизионного обследования.

Выводы. Разработанное теоретическое положение термогравитационной вентиляции зданий для регионов с продолжительным теплым периодом позволило сформулировать физико-математическую модель системы термогравитационной вентиляции зданий, описывающую естественный процесс циркуляции воздуха в помещениях, основанный на разнице плотностей воздуха внутри и снаружи здания. В целом термогравитационная вентиляция является эффективным и экологически чистым решением для обеспечения естественного воздухообмена, поддерживая комфортный воздушный режим в зданиях, особенно в условиях маловетреной погоды и штелей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: термогравитационная вентиляция, здания, помещения, термический режим, температура, микроклимат, теплофизика, инсоляция, конструктивная оболочка

Благодарности. Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды Национального исследовательского Московского государственного строительного университета по проблеме «Функция, конструкция и среда в архитектуре зданий и городов» в аспекте «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности зданий».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гиясов А.И. Термогравитационная вентиляция жилых зданий // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 10. С. 1577–1595. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1577-1595

Автор, ответственный за переписку: Адхам Иминжанович Гиясов, GiyasovAI@gic.mgsu.ru, adham52@mail.ru.

Thermogravitational ventilation system for residential buildings

Adham I. Giyazov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article discusses the conceptual foundations of the model of a thermogravitational ventilation system for residential buildings, based on the study of buildings with low ventilation needs in climate conditions where the temperature difference between indoor and outdoor air is great. Gravity ventilation is considered in the context of the thermal regime of walls in the course of insolation of building facades erected in regions with predominantly high solar heat fluxes.

Materials and methods. A method involving a database of hydrometeorological reference books was used to analyse and monitor the sunlight and wind regime in the countries with extended warm seasons. The process of natural ventilation was studied in the Revit program using methods of sunlight analysis of structural shells of buildings; field studies of insolation and thermal regimes were also employed.

Results. A theoretical proposition was developed for the thermogravitational ventilation of buildings in areas featuring long warm seasons. A physical and mathematical model of a thermogravitational ventilation system was devised; it describes

a natural process of indoor air circulation based on a difference in the air density inside and outside buildings. An integrated approach was applied to study the mechanism of natural aeration of apartments; full-scale experimental studies were conducted; mathematical models of microclimate and thermophysical processes were developed; software and thermal imaging surveys were employed.

Conclusions. The author's theoretical proposition, developed for thermogravitational ventilation in buildings erected in areas with long warm seasons, enables researchers to devise a physical and mathematical model of a thermogravitational ventilation system of buildings, describing the natural process of indoor air circulation based on a difference in indoor and outdoor air density. In general, thermogravitational ventilation is an effective and environmentally friendly solution for natural air exchange, because it maintains a comfortable indoor air regime, especially in low-wind and calm environments.

KEYWORDS: thermogravitational ventilation, buildings, premises, thermal regime, temperature, microclimate, thermal physics, insolation, structural shell

Acknowledgments. This project was implemented in compliance with the research plan of Department of Architectural and Civil Engineering Design and Environmental Physics of the National Research Moscow State University of Civil Engineering; it focuses on research in the function, design, and environment in the architecture of buildings and cities in the context of energy saving and improving the energy efficiency of buildings.

FOR CITATION: Giyazov A.I. Thermogravitational ventilation system for residential buildings. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(10):1577-1595. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.10.1577-1595 (rus.).

Corresponding author: Adham I. Giyazov, GiyazovAI@gic.mgsu.ru, adham52@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым днем изменяется тарифная политика и отмечается рост цен на энергоносители. В этой ситуации актуальным становится решение задачи по повышению комфортности микроклимата в помещениях зданий с максимальным энергосбережением. Это важно для регионов, которые, с одной стороны, недостаточно обеспечены собственными ресурсами; а с другой — характеризуются продолжительными и экстремально теплыми климатическими условиями. Подобные климатические особенности наблюдаются на территории большинства азиатских, африканских, арабских, латиноамериканских, южно-европейских стран, Австралии, центральноазиатских и закавказских государств СНГ, республик Северного Кавказа и южного региона России, включая новые территории и другие. В процессе проектирования, строительства и эксплуатации зданий в этом случае остро стоит необходимость снижения летнего перегрева внутренней среды и поддержания комфортных тепловых условий в помещениях в зимний период. В решении данной проблемы роль системы естественной вентиляции за счет разности температур внутренней и внешней воздушной среды является приоритетной.

Термогравитационная вентиляция помещений зданий при открытом режиме их эксплуатации — экономически целесообразна и экологически безопасна. Она предпочтительнее местных систем кондиционирования, которые могут вызывать простудные заболевания из-за регулярных перепадов температур между помещениями, а также между внутренней и внешней средой.

Модель системы термогравитационной вентиляции зданий описывает естественный процесс циркуляции воздуха в помещениях, основанный на разнице плотностей воздуха внутри и снаружи здания.

Основными элементами и принципами такой системы служат эффективные способы естествен-

ной вентиляции помещений за счет теплового напора, а также теплого воздуха, поднявшихся в помещении и в пристенном слое снаружи здания благодаря тепловой конвекции и создающих разницу в плотности между слоями воздуха.

Элементы такой системы пассивны и не требуют энергопотребления для обеспечения воздухообмена между помещениями зданий и внешней воздушной средой.

Города южных регионов СНГ, государств Африки, арабских, латиноамериканских и европейских стран отличаются жаркими сезонами продолжительностью 8 и более месяцев с аридными условиями, характеризующимися низкой скоростью ветра от 1 до 3 м/с (с повторяемостью штиля до 60–70 %) и высокой температурой воздуха, достигающей 48 °С, и интенсивностью солнечной радиации до 980 Вт/м² и более, что определяет рациональность использования термогравитационной вентиляции. При этом существенна роль энергии солнца для эффективного использования термогравитационной вентиляции помещений. В качестве примеров можно привести следующие города: Алма-Ата, Баку, Душанбе, Ташкент, Каир, Лагос, Найроби, Дубай, Доха, Эр-Рияд, Мехико, Лима, Мадрид, Афины, Рим и др.

Эти города расположены в регионах, в которых природно-климатические факторы могут создавать условия для поддержания комфортного микроклимата внутри зданий, и различные методы вентиляции, в том числе термогравитационная, могут играть важную роль.

Указанный тип вентиляции позволяет оптимально использовать разницу в температуре между внутренним и внешним воздухом для естественной циркуляции воздуха в зданиях, что особенно ценно, когда механическая вентиляция может быть нестабильной или требует существенных энергетических затрат.

Термогравитационная вентиляция зданий привлекала внимание как отечественных, так и зару-

бежных ученых, работающих в области архитектуры и инженерных систем зданий [1–6]. Они анализировали влияние различных факторов на эффективность естественной вентиляции, включая термогравитацию. Эти исследователи внесли значительный вклад в изучение термогравитационной вентиляции и других аспектов естественной вентиляции зданий, разрабатывая методики моделирования процессов, направленные на повышение эффективности и комфортности внутренней среды¹.

Исследование свободного конвективного течения воздуха в пристенном микроклиматическом слое включает теоретические положения и экспериментальные исследования отечественных и зарубежных ученых в области свободной конвекции, а также теплового побуждения систем вентиляции. Изучается влияние конвективных потоков на формирование комфортного микроклимата в помещениях и оптимизацию вентиляционных систем [7–11].

Решению внутренних задач естественной вентиляции посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых [12–14].

В области естественной вентиляции помещений на данный момент накопилось множество вопросов, которые на протяжении длительного времени не имеют четких теоретических и инженерных решений в проектировании и эксплуатации современных зданий с учетом особенностей климатических условий различных регионов, что подчеркивает актуальность дальнейшего изучения указанной темы [15–17].

В некоторых случаях это может привести к значительным просчетам при определении уровня теплозащиты зданий и их ограждений, оценке эффективности различных типов ограждающих конструкций и выборе оптимальных систем вентиляции [18–20]. Важно также отметить еще один фактор — необходимость оценки и контроля эффективности работы систем естественной вентиляции. Эта задача является сложной, поскольку скорость и расход воздуха зависят от воздействия природных движущих сил, таких как ветровой и тепловые напоры, которые существенно варьируются в течение года [21–24].

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики, основную часть жилого фонда России составляют здания, построенные до 1990 г., которые характеризуются наличием систем естественной вентиляции. Такая тенденция сохраняется и сегодня благодаря низким капиталовложениям, простоте обслуживания и долговечности. Однако данные системы имеют недостатки. В холодный период они обеспечивают качественный воздухообмен вследствие температурной разницы, но летом их эффективность снижается из-за открытого режима

эксплуатации помещений. В теплое время вентиляция осуществляется в основном за счет периодического проветривания, что затрудняет поддержание требуемого микроклимата в жилых помещениях, санитарных узлах и кухнях. Эффективность такого проветривания зависит от силы и направления ветра и может сильно варьироваться в течение суток.

Цель исследования — разработка методики системы естественной аэрации, которая повысит микроклиматическую комфортность путем эффективного естественного воздухообмена в помещениях зданий, расположенных на территориях с продолжительным теплым периодом.

Намеченная цель будет достигнута следующими способами:

- выявлением роли инсоляции вертикальных поверхностей здания в формировании естественного конвективного потока в пристенном слое воздуха и тепловой воздушной оболочке вокруг здания в целом;
- установлением схемы движения воздушного потока у поверхности стен снаружи и выявлением энергетических характеристик их термического режима, являющихся причиной формирования тепловетрового режима в пристенном микроклиматическом слое воздуха при инсоляции фасада здания;
- определением значения энергоактивных фасадных систем в контексте термогравитационной вентиляции жилых зданий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В целях исследования физического процесса системы термогравитационной вентиляции помещения зданий проанализирован мониторинг светоинсоляционного и ветрового режима территорий стран, характеризующихся продолжительным теплым периодом, на основе базы данных гидрометеорологических справочников геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института им. В.А. Бугаева, справочных сведений ежемесячников закавказских республик, а также современной всемирной базы данных NASA SSE.

Результаты анализа показывают, что в течение всего сезона преобладают маловетрие и штилевые условия со средней скоростью ветра от 1 до 3 м/с. Это приводит к ухудшению естественной вентиляции и создает дискомфортное микроклиматическое явление «духоты» в помещениях зданий, в результате чего температура воздуха может превышать комфортный предел, достигая 34–36 °С при температуре внешней среды в тени до 48 °С и выше. В этой связи принято направление исследования по оптимизации естественной вентиляции помещений зданий целенаправленным использованием систем с радиационным подогревом наружных конструктивных плоскостей здания и вытяжных каналов с тепловым побуждением, что актуально

¹ Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). М. : Высшая школа, 1982. 416 с.

в повышении комфортности микроклимата зданий. Подобный подход особенно эффективен в зданиях с низкими потребностями в вентиляции и в климатических условиях, где температурные различия между внутренним и внешним воздухом значительны. Следует отметить, что такие целенаправленные исследования системы естественной аэрации жилищ для экономии энергии и снижения эксплуатационных затрат ввиду их комплексности проводятся впервые и акцентированы на развитие теории теплового режима зданий.

Процесс естественной вентиляции изучался с помощью методов солнечного анализа конструктивной оболочки зданий в программе Revit, а также на основе натурных исследований инсоляционного и термического режимов данной оболочки. Кроме того, проводилось исследование пристенного слоя воздуха по всей высоте зданий в соответствии с «Методическими указаниями по производству микроклиматических обследований в период изысканий», «Методами определения сопротивления воздухопроницаемости ограждающих конструкций»,

«Методами современного тепловизионного контроля» и «Методами проверки теплозащитных качеств и воздухопроницаемости ограждающих конструкций зданий». Для этих целей использовались современные стандартные актинометрические, метеорологические и теплофизические приборы.

В методах исследования учтены ключевые положения актуальных нормативно-технических документов².

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обеспечения эффективности вентиляции помещений и всего здания необходимо учитывать объемно-планировочные и конструктивные архитектур-

² СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха; СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий; СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий; ГОСТ 31167-2009. Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях.

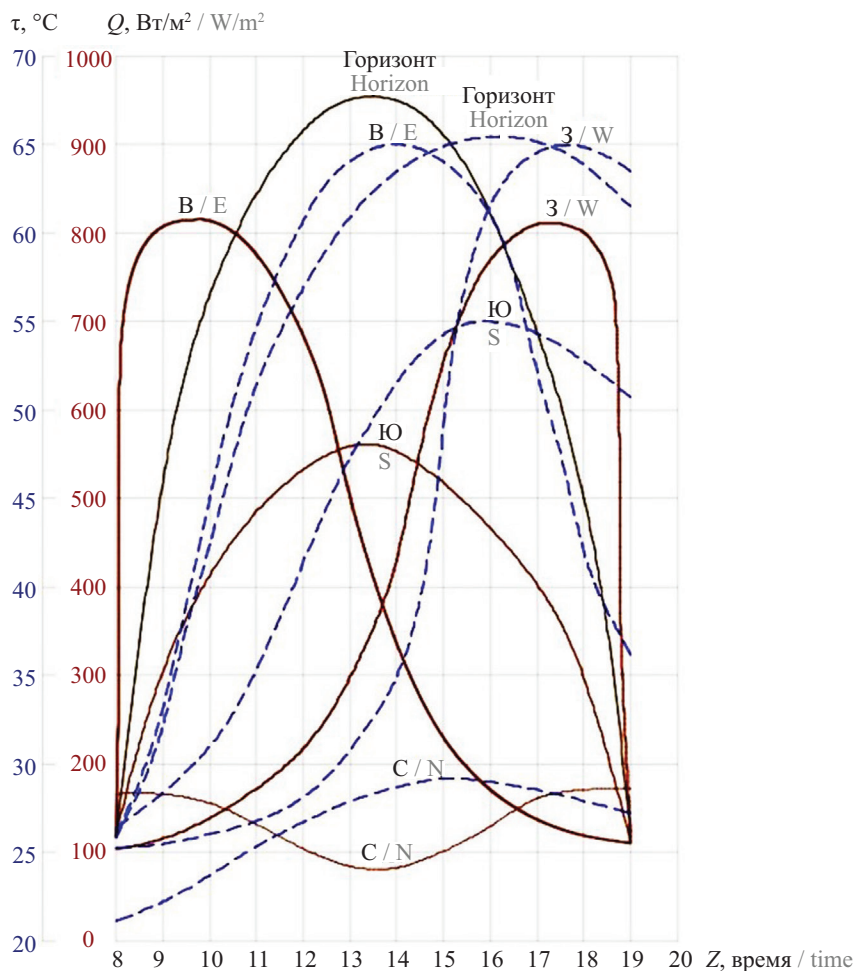


Рис. 1. Модель дневного хода солнечной энергии _____ и термического режима - - - поверхности стен разной ориентации

Fig. 1. Model of the daily course of solar energy _____ and the thermal regime - - - of wall surfaces having different orientations

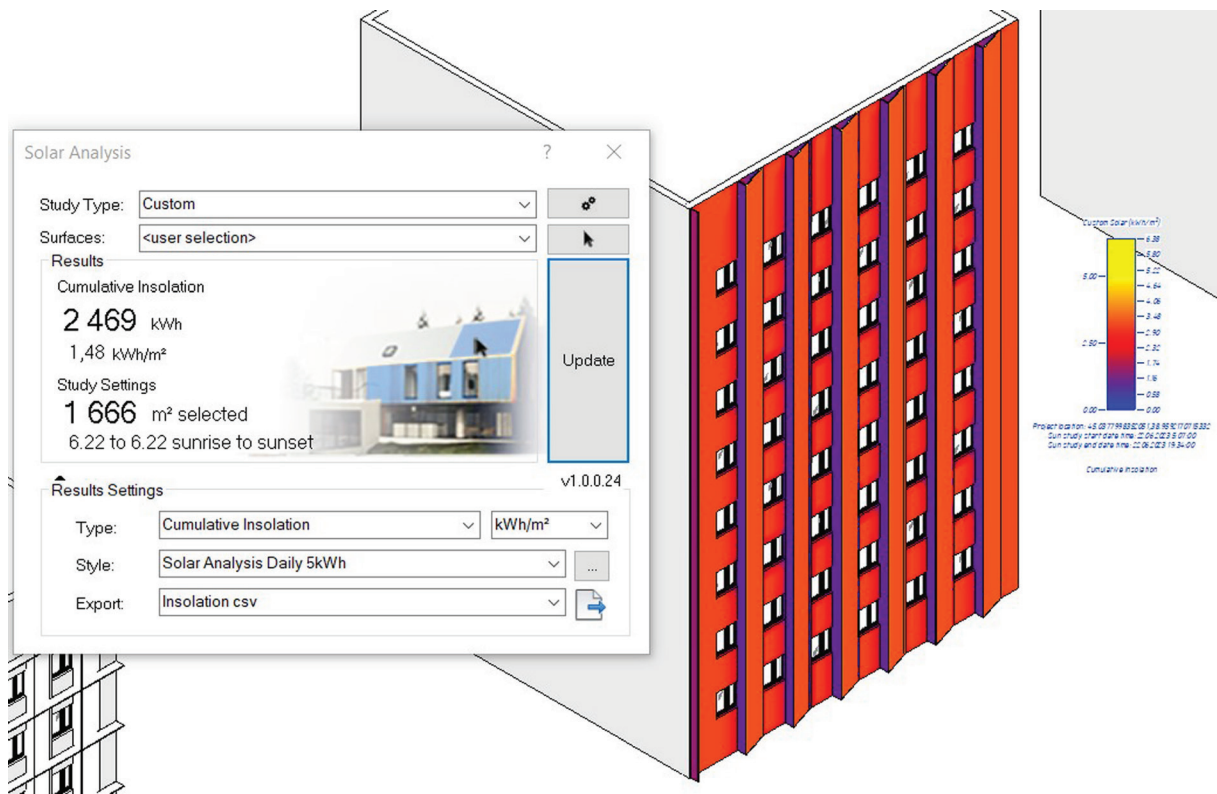


Рис. 2. Солнечный анализ в Revit

Fig. 2. Solar analysis made in Revit

ные особенности, климатические условия объекта строительства, а также расположение вентиляционных каналов и отверстий для притока и оттока воздушного потока.

При наличии значительной разницы в температуре между внутренним и внешним воздухом теплый воздух в здании, согласно теории конвективного потока, будет подниматься к потолку, создавая поток, который может быть отведен через специальные вентиляционные отверстия или каналы при закрытом режиме эксплуатации помещений и одновременно через форточки, фрамуги или оконные створки при открытом режиме эксплуатации зданий. Эффективность термогравитационной вентиляции квартир в маловетренных, штилевых погодных условиях и при температурных контрастах пристенного слоя противоположных стен фасадов зданий и спланированных в их сторону помещений может быть особенно значимой, поскольку она не требует активных механических систем, что является экономически выгодным (рис. 1, 2, табл. 1).

В маловетренные и штилевые погодные периоды система термогравитационной вентиляции не затрудняется наружными ветровыми факторами, что способствует более стабильной и предсказуемой циркуляции воздуха внутри зданий между помещениями разной ориентации.


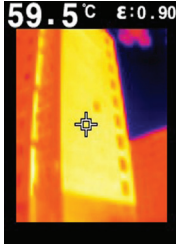
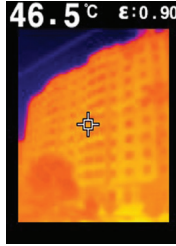
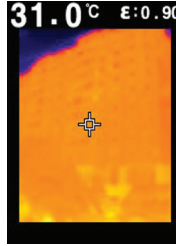


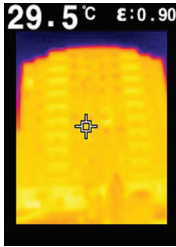
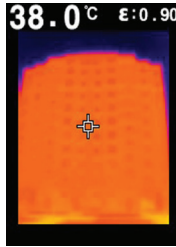
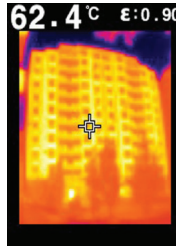
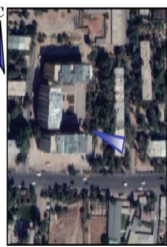

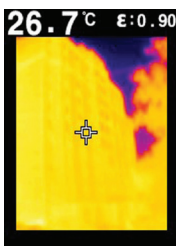
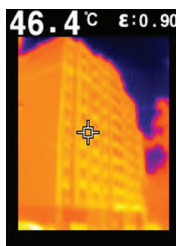
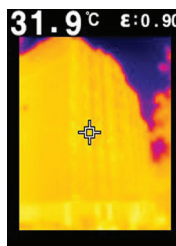

Эффективность термогравитационной вентиляции за счет теплового напора находится в прямой зависимости от термического режима поверхно-

стей стен фасадов (до 65 °C и более) при облучении их поверхностей солнечной радиацией (900 Вт/м²), формирующего температурно-ветровой режим пристенного слоя воздуха (рис. 3). При этом восходящие конвективные потоки температурой более 75 °C со скоростью до 3 м/с и более, сформированные в пристенной оболочке микроклиматического слоя воздуха, способствуют подтоку воздуха из помещений, активизируя естественную аэрацию. Это приводит к перемещению воздушных потоков между противоположными смежными помещениями за счет термического режима конструктивной оболочки зданий и формирующегося в пристенном слое контрастирующего тепло-ветрового режима, что отличается от климатических данных, нормируемых для данного района строительства (рис. 4, 5).

Одним из ключевых условий успешного проведения натурных исследований в современных 16-этажных жилых зданиях широтной и меридиональной ориентации стала синхронность действий наблюдателей и одновременность измерений. При проведении актинометрических, теплофизических, микроклиматических тепловизионных измерений были привлечены студенты, проходившие производственную практику. Экспериментальные инструментальные измерения скорости движения воздуха выполнялись в оконных проемах помещений квартир на уровне 9 этажа 16-этажных зданий, не загороженных летними помещениями, и в межкомнатных дверных проемах. Одновременно осуществлялись

Табл. 1. Модель тепловизионных съемок стен фасадов многоэтажных зданий

Table 1. Model of thermal imaging surveys of walls of facades of multistorey buildings

Ориентация Orientation	Общий вид застройки General view of the built-up area	Наблюдение через телевизор FLIR TG165, ч Surveillance via FLIR TG165 TV, h			Месторасположение зданий в застройке Location of buildings in the built-up area
		8:00	13:00	19:00	
Термический режим фасада восточной ориентации Thermal regime of the east-facing façade					
Термический режим фасада западной ориентации Thermal regime of the west-facing façade					
Термический режим фасада южной ориентации Thermal regime of the south-facing façade					

замеры скорости ветра на территории реальной жилой застройки, прилегающей к экспериментальным зданиям.

Для оценки результатов эксперимента проанализированы гигиенические и строительные нормативы и рекомендуемые отечественными и зарубежными исследователями параметры верхней границы комфорта температуры в жилище для теплого периода года:

- температура воздуха дневная 27–28 °С;
- температура воздуха ночная 22–26 °С;
- подвижность воздуха в пределах 0,2 м/с.

С целью изучения процесса аэрации помещений квартир за счет теплового напора, формируемого при условии инсоляции фасадов, были проведены инструментальные замеры следующих показателей микроклимата:

- температуры поверхности стен, воздуха в помещениях и пристенном слое по высоте в 16-этажных жилых зданий широтной и меридиональной ориентации;

- силы и направления пристенного конвективного потока по высоте инсолируемых и затененных стен исследуемых зданий;

- скорости движения воздуха в характерных точках у оконного проема смежных помещений и дверного проема между помещениями квартир.

В результате натуральных экспериментальных измерений установлено, что инсолируемые восточная, западная и южные стены фасада нагревались до 65 °С и более до 70 °С, в то время как теневая южная стена прогревалась только до 32 °С, что свидетельствует о разнице в температуре инсолируемых и затененных стен зданий и их чередовании в течение светового дня в зависимости от условия солнечного облучения. При этом температура пристенного слоя воздуха у стен инсолируемого фасада на уровне карниза достигала 70 °С, в теневой зоне — 30–35 °С. Температура воздуха в помещениях, обращенных к облучаемому фасаду, при закрытом режиме эксплуатации квартир доходила до 32–34 °С, в помещениях теневой стороны — до 28–30 °С. Эти высокие температуры

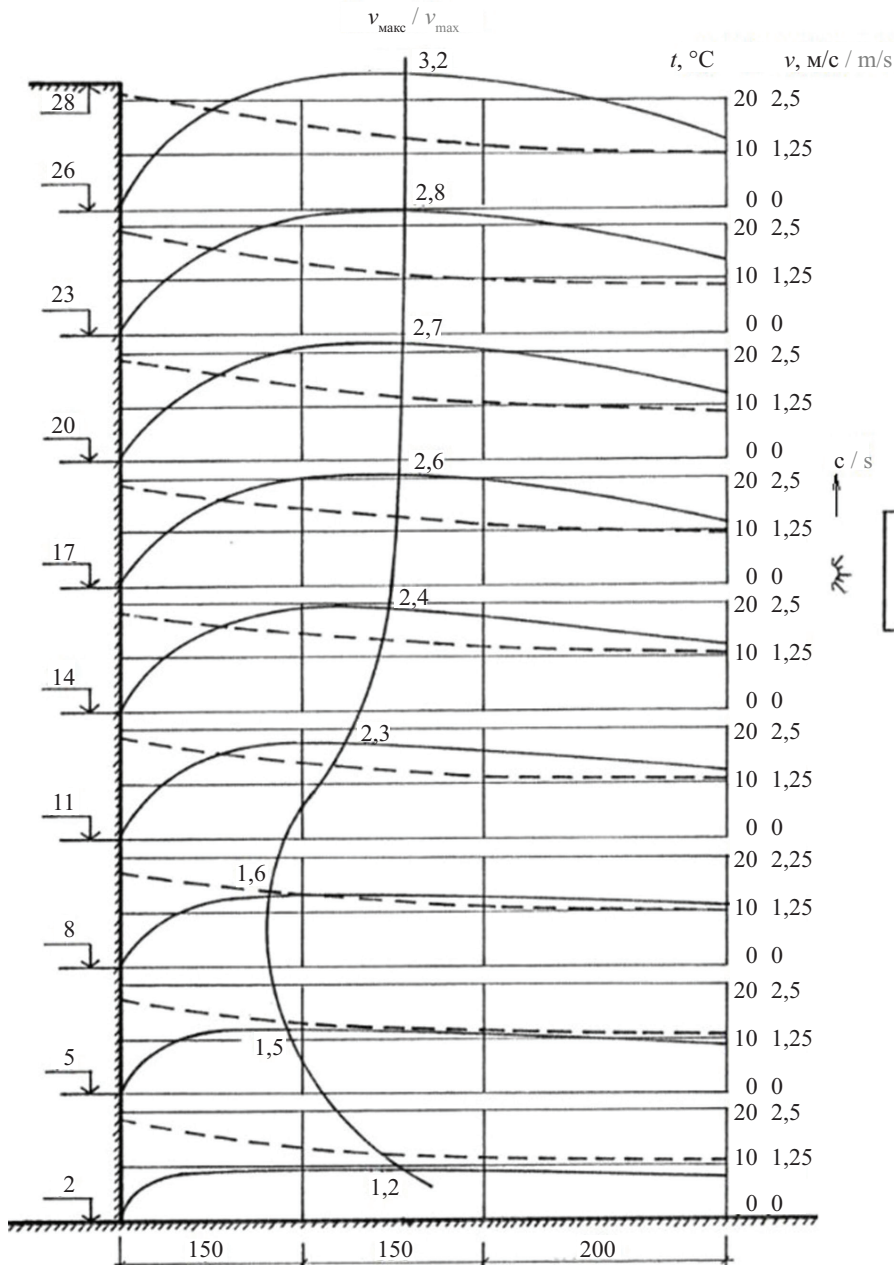


Рис. 3. Модель профиля скорости $_$ и температуры $_$ восходящего потока в пристенном слое воздуха по высоте, м, стены здания западной ориентации и прилегающей территории при инсоляции 18 ч

Fig. 3. Model of the velocity $_$ and temperature $_$ profile of the ascending flow in the near-wall air layer along the height (m) of the west-facing wall of a building and the adjacent territory during 18-hour insolation

на всех этажах превышают верхнюю границу теплового комфорта и вызывают явление «духоты». Возле инсолируемой стены наблюдалось образование мощного восходящего воздушного конвективного потока со скоростью до 2,8–3,0 м/с, в то время как у теневой стороны фиксировались нисходящие потоки со скоростью до 0,6 м/с при максимальной температуре наружного воздуха 40–42 °С.

Следует отметить, что в период исследования температурно-влажностного и ветрового режима в квартирах температурный градиент не превышал 1–1,5 °С.

При закрытом режиме эксплуатации квартир в утренние часы (10:00) скорость движения воздуха в помещениях, ориентированных на запад, составляет 0,08 м/с, а в помещениях восточной ориентации — 0,1 м/с, при средней температуре воздуха 26 °С. В середине дня (14:00) скорость воздуха в помещениях западного направления увеличивается до 0,12 м/с, а в восточных — до 0,51 м/с, при средней температуре воздуха 29 °С. В вечернее время (17:00) скорость движения воздуха в помещениях, ориентированных на запад, составляет 0,15 м/с, а на восток — 0,16 м/с, при средней температуре воздуха 32 °С. Это приво-

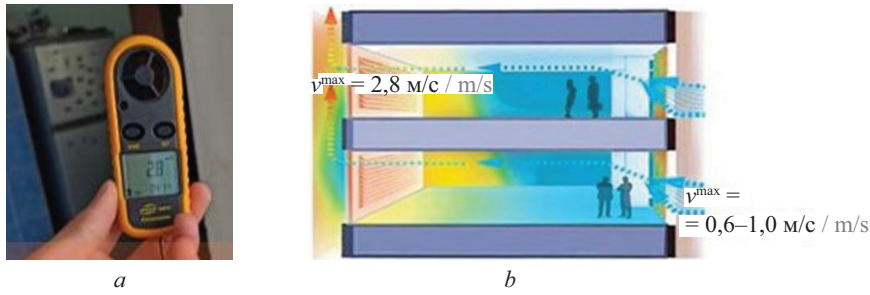


Рис. 4. Инструментальный замер (а) и схема (b) аэрации квартир при открытом режиме эксплуатации за счет термогравитационной конвекции

Fig. 4. Instrumental measurement (a) and layout (b) of aeration in apartments in the open mode of operation due to thermo-gravitational convection

дит к дискомфортному температурному и аэрационному режиму во второй половине дня.

При открытом режиме эксплуатации квартир (в утренние, вечерние и ночные периоды) наблюдалось движение относительно прохладного воздуха из помещений, обращенных к теневому фасаду, в сторону помещений, ориентированных на инсолируемый фасад. Далее воздушный поток, проходя через оконные проемы, сливался с общим конвективным потоком пристенного слоя облучаемого фасада (см. рис. 4).

На основе анализа результатов натурных измерений средней скорости движения воздуха в квартирах исследуемых зданий отмечаются следующие схемы проветривания:

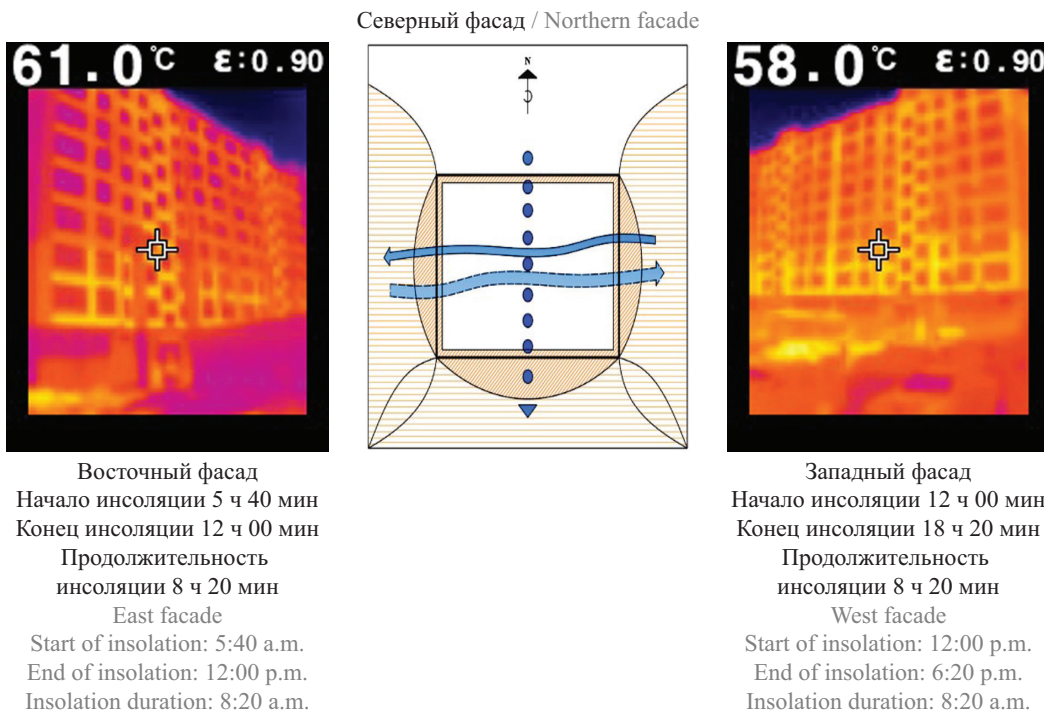
- в квартирах со сквозным проветриванием — 1,4–1,6 м/с;
- в квартирах с боковым проветриванием — 0,8–1,2 м/с;
- в квартирах с односторонним проветриванием — 0,3–0,4 м/с;

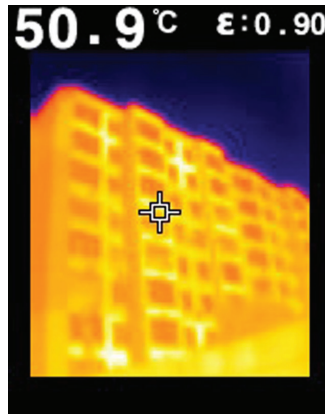
- в квартирах со сквозным проветриванием — до 2 м/с и имитацией бокового проветривания — 1–1,2 м/с.

Натурные измерения продемонстрировали, что повышение скорости движения воздуха на 1–2 м/с приводит к снижению теплового эквивалента температуры воздуха на 2–3 °С. Охлаждающий эффект воздушной среды в помещениях изучаемых квартир, который влияет на тепловое состояние человека, можно оценить на основе данных об охлаждающем эффекте ветра гигиенических исследований. Эти сведения позволяют определить, как различные скорости ветра способствуют изменению температуры и, следовательно, комфортности микроклимата в помещениях.

Охлаждающий эффект может составить:

- при скорости ветра 0,1 м/с — отсутствует;
- при скорости 0,25 м/с — 0,5 °С;
- при скорости 1,5 м/с — 4 °С;
- при скорости 3 м/с — 6 °С;
- при скорости 5 м/с — 7 °С.





Начало инсоляции 8 ч 30 мин
 Конец инсоляции 15 ч 30 мин
 Продолжительность
 инсоляции 7 ч 00 мин
 Start of insolation: 8:30 a.m.
 End of insolation: 3:30 p.m.
 Duration of insolation: 7:00 a.m.







Рис. 5. Модель аэрации помещения зданий за счет теплового напора:  — зона тепло-ветрового возмущения от инсолируемой стены;  — зона тепло-ветрового возмущения от инсолируемой придомовой территории;  — направление воздухообмена

Fig. 5. Model of aeration of the premises of buildings due to thermal pressure:  — zone of heat-wind disturbance from the insolated wall;  — zone of heat-wind disturbance from the insolated adjacent territory;  — direction of air exchange

Эта информация показывает, как увеличение скорости ветра влияет на степень охлаждения окружающей среды.

При скорости ветра 1,5 м/с тепловой эквивалент может составить:

- при температуре 21 °С — 5 °С;
- при температуре 32 °С — 2,5 °С;
- при температуре 43 °С — 1 °С, что соответ-

ствует снижению воздействия температуры воздуха соответственно на 5; 2,5 и 1 °С.

В итоге отмечаются аэродинамические и микроклиматические преимущества сквозного проветривания по сравнению с другими схемами проветривания квартир. Именно поэтому, согласно требованиям современного нормирования, сквозное проветривание является обязательным для всего IV строительно-климатического района СНГ и России, а также для территорий экваториальных стран с доминирующим теплым климатом.

В рассматриваемых жилых зданиях с архитектурно-планировочной структурой лестничные клетки фактически играют роль шахты вертикального проветривания, способствуют переносу воздуха по вертикали и тем самым интенсифицирует проветривание квартир.

Подытоживая результаты натурных исследований, необходимо отметить, что в целом аэрационный режим квартир оказывается интенсивным и превышающим верхний гигиенически допустимый предел значений внутренней подвижности воздуха.

Анализ результатов натуральных экспериментальных исследований естественной аэрации квартир дал возможность разработать основные положения теоретического расчета системы термогравитационной вентиляции жилых зданий.

Ранее автором были детально изучены микроклиматические и теплофизические процессы теплозащитной конструктивной оболочки и в связи с тепловой воздушной оболочкой зданий, на основе которых разработана физико-математическая модель тепло-ветровых процессов в пристенном слое воздуха при инсоляции стен фасадов зданий с различной ориентацией. Эта модель позволяет изучать взаимодействие температуры и скорости воздуха, а также их влияние на микроклимат в помещениях, что способствует улучшению проектирования систем вентиляции и кондиционирования.

В соответствии с предыдущими результатами исследований автора физических процессов в пристенном микроклиматическом слое воздуха с целью разработки теоретического положения термогравитационной вентиляции рассматриваются два помещения жилого здания с открытыми окнами на инсолируемом и теневом фасадах, а также с открытой дверью между ними. В данной модели левое окно на теневом фасаде с площадью S_1 используется для притока воздуха (инфильтрации), а правое окно на инсолируемом фасаде с площадью S_3 — для оттока и вытяжки (эксфильтрации). Площадь двери составляет S_2 .

Для количественной оценки термического проветривания применяется методика воздухообмена, изложенная в трудах Э.И. Рэттера [25], которая для нашего случая будет иметь следующую последовательность.

В рассматриваемых трех проемах (окна и дверь) давление при формировании теплового потока в пристенном микроклиматическом слое воздуха будет зависеть от множества факторов, таких как температура воздуха, разница температур между внутренней и внешней средой, а также конструктивно-физические свойства самих проемов. В частности:

- для окна на теневом фасаде (S_1), которое работает на приток воздуха (инфильтрацию), давление будет определяться температурной разницей между внутренним воздухом и наружным холодным воздухом. Этот поток будет направлен в помещение;
- для окна на инсолируемом фасаде (S_2), функционирующем на отток и вытяжку (эксфильтрацию), давление будет определяться более высокой температурой воздуха в помещении по сравнению с наружным. Это создаст давление, направленное наружу;
- для двери (S_3), соединяющей два помещения, давление будет зависеть от разницы в температуре и скорости движения воздуха между этими помещениями. Воздушный поток будет направлен в сторону с более низким давлением, что приведет к естественному воздухообмену между помещениями.

Таким образом, в каждом из этих проемов тепловой поток и направление воздушных потоков будут зависеть от температурных градиентов и давления в разных точках системы:

$$P_1 = H_1 g (\rho_{в1} - \rho_{н}^t); \quad (1)$$

$$P_2 = H_0 g (\rho_{в2} - \rho_{в1}); \quad (2)$$

$$P_3 = H_1 g (\rho_{н}^н - \rho_{в2}). \quad (3)$$

Дневной ход теплового напора у инсолируемой и теневой стены, являющийся функцией теплового потока стеновой конструкции, показывает изменения теплового воздействия на стены в течение дня. На рис. 6 представлено, как тепловой напор изменяется в зависимости от времени суток.

Для инсолируемой стены тепловой напор будет более выраженным в дневное время, когда солнечное излучение оказывает наибольшее воздействие, приводя к максимальному прогреву поверхности стены. В то время как на теневой стене напор будет значительно ниже, поскольку она не подвергается прямому солнечному облучению, и ее температура будет оставаться более стабильной в течение дня.

Рис. 6 иллюстрирует эти изменения теплового напора в зависимости от времени суток, что важно для понимания термогравитационных процессов и вентиляции в помещении.

Модель теплового напора у стен разной ориентации описывает динамику конвективных потоков вблизи фасадов зданий в зависимости от солнечной инсоляции, температуры и других факторов. Тепловой напор при этом зависит от нескольких ключевых факторов: ориентации стен, условий инсоляции фасадов, температурных градиентов, тепловых потоков стеновых конструкций.

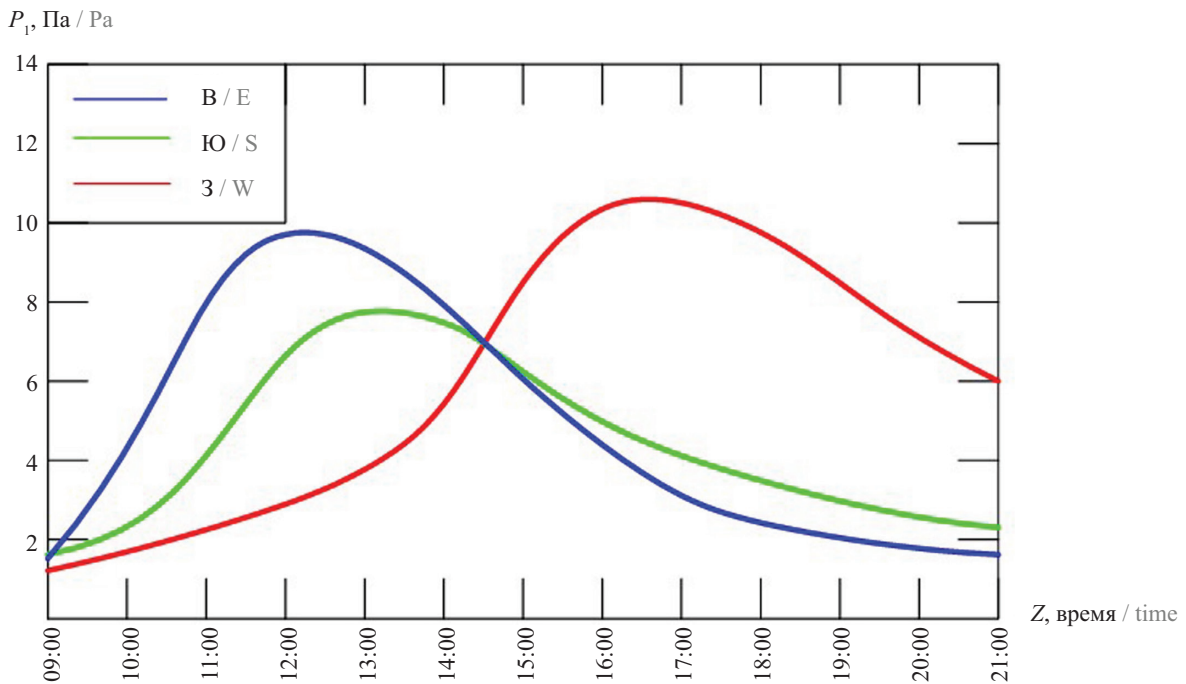


Рис. 6. Модель теплового напора у стен разной ориентации

Fig. 6. Model of thermal pressure near walls facing different directions

Сложим первое (1) и третье (3) равенства поэлементно. Обозначим полученную сумму $P_1 + P_3$ через P_3 :

$$P_0 = P_1 + P_3 = H_1 g \left[(\rho_{в1} - \rho_{н}^{\tau}) + (\rho_{н}^{\mu} - \rho_{в2}) \right]. \quad (4)$$

Для расчета избыточного давления, преобразуя в кинетическую энергию воздуха при входе через левый приточный проем, используются уравнения, основанные на законах аэродинамики и термодинамики. С учетом потери давления при входе из уравнений (1) и (3) получаем уравнение для приточного левостороннего проема. Это уравнение позволяет определить скорость воздушного потока на выходе из оконного проема, принимая во внимание потерю давления при входе и трансформацию избыточного давления в кинетическую энергию:

$$H_1 g (\rho_{в1} - \rho_{н}^{\tau}) = (1 - j) \frac{\rho_{в1} v_1^2}{2g}, \quad (5)$$

где $j \frac{\rho_{в1} v_1^2}{2g}$ — потеря давления на входе, Па; v — скорость воздушного потока в левом приточном проеме 1. Откуда:

$$v_1 = \sqrt{\frac{1}{1 + j_1}} \cdot \sqrt{2gH_1 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{н}^{\tau}}{\rho_{в1}}\right)}. \quad (6)$$

Скорость воздушного потока в среднем межкомнатном дверном проеме составляет:

$$v_2 = \sqrt{\frac{1}{1 + j_2}} \cdot \sqrt{2gH_0 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{в1}}{\rho_{в2}}\right)}. \quad (7)$$

Скорость воздушного потока в правом вытяжном оконном проеме:

$$v_3 = \sqrt{\frac{1}{1 + j_3}} \cdot \sqrt{2gH_1 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{в2}}{\rho_{н}^{\mu}}\right)}, \quad (8)$$

где j_1, j_2, j_3 — коэффициенты аэродинамического сопротивления для приточных и вытяжных оконных проемов, а также дверного проема, варьируются в зависимости от их геометрии и конструкции.

Масса воздуха, протекающая через проемы 1, 3 и 2 в одну секунду:

$$G_1 = A_1 \rho_{в1} F_1 \sqrt{\frac{1}{1 + j_1}} \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta T_1}{T_{в1}}} \cdot \sqrt{H_1}; \quad (9)$$

$$G_2 = A_2 \rho_{в2} F_2 \sqrt{\frac{1}{1 + j_2}} \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta T_2}{T_{в2}}} \cdot \sqrt{H_0}; \quad (10)$$

$$G_3 = A_3 \rho_{н}^{\mu} F_3 \sqrt{\frac{1}{1 + j_3}} \cdot \sqrt{\frac{2g\Delta T_3}{T_{н}^{\mu}}} \cdot \sqrt{H_1}, \quad (11)$$

где A_1, A_3 и A_2 — коэффициенты сжатия струи;

$$\sqrt{\frac{1}{1 + j_1}} = \mu_1, \sqrt{\frac{1}{1 + j_3}} = \mu_3, \sqrt{\frac{1}{1 + j_2}} = \mu_2 \text{ — коэффициенты}$$

расхода для рассматриваемых проемов, обозначены как $\mu_1 = \mu_3 = \mu_2 = 0,68$. Для расчета массы инфильтрационного воздуха, поступающего через эти проемы, кг/с, можно воспользоваться следующим уравнением:

$$G_1 = \mu_1 \rho_{в1} F_1 \sqrt{2g \frac{\Delta T_1}{T_{в1}}} \sqrt{H_1} \quad (12)$$

для массы эксфильтрационного воздуха используется та же формула, которая применяется для инфильтрационного воздуха, кг/с:

$$G_3 = \mu_3 \rho_{н}^{\mu} F_3 \sqrt{2g \frac{\Delta T_3}{T_{н}^{\mu}}} \sqrt{H_1}; \quad (13)$$

$$G_2 = \mu_2 \rho_{в2} F_2 \sqrt{2g \frac{\Delta T_2}{T_{в2}}} \sqrt{H_0}. \quad (14)$$

Решение задачи по определению площадей отверстий при заданном воздухообмене (уравнения (9)–(11)) выполняется, предположив, что:

- формула (9) дает воздухообмен для одного окна;
- формула (10) — для другого типа проема, двери;
- формула (11) — для вентиляционного проема, окна с другими характеристиками.

Обычно для расчета площади отверстий можно использовать зависимости, основанные на уравнениях, которые связывают скорость потока, плотность воздуха и площадь проема.

Наибольший воздухообмен, как указано, наблюдается для оконного проема 3, расположенного на инсолируемом фасаде, с максимальным массовым расходом воздуха. Это связано с тем, что такие проемы чаще всего подвержены сильному тепловому напору, который создает более высокий воздухообмен.

Таким образом, для определения точных площадей отверстий при заданном воздухообмене требуется подставить данные о расходе воздуха и скорости потока в соответствующие формулы.

Площадь оконного проема для эксфильтруемого воздуха в первом приближении может быть рассчитана по следующей формуле:

$$F = \frac{G_{\text{макс}}}{\mu_1 \rho_{в1} \sqrt{gH_1 \frac{\Delta T_1}{T_{в1}}}}. \quad (15)$$

Для оценки инфильтрационного (входного) и эксфильтрационного (выходного) воздуха в помещениях с несколькими окнами на различных фасадах, а также для определения дисбаланса между притоком и вытяжкой через открытые проемы можно воспользоваться методикой, предложенной В.П. Ти-

товым и соавт.³ Данная методика основывается на расчетах, которые учитывают влияние различных факторов, таких как ориентация окон, разница температур между внешней и внутренней средой, а также скорость движения воздуха через проемы.

Примерная схема оценки дисбаланса между притоком и вытяжкой включает определение воздухообмена через каждый оконный проем, оценку влияния температурных и ветровых условий, построение уравнений для баланса притока и вытяжки, коррекцию на потери давления и определение дисбаланса.

Если приток и вытяжка не сбалансированы (например, из-за разных размеров окон, температуры и ветровых условий), это может привести к недостаточному воздухообмену в помещении, что влияет на комфорт и микроклимат. Чтобы достичь оптимального воздухообмена, нужно корректировать размеры, формы окон.

В естественной аэрации помещений конструктивные особенности окон играют ключевую роль в обеспечении необходимого воздухообмена и поддержании комфортного микроклимата. Различные типы окон, такие как одностворчатые, двухстворчатые и трехстворчатые, а также наличие фрагм и форточек влияют на эффективность вентиляции. Также важно учитывать способы открытия окон, которые могут быть горизонтальными (по часовой стрелке или против часовой стрелки) или вертикальными. Примером влияния положения створки на расход воздуха является следующий случай: если окно с нижнеподвесной створкой открыто на $k = 2$ см,

³ Титов В.П., Сазонов Э.В., Краснов Ю.С., Новожилов В.И. Курсовое и дипломное проектирование по вентиляции гражданских и промышленных зданий : учебное пособие для вузов. М. : Стройиздат, 1985. 208 с.

то расход воздуха может составлять от 20 до 50 м³/ч. В случае открытия окна с вращающейся створкой на $d = 6$ см расход воздуха может варьироваться от 60 до 170 м³/ч (рис. 7).

Таким образом, можно более точно рассчитать дисбаланс притока и вытяжки для различных оконных проемов с учетом тепловых факторов, что позволяет эффективно проектировать системы вентиляции и обеспечивать оптимальные условия микроклимата в помещениях.

Современные условия жизни в городах значительно влияют на качество воздуха в помещениях. Городской житель проводит около 90 % своего времени в закрытых пространствах. Экологические исследования показывают, что воздух внутри помещений в 4–6 раз загрязненнее и в 8–10 раз токсичнее, чем уличный воздух. Это обусловлено накоплением различных загрязнителей в закрытых помещениях, где системы вентиляции часто не обеспечивают необходимую очистку.

По данным Научно-исследовательского института экологии человека и гигиены окружающей среды им. А.Н. Сысина, в обычной квартире может находиться до 150 различных видов химических испарений. Эти испарения могут исходить от множества источников, таких как лаки и краски, мебельные клеи, материалы из ДСП, бытовая химия, а также антропоксины — продукты жизнедеятельности человека и домашних животных.

Кроме того, около 90 % заболеваний приобретается именно внутри помещений. Это подчеркивает важность поддержания качественного воздуха в жилых и рабочих пространствах для здоровья человека.

В жилых зданиях, где отсутствует регулярное проветривание, невозможно создать микроклимат, приближенный к зоне комфорта. Поэтому для боль-

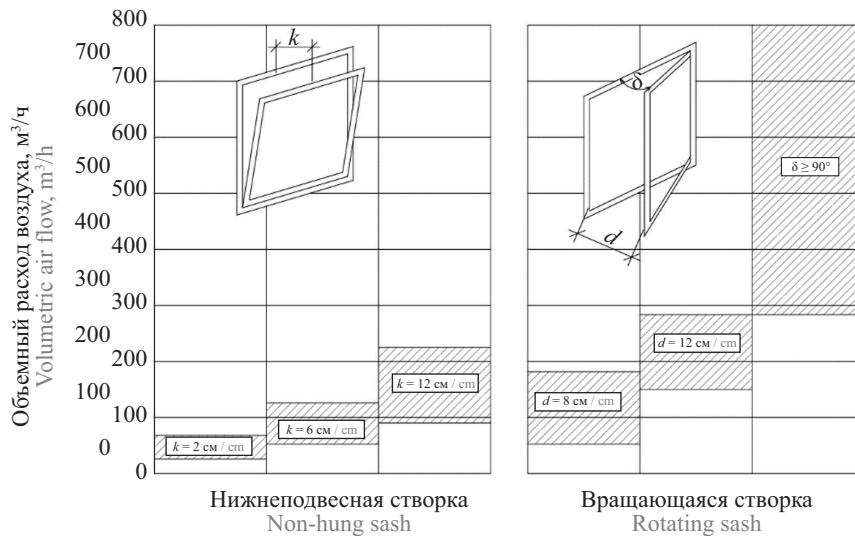


Рис. 7. Кратность воздухообмена

Fig. 7. Air exchange rate

ших городов кратность воздухообмена в помещениях должна составлять не менее 1,31 1/ч, что было подтверждено в ходе натурных исследований автора. Результаты показывают, что в помещениях, ориентированных как по широте, так и по меридиану, благодаря тепловому напору при открытом режиме эксплуатации подвижность воздуха достигает комфортного уровня.

Поводя итог результатам солнечного анализа, натурального экспериментального исследования и теоретического положения, необходимо отметить:

1) установлено, что условия системы термогравитационной вентиляции отвечают гигиеническим требованиям проветривания исследуемых помещений. Значения скорости движения воздушного потока находятся в пределах комфорта, основные характеристики которой определяют эффективность термогравитационной вентиляции в поддержании чистоты воздуха и стабильной температуры;

2) уточнено, что тепловой режим в помещениях с различной ориентацией в течение дня играет важную роль в создании комфортных условий для проживания. По наблюдениям температура воздуха в утренние часы во всех помещениях (северной, южной, восточной и западной ориентации) приближается к верхнему пределу комфортной зоны. Это означает, что в данное время температура воздуха находится на границе комфортного уровня для человека.

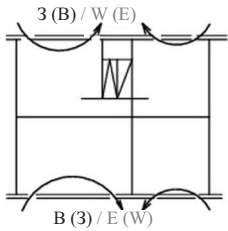
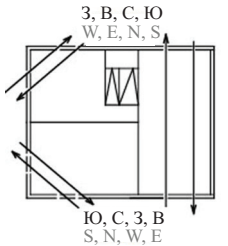
В середине дня и в вечерние часы температура воздуха в помещениях восточной, южной и западной ориентации в зависимости от условий инсоляции превышает пределы комфортной зоны. В этой

связи проходит перекачивание более прохладного воздуха через оконные проемы со стороны теневых помещений в сторону солнечных, включая использование эффективной системы термогравитационной вентиляции. Этот процесс аэрации помещений продолжается до тех пор, пока не устанавливается термический баланс между неравномерно нагреваемыми стеновыми конструкциями и помещениями. Температура воздуха в помещениях северной ориентации в течение светового дня остается в пределах комфортного уровня, поскольку они не подвержены прямому солнечному воздействию. В этом случае воздух перекачивается через оконные проемы северного теневого помещения в сторону южного, облучаемого помещения. При инфильтрационных и эксфильтрационных процессах скорость воздуха в помещениях составляет 1,0–1,5 м/с, что определяет эффективность системы термогравитационной вентиляции в квартирах жилых зданий.

Определены условия инсоляции зданий различной ориентации и количество тепла, вносимого солнечной энергией в теплый период года, что является важным фактором, формирующим тепловую среду с температурами воздуха в помещениях до 32–34 °С. При возникновении теплового дискомфорта во внутренней среде естественная аэрация, обусловленная тепловым напором и охлаждающим эффектом движущегося воздуха в квартирах, играет значительную роль в определении теплового состояния человека. Результативность этих процессов представлена в табл. 2, 3.

Табл. 2. Схемы ориентации зданий и проветривания квартир

Table 2. Building orientation and apartment aeration patterns

Принцип проветривания Aeration principle	Графическое изображение схемы проветривания Graphic representation of the aeration pattern	Характеристика Characteristic	Эффективность Efficiency
Одностороннее в меридиональных сечениях One-way aeration in meridional sections		Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости одной стены, и энергоактивности пластики фасадов The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the effect of convection due to window openings located in the plane of one wall, as well as the energy activity of the facade shape	Низкое Low
Сквозное и угловое в торцевых сечениях Through and angular in the end sections		Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости взаимно перпендикулярных стен The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of mutually perpendicular walls	Среднее Medium

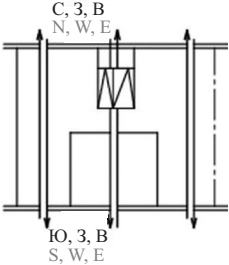
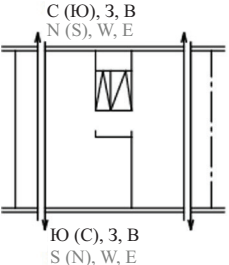
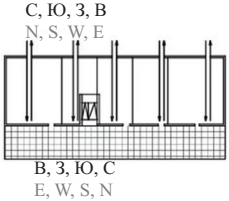
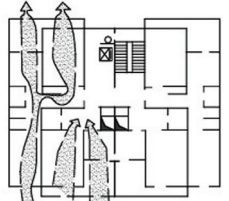

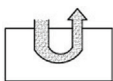
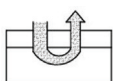
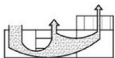
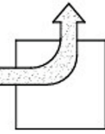
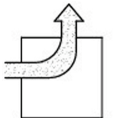
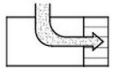
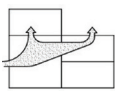
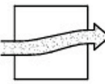

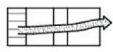
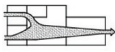
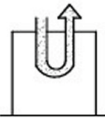
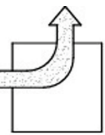
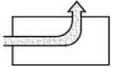
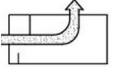
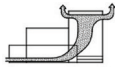
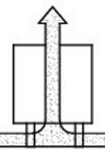
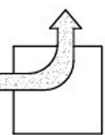
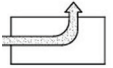
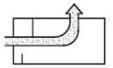
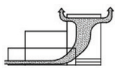
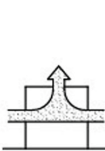

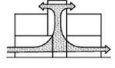
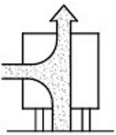
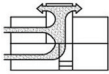

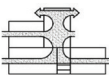
<p>Принцип проветривания Aeration principle</p>	<p>Графическое изображение схемы проветривания Graphic representation of the aeration pattern</p>	<p>Характеристика Characteristic</p>	<p>Эффективность Efficiency</p>
<p>Сквозное больших и через лестничную клетку малых квартир в широтных секциях ограниченной ориентации Through aeration of large apartments and aeration of small apartments through the stairwell in latitudinal sections of the limited orientation</p>		<p>Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости противоположных стен The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of opposite walls</p>	<p>Хорошее Good</p>
<p>Сквозное в широтных секциях неограниченной ориентации Through aeration in latitudinal sections of unlimited orientation</p>		<p>Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости противоположных стен The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of opposite walls</p>	<p>Хорошее Good</p>
<p>Сквозное в галерейных домах Through aeration in gallery houses</p>		<p>Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости противоположных стен The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of opposite walls</p>	<p>Хорошее Good</p>
<p>Сквозное и вертикальное проветривание Through and vertical aeration</p>		<p>Принцип работы естественной приточно-вытяжной вентиляции основан на эффекте конвекции за счет оконных проемов, расположенных в плоскости противоположных стен и вентиляционных шахт The operating principle of natural supply and exhaust ventilation is based on the convection effect due to window openings located in the plane of opposite walls and ventilation shafts</p>	<p>Среднее Medium</p>

Табл. 3. Классификация проветривания жилой квартиры

Table 3. Classified aeration in a residential apartment

Характеристика проветривания Aeration characteristics		Графическое изображение проветривания Graphic representation of aeration	Схема проветривания Aeration pattern		Квартиры Apartments
с учетом принципа действия taking into account the principle of operation	с учетом расположения проемов taking into account the location of openings		Комнаты Rooms		
			непосредственное direct	опосредственное indirect	
Горизонтальное Horizontal	Боковое Г–Б Lateral Н–Л				
	Угловое Г–У Angular Н–А				
	Сквозное Г–С Through Н–Т				
Вертикальное Vertical	Боковое В–Б Lateral V–Л		-	-	-
	Угловое В–У Angular V–А				
	Сквозное В–С Through V–Т		-	-	-
Горизонтальное + вертикальное Horizontal + vertical	Г–Б + В–Б Г–У + В–Б Н–Л + V–Л Н–А + V–Л				
	Г–Б + В–У Г–У + В–У Г–С + В–Б Г–С + В–У Н–Л + V–А Н–А + V–А Н–Т + V–Л Н–Т + V–А		-		

Характеристика проветривания Aeration characteristics		Графическое изображение проветривания Graphic representation of aeration	Схема проветривания Aeration pattern		
с учетом принципа действия taking into account the principle of operation	с учетом расположения проемов taking into account the location of openings		Комнаты Rooms		Квартиры Apartments
			непосредственное direct	опосредственное indirect	
Горизонтальное + вертикальное Horizontal + vertical	Г–Б + В–С Г–У + В–С Н–Л + V–Т Н–А + V–Т		–	–	
	Г–С + В–С Н–Т + V–Т		–	–	

Примечание: Г — горизонтальное; Б — боковое; У — угловое; С — сквозное; В — вертикальное.

Note: H is horizontal; L is lateral; A is angular; T is through; V is vertical.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа проведенных исследований установлено, что термогравитационный вид вентиляции является пассивным, он используется при тепловом напоре в штилевых условиях для естественной вентиляции помещений здания. В то же время это наиболее простой, дешевый, а поэтому распространенный способ пассивного охлаждения и вентиляции помещений.

Эффективность системы термогравитационной вентиляции при проектировании и эксплуатации зданий напрямую зависит от множества факторов, включая как архитектурно-строительные особенности, так и климатические условия. Оптимизация работы системы аэрации квартир и помещений требует комплексного подхода и внимательного учета следующих аспектов: ориентация зданий, планировочное решение квартиры и помещений, высота помещений, расположение и размеры вентиляционных отверстий, каналов и оконных блоков, устройства фрамуг и форточек и прочего.

Выявлено, что в городах с продолжительными периодами малых ветровых и штилевых условий термогравитационная вентиляция является эффективным решением для поддержания комфортного воздушного режима в зданиях. Это решение способствует снижению энергозатрат и улучшению качества воздуха в помещениях, что непосредственно связано с решением проблемы экологии жилища. Особенно эффективна термогравитационная венти-

ляция в зданиях с низкими потребностями в вентиляции, а также в тех климатических условиях, где температурные различия между внутренним и наружным воздухом значительно выражены. В таких случаях конвективный поток в пристенном слое воздуха становится основным средством обеспечения проветривания помещений созданием воздушного потока без применения внешних энергозатрат.

Разработано теоретическое положение термогравитационной вентиляции зданий, которое позволяет прогнозировать естественную аэрацию квартир в жилых зданиях. Это положение основывается на принципах термогравитационной вентиляции, использующих температурные различия для создания воздушных потоков, что делает систему особенно эффективной в определенных климатических условиях и архитектурных решениях.

Установлены положительные предпосылки термогравитационной вентиляции помещений за счет теплового напора:

- автономная работа;
- сочетание вентиляции при ветровом напоре;
- основывается на естественных климатических принципах;
- высокая эффективность в экстремальных штилевых условиях;
- экономия энергоресурсов.

Недостатки:

- необходимость температурной разницы;
- зависит от силы и направления ветра;

- риск загрязнения поступающего воздуха;
- возможность загрязненного поступающего воздуха извне;
- меньшая эффективность по сравнению с ветровой вентиляцией.

В целом термогравитационная вентиляция является эффективным и экологически чистым реше-

нием для обеспечения естественного воздухообмена в жилых зданиях, особенно в условиях маловетреной погоды и штилей. Однако ее эффективность может зависеть от ряда факторов, включая температурные колебания, скорость ветра и качество внешнего воздуха, которые должны учитываться на этапе проектирования жилых зданий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. М. : Книга по Требованию, 2021. 284 с.
2. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. М. : АВОК-пресс, 2015. 193 с.
3. Гиясов А.И., Мирзоев С.М., Абдулрахман К. Моделирование тепло-ветровых процессов пристенного слоя ограждающих конструкций зданий при инсоляции // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 3. С. 285–297. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.285-297. EDN ICZMOO.
4. Голенков А.В. Проблемы использования естественной вентиляции в жилых домах // Инновации в строительстве – 2022 : мат. Междунар. науч.-практ. конф. 2022. С. 108–109. EDN EUYNQJ.
5. Giyasov A.I., Mirzoev S.M. Innovative facade systems for buildings in hot climate conditions // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 263. P. 04009. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304009
6. Maher D., Hana A., Arjmand J.T., Issakhov A., Sammouda H., Sheremet M. et al. Effect of inlet/outlet on thermal performance of naturally ventilated building // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2021. Vol. 16. Issue 4. Pp. 1348–1362. DOI: 10.1093/ijlct/ctab055
7. Таймасов С.Р. Система вентиляции жилого дома // Дневник науки. 2023. № 1 (73). EDN IZVYCI.
8. Zhangabay N., Giyasov A., Ibraimova U., Tursunkululy T., Kolesnikov A. Construction and climatic certification of an area as a prerequisite for development of energy-efficient buildings and their external wall constructions // Construction Materials and Products. 2024. Vol. 7. Issue 5. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-1
9. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines // Energy. 2019. Vol. 180. Pp. 838–857. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.053
10. Awbi H.B., Hatton A. Natural convection from heated room surfaces // Energy and Buildings. 1999. Vol. 30. Issue 3. Pp. 233–244. DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00004-3
11. Гиясов А.И., Мирзоев С.М. Модель тепло-ветрового режима наружных стен зданий с жалюзийным солнцезащитным устройством // Строительство и реконструкция. 2024. № 1 (111). С. 3–13. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-3-13. EDN PVPLEY.
12. Федоров В.В., Федоров М.В., Левиков А.В., Ханьгин Д.А. Оптимизация воздушно-теплового режима реконструируемых зданий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Строительство. Электротехника и химические технологии. 2020. № 1 (5). С. 38–44. EDN JFCJFT.
13. Клеверова В., Бакиржанкызы А. Теплообмен при свободной конвекции // Global Science and Innovations: Central Asia. 2021. Т. 7. № 1 (12). С. 111–115. EDN UNLHGX.
14. Zhangabay N., Bakhbergen S., Aldiyarov Zh., Tursunkululy T., Kolesnikov A. Analysis of thermal efficiency of external fencing made of innovative ceramic blocks // Construction Materials and Products. 2024. Vol. 7. Issue 3. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-1. EDN ICGQRW.
15. Бодров М.В., Кузин В.Ю., Прыткова Е.М., Юланова А.Ф. О факторах эффективной работы систем естественной вентиляции // Жилищное строительство. 2022. № 1–2. С. 3–8. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-1-2-3-8. EDN WBCKAK.
16. Рымаров А.Г., Хаванов П.А., Тутков Д.Г. Основы формирования локальных температурных зон в помещении // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2021. № 1. С. 54–63. EDN CZSMHQ.
17. Mingotti N., Chenvidyakarn T., Woods A.W. The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin façade // Building and Environment. 2011. Vol. 46. Issue 4. Pp. 807–823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.09.015
18. Береговой А.М., Шурыгин И.С. Мероприятия по тепловой защите зданий и энергосбережение в системе естественной вентиляции помещений // Вестник ПГУАС: Строительство, наука и образование. 2023. № 2 (17). С. 4–8. EDN LHPHIR.
19. Фам Тхи Хонг Тхам, Соловьев А.К., Корнеев С.С. A field study on effects of openings on thermal performance of natural cooling efficiency for atrium buildings // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. № 2. С. 149–158. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158
20. Клявлин М.С., Халфина Д.А., Клявлиня Я.М., Талипов Р.А. Проектирование систем вентиляции зданий с учетом влияния воздухопроницаемости ограждающих конструкций // Электронный науч-

ный журнал Нефтегазовое дело. 2020. № 2. С. 26–38. DOI: 10.17122/ogbus-2020-2-26-38. EDN OFNVZR.

21. Шилкин Н.В., Бродач М.М., Шонина Н.А. Регулируемые приточные устройства в квартирах многоэтажных жилых зданий // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-снабжение и строительная теплофизика. 2022. № 7. С. 22–31. EDN PBYLSS.

22. Nemova D.V., Kotov E.V., Daurov Z.S., Olshevskiy V.Ia. Energy Efficiency of Closed Cavity Facades // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. Vol. 93. Issue 8. P. 9305. DOI: 10.18720/CUBS.93.5. EDN LOQOLU.

23. Шилкин Н.В., Бродач М.М. Проветривание квартир: архитектурно-планировочные решения и выбор оптимального режима // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, тепло-снабжение и строительная теплофизика. 2022. № 2. С. 34–39. EDN OYDPJC.

24. Al-Dumaini O.A.H.Sh., Velichkin V.A. Development of a mathematical model for testing the natural ventilation: a case study for the yemeni residents // Engineering Journal of Don. 2024. No. 6 (114). Pp. 595–605. EDN DTBOEW.

25. Петтер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. М. : Стройиздат, 1984. 294 с.

Поступила в редакцию 21 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 12 августа 2025 г.

Одобрена для публикации 12 августа 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: Адхам Иминжанович Гиясов — доктор технических наук, профессор; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID: 0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru.

REFERENCES

1. Elterman V.M. *Ventilation of food products*. Moscow, Book on Demand, 2021; 284. (rus.).

2. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. *Energy-efficient buildings*. Moscow, AVOK-press, 2015; 193. (rus.).

3. Giyazov A.I., Mirzoev S.M., Abdulrahman K. Modeling thermal and wind processes in the near-wall layer of building envelopes subjected to insolation. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2022; 17(3):285-297. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.285-297. EDN ICZMOO. (rus.).

4. Golenkov A.V. Problems of using natural ventilation in residential buildings. *Innovations in construction – 2022 : proceedings of the international scientific and practical conference*. 2022; 108-109. EDN EUYNQJ. (rus.).

5. Giyasov A.I., Mirzoev S.M. Innovative facade systems for buildings in hot climate conditions. *E3S Web of Conferences*. 2021; 263:04009. DOI: 10.1051/e3sconf/202126304009

6. Maher D., Hana A., Arjmand J.T., Issakhov A., Sammouda H., Sheremet M. et al. Effect of inlet/outlet on thermal performance of naturally ventilated building. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2021; 16(4):1348-1362. DOI: 10.1093/ijlct/ctab055

7. Taymasov S.R. Residential house ventilation system. *Science Diary*. 2023; 1(73). EDN IZYVCI. (rus.).

8. Zhangabay N., Giyasov A., Ibraimova U., Tursunkululy T., Kolesnikov A. Construction and climatic certification of an area as a prerequisite for development

of energy-efficient buildings and their external wall constructions. *Construction Materials and Products*. 2024; 7(5). DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-5-1

9. Rezaeiha A., Montazeri H., Blocken B. On the accuracy of turbulence models for CFD simulations of vertical axis wind turbines. *Energy*. 2019; 180:838-857. DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.053

10. Awbi H.B., Hatton A. Natural convection from heated room surfaces. *Energy and Buildings*. 1999; 30(3):233-244. DOI: 10.1016/S0378-7788(99)00004-3

11. Giyasov A.I., Mirzoev S.M. Model of heat-wind regime of building walls with lout sun protection device. *Building and Reconstruction*. 2024; 1(111):3-13. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-3-13. EDN PPVLEY. (rus.).

12. Fedorov V.V., Fedorov M.V., Levikov A.V., Hanygin D.A. Optimization of the air-heating mode reconstructed buildings. Bulletin of Tver State Technical University. Series: Construction. *Electrical engineering and chemical technologies*. 2020; 1(5):38-44. EDN JFCJFT. (rus.).

13. Klewerova V., Bakirzhankyzy A. Heat transfer during free convection. *Global Science and Innovations: Central Asia*. 2021; 7(1):(12):111-115. EDN UNLHGX. (rus.).

14. Zhangabay N., Bakhbergen S., Aldiyarov Zh., Tursunkululy T., Kolesnikov A. Analysis of thermal efficiency of external fencing made of innovative ceramic blocks. *Construction Materials and Products*. 2024; 7(3). DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-1. EDN ICGQRW.

15. Bodrov M.V., Kuzin V.Y., Prytkova E.M., Yulanova A.F. On the factors of effective operation of natural ventilation systems. *Housing Construction*. 2022; 1-2:3-8. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-1-2-3-8. EDN WBCKAK. (rus.).
16. Rymarov A.G., Khavanov P.A., Titkov D.G. Fundamentals of the formation of local temperature zones in a room. *AVOK*. 2021; 1:54-63. EDN CZSMHQ. (rus.).
17. Mingotti N., Chenvidyakarn T., Woods A.W. The fluid mechanics of the natural ventilation of a narrow-cavity double-skin façade. *Building and Environment*. 2011; 46(4):807-823. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.09.015
18. Beregovoy A.M., Shurygin I.S. Measures for thermal protection of buildings and energy saving in the system of natural ventilation of rooms. *PGUAS Bulletin: construction, science and education*. 2023; 2(17):4-8. EDN LHPHIR. (rus.).
19. Hong-Tham T. Pham, Solovyev A.K., Korneev S.S. A field study on effects of openings on thermal performance of natural cooling efficiency for atrium buildings. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022; 17(2):149-158. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.2.149-158 (rus.).
20. Klyavlin M.S., Khalfina D.A., Klyavlina Ya.M., Talipov R.A. Design of building ventilation systems taking into account the influence of air permeability of fencing constructions. *Oil and Gas Business*. 2020; 2:26-38. DOI: 10.17122/ogbus-2020-2-26-38. EDN OFNVZR. (rus.).
21. Shilkin N.V., Brodach M.M., Shonin N.A. Adjustable supply devices in apartments of multi-storey residential buildings. *AVOK*. 2022; 7:22-31. EDN PBYLSS. (rus.).
22. Nemova D.V., Kotov E.V., Daurov Z.S., Olsheskiy V.Ia. Energy Efficiency of Closed Cavity Fasad. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020; 93(8):9305. DOI: 10.18720/CUBS.93.5. EDN LOQOLU.
23. Shilkin N.V., Brodach M.M. Ventilation of apartments: architectural and planning solutions and selection of the optimal mode. *AVOK*. 2022; 2:34-39. EDN OYDPJC. (rus.).
24. Al-Dumaini O.A.H.Sh., Velichkin V.A. Development of a mathematical model for testing the natural ventilation: a case study for the yemeni residents. *Engineering Journal of Don*. 2024; 6(114):595-605. EDN DTBOEW.
25. Retter E.I. *Architectural and construction aerodynamics*. Moscow, Stroyizdat, 1984; 294. (rus.).

Received March 21, 2025.

Adopted in revised form on August 12, 2025.

Approved for publication on August 12, 2025.

BIONOTES: **Adham I. Giyazov** — Doctor of Technical Sciences, Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9800-5187, ID RSCI: 979847, Scopus: 57202817395, ResearcherID: T-8804-2018, ORCID:0000-0002-2471-5065; adham52@mail.ru.