

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-114-128>

УДК 697.9

## Оценка эффективности энергосберегающей системы организованной приточно-вытяжной вентиляции для многоэтажных зданий с низким уровнем тепловой защиты

Магистры В. А. Зафатаев<sup>1)</sup>, С. В. Ланкович<sup>1)</sup>,  
кандидаты техн. наук, доценты Т. И. Королёва<sup>1)</sup>, А. М. Нияковский<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2022  
Belarusian National Technical University, 2022

**Реферат.** С использованием разработанного авторами метода технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа исследованы режимы эксплуатации централизованной приточно-вытяжной системы организованной вентиляции, в которой подогрев приточного воздуха осуществляется за счет теплоты солнечного излучения и теплоты удаляемого из помещений воздуха. Представлены результаты оценки тепловой и экономической эффективности такой системы вентиляции для многоэтажных зданий. Выполнено сравнение расходов тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции за счет применения предлагаемой системы вентиляции для двух вариантов зданий – с уровнем тепловой защиты ограждающих конструкций, отвечающим современным нормативным требованиям (здания с теплотреблением до 130 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год)), и для аналогичного по планировочной структуре здания, но с ограждающими конструкциями, уровень утепления которых соответствует зданиям постройки до 1993 г. (здания с теплотреблением до 260 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год)). Определены температурные условия, при которых возникает необходимость включения в работу устройств дополнительного (пикового) подогрева приточного воздуха, когда тепловой потенциал солнечного излучения и вторичных энергетических ресурсов недостаточен для обеспечения расчетной температуры приточного воздуха. Для рассматриваемой системы вентиляции установлено наличие влияния термических сопротивлений ограждающих конструкций здания на показатели термодинамической и экономической эффективности предлагаемого решения. Определены климатические условия, при которых утилизация теплоты удаляемого воздуха в системе вентиляции технически оправдана и экономически целесообразна. Результаты выполненных исследований могут быть использованы при определении путей тепловой модернизации зданий с традиционными системами отопления и вентиляции.

**Ключевые слова:** воздухоприемный щелевой канал, солнцеприемная панель, тепловой поток, излучение, конвекция, вентиляция, энергосбережение

**Для цитирования:** Оценка эффективности энергосберегающей системы организованной приточно-вытяжной вентиляции для многоэтажных зданий с низким уровнем тепловой защиты / В. А. Зафатаев [и др.] // *Наука и техника*. 2022. Т. 21, № 2. С. 114–128. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-114-128>

## Effectiveness Assessment of Energy-Saving System of Organized Supply and Exhaust Ventilation for Multi-Storey Buildings with Low Level Thermal Protection

V. A. Zafatayeu<sup>1)</sup>, S. V. Lankovich<sup>1)</sup>, T. I. Karalioua<sup>1)</sup>, A. M. Niyakovskii<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** By usage of the technical and economic calculation method developed by the authors for installations with recuperative-type heat exchangers, the operational modes of the centralized supply and exhaust system of organized ventilation,

### Адрес для переписки

Нияковский Александр Мечиславович  
Полоцкий государственный университет  
ул. Блохина, 29,  
211440, г. Новополоцк, Республика Беларусь  
Тел.: +375 214 59-95-40  
a.m.niyakovski@pdu.by

### Address for correspondence

Niyakovskii Aleksandr M.  
Polotsk State University  
29, Blokhin str.,  
211440, Novopolotsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 214 59-95-40  
a.m.niyakovski@pdu.by

in which the supplying air is heated by the solar radiation heat and the heat of the air removed from the premises, have been investigated in the paper. The paper presents results of the thermal and economic efficiency assessment of such ventilation system for multi-storey buildings. A comparison of the thermal energy consumption for the needs of heating and ventilation through the use of the proposed ventilation system has been made for two variants of buildings – with the thermal protection level of enclosing structures that meets modern regulatory requirements (buildings with heat consumption up to 130 kW·h/(m<sup>2</sup>·year)), and for a building similar in terms of planning structure, but with enclosing structures, the insulation level of which corresponds to buildings built before 1993 (buildings with heat consumption up to 260 kW·h/(m<sup>2</sup>·year)). The temperature conditions have been determined under which it becomes necessary to turn on the operation of devices for additional (peak) heating of the supply air, when the thermal potential of solar radiation and secondary energy resources is insufficient to provide the calculated temperature of the supply air. For the ventilation system under consideration, it has been established that the thermal resistance of the building envelope influences the indicators of the thermodynamic and economic efficiency of the proposed solution. The climatic conditions under which the utilization of the exhaust air heat in the proposed ventilation system is technically justified and economically expedient have been determined. The results of the research performed can be used for determination of the thermal modernization ways of buildings with traditional heating and ventilation systems.

**Keywords:** air-intake slot-hole channel, solar panel, heat flow, radiation, convection, ventilation, energy saving

**For citation:** Zafatayeu V. A., Lankovich S. V., Karaliova T. I., Niyakovskii A. M. (2022) Effectiveness Assessment of Energy-Saving System of Organized Supply and Exhaust Ventilation for Multi-Storey Buildings with Low Level Thermal Protection. *Science and Technique*. 21 (2), 114–128. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-114-128> (in Russian)

## Введение

Повышение эффективности использования первичных энергетических ресурсов – важная задача для мировой экономики, которая также актуальна для Республики Беларусь. Согласно статистическим данным [1], наиболее энергоемким в нашей стране является жилищный сектор, а доминирующим видом топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в конечном потреблении, как следует из рис. 1, 2, служит тепло-

вая энергия. На ее долю в жилищном секторе приходится около 38 % конечного потребления ТЭР [1].

Жилищный фонд Беларуси – это 98 % от всех типов зданий в стране [2]. К 2000 г. в республике потребление энергии на отопление и вентиляцию жилых помещений составляло 120–260 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год) отапливаемой площади за отопительный период в зависимости от архитектурно-планировочного решения здания (рис. 3).



Рис. 1. Конечное потребление топливно-энергетических ресурсов по секторам национальной экономики

Fig. 1. Final consumption of fuel and energy resources by the national economy sectors

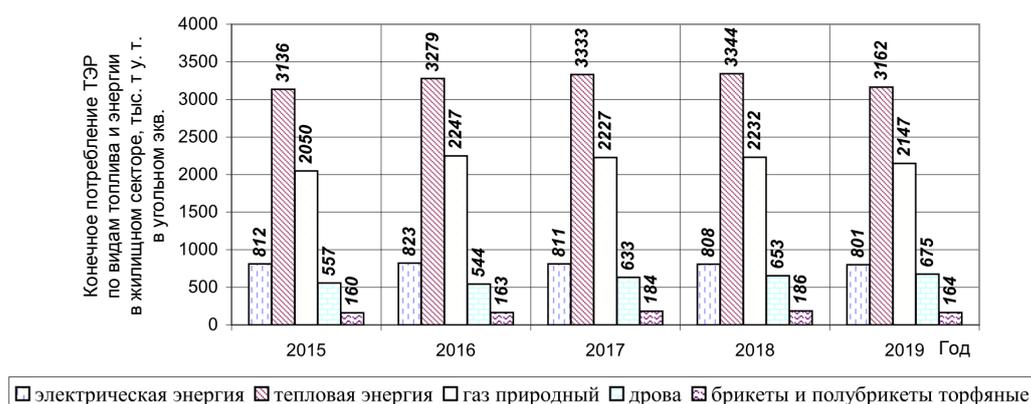


Рис. 2. Конечное потребление топливно-энергетических ресурсов по видам топлива и энергии в жилищном секторе

Fig. 2. Final consumption of fuel and energy resources by types of fuel and energy in the residential sector

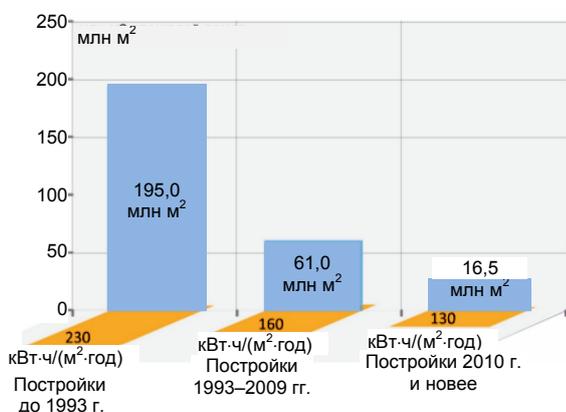


Рис. 3. Распределение площадей домов жилого фонда по удельному расходу тепловой энергии в Республике Беларусь [5]

Fig. 3. Distribution of areas of housing stock by specific consumption of thermal energy in the Republic of Belarus [5]

Для сравнения, в Швеции и Финляндии, в которых более суровый климат, этот показатель 140 кВт·ч/(м²·год) [3], в Дании – 88 кВт·ч/(м²·год), в Германии – 85 кВт·ч/(м²·год) [4]. В настоящее время доля жилых зданий с недостаточным по современным нормам уровнем тепловой защиты ограждающих конструкций составляет 93 %.

Причина высокого уровня потребления тепловой энергии – не только низкое качество тепловой защиты ограждающих конструкций зданий, но и технологически устаревшее, часто физически изношенное оборудование, применяемое в традиционных системах отопления и вентиляции. Для повышения эффективности использования энергии в жилищном секторе требуются разработка и внедрение энергоэффективных мероприятий, технологий и процес-

сов, которые позволят задействовать потенциал вторичных и возобновляемых ТЭР для нужд теплообеспечения [6], например, с помощью устройств для утилизации теплоты воздуха, удаляемого системами вентиляции. Исследования эффективности подобных систем вентиляции и определение величины снижения затрат ТЭР на нужды отопления и вентиляции за счет их внедрения представлены в [7–10]. Однако результаты и выводы, содержащиеся в этих работах, ограничиваются особенностями и назначением объектов, на которых внедряются системы вентиляции, а также конструктивными особенностями схем предлагаемых систем. Кроме того, в упомянутых работах не в полной мере изучены аэродинамические и тепловлажностные процессы, имеющие место в потоках приточного и удаляемого воздуха, а приведенные в них расчеты сводятся к получению абсолютных величин затрат энергии по укрупненным и/или удельным показателям. Вместе с тем, согласно опыту проектирования систем вентиляции, обеспечивать воздухообмен в многоквартирных жилых домах предпочтительнее за счет централизованных вентиляционных систем, а в малоэтажных и частных – за счет индивидуальных приточно-вытяжных вентиляционных установок [11].

Для решения этих проблем предлагается система централизованной организованной приточно-вытяжной вентиляции [12, 13], в которой подогрев приточного воздуха осуществляется в щелевом канале остекленного фасада под действием солнечного излучения (рис. 4).

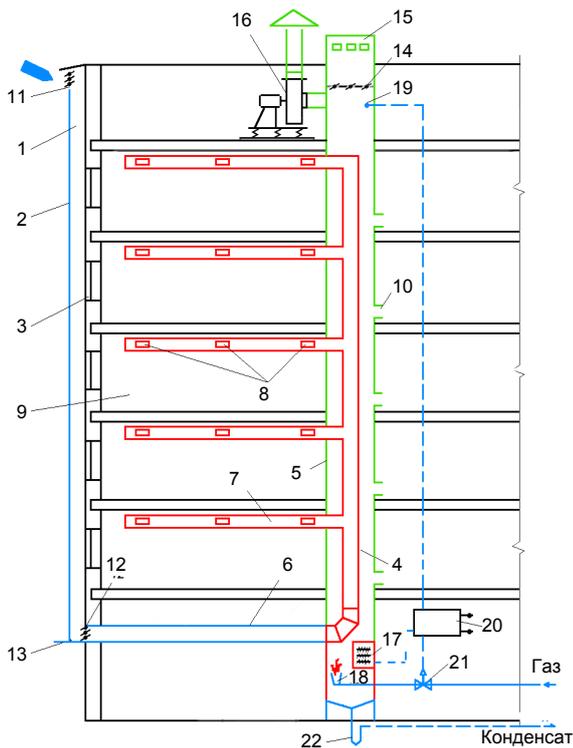


Рис. 4. Схема приточно-вытяжной системы вентиляции многоэтажного здания: 1 – щелевой канал; 2 – навесной светопрозрачный вентилируемый фасад; 3 – наружное вертикальное стеновое ограждение с окнами; 4, 6 – вертикальный и горизонтальный приточные воздуховоды; 5 – теплообменная камера вытяжной шахты; 7 – приточные горизонтальные распределительные воздуховоды; 8 – регулируемые приточные решетки; 9 – вентилируемые помещения; 10 – поквартирные вытяжные патрубки; 11 – регулируемая воздухозаборная решетка; 12 – утепленный клапан; 13 – воздушный клапан навесного фасада; 14 – воздушный клапан на вытяжной шахте; 15 – вытяжная шахта; 16 – вытяжной вентилятор; 17 – электронагреватель; 18 – газовая горелка; 19 – датчик температуры; 20 – электронный блок устройства подогрева; 21 – электромагнитный клапан подачи газа; 22 – поддон для сбора конденсата с конденсатоотводом через гидрозатвор

Fig. 4. Scheme of supply and exhaust ventilation system of multi-storey building: 1 – slotted channel; 2 – hinged translucent ventilated facade; 3 – external vertical wall enclosure with windows; 4, 6 – vertical and horizontal supply air ducts; 5 – heat exchange chamber of exhaust shaft; 7 – supply horizontal distribution ducts; 8 – adjustable supply grilles; 9 – ventilated apartments; 10 – apartment exhaust pipes; 11 – adjustable air intake grille; 12 – insulated valve; 13 – air valve of hinged facade; 14 – air valve on the exhaust air shaft; 15 – exhaust air shaft; 16 – exhaust air fan; 17 – electric heater; 18 – gas burner; 19 – temperature sensor; 20 – electronic unit of heating device; 21 – solenoid valve for gas supply; 22 – pan for collecting condensate with a condensate drain through a water seal

При движении по щелевому каналу воздух получает теплоту солнечного излучения, в том числе теплоту эффективного излучения наружной поверхности стены. Также в системе осуществляется передача теплоты от удаляемого из помещений воздуха к приточному воздуху в теплообменнике типа «труба в трубе». В случае отсутствия солнечного излучения либо его недостаточной интенсивности и соответствующей нехватки теплового потенциала удаляемого воздуха для догрева приточного воздуха до требуемой температуры в нижней части теплообменника оборудовано устройство подогрева, включающее электронагреватель и газовую горелку. В статье приведены исследования режимов работы данного технического решения.

#### Постановка задачи и описание методики исследования

Основной задачей исследования являлась разработка научно обоснованных рекомендаций для технико-экономического расчета и последующей эффективной эксплуатации предлагаемой системы вентиляции в климатических условиях Республики Беларусь. Для идентификации предметной области научного исследования рассматриваемую систему вентиляции целесообразно разделить на два основных последовательно соединенных блока согласно особенностям физических процессов, протекающих в системе. Первый блок – щелевой канал навесного вентилируемого фасада, второй – воздухо-воздушный теплообменник типа «труба в трубе».

Процессы тепло- и влагообмена, аэродинамики воздушных масс, происходящие в воздушных прослойках и вентилируемых фасадах, изучались рядом отечественных и зарубежных авторов [14–24]. Результаты и выводы этих работ ограничиваются областью типового применения вентилируемых фасадов со свободно-конвективными потоками воздуха, тогда как авторы данной статьи предлагают использовать воздушный щелевой канал, образованный навесной остекленной панелью фасада и наружной стеной здания, как обогреваемый за счет солнечного облучения участок с вынужденным движением в нем потока воздуха под действием поверхностных сил, создаваемых вентилятором.

Тепло- и влагообмен в воздухо-воздушных теплообменниках рекуперативного типа, применяемых в системах вентиляции зданий, исследован в [8, 25–28]. Результаты и выводы в этих работах распространяются на типовые конструкции теплообменников рекуперативного типа, в основном пластинчатые, с перекрестноточной схемой распределения теплоносителей. В предлагаемой же системе вентиляции конструкция теплообменника приточно-вытяжной шахты иная – это прямоточный теплообменник рекуперативного типа «труба в трубе». Процессы теплообмена в нем исследовали с применением разработанного авторами статьи численного метода технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа, который позволяет анализировать параметры режимов эксплуатации, определять обобщенные и локальные показатели термодинамической и экономической эффективности, влияние конструктивных характеристик поверхности теплообмена на эти показатели.

В статье представлены результаты сравнения расходов тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции за счет применения предлагаемой системы вентиляции для двух вариантов зданий – с уровнем тепловой защиты ограждающих конструкций, отвечающим современным нормативным требованиям (здания с теплопотреблением до 130 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год)), и для аналогичного по планировочной структуре здания, но с ограждающими конструкциями, уровень утепления которых соответствует домам постройки до 1993 г. (с теплопотреблением до 260 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год)). Как было отмечено выше, зданий с таким недостаточным уровнем утепления в Беларуси подавляющее большинство (около 195 млн м<sup>2</sup>). Кроме того, в статье приведены значения требуемых расходов энергии в устройстве дополнительного (пикового) подогрева приточного воздуха по обоим вариантам зданий при различных температурах наружного воздуха в отопительный период, произведено сравнение величин затрат на нужды отопления и вентиляции при работе предлагаемой системы вентиляции и традиционных систем отопления и вентиляции, в которых отсутствует возможность использования энергии возобновляемых источников и вторичных ресурсов.

Необходимость подобного сравнения продиктована в первую очередь длительными сроками окупаемости работ по тепловой реновации зданий, построенных в советский период, и в целом, как показывает практика, экономической нерациональностью этих мероприятий в условиях, характерных для Беларуси. В мировой практике принято считать целесообразным повышение уровня тепловой защиты оболочки зданий, если рентабельность капиталовложений в тепловую изоляцию будет не менее 10 % за счет прибыли от сбережения тепловой энергии, т. е. при сроке окупаемости термореновации не более 10 лет [29]. В республике с установленными для жилищного сектора субсидируемыми тарифами на тепловую энергию, полученную от централизованных источников, покрываемыми не более 30 % экономически обоснованных затрат на ее выработку [30], сроки окупаемости термореновации увеличиваются в 3–4 раза. С одной стороны [31], повышение уровня тепловой защиты зданий дает эффект только при одновременном снижении потерь теплоты в системах вентиляции зданий, доля которых среди других теплопотерь растет вместе с увеличением термического сопротивления ограждающих конструкций и в зданиях с современным уровнем тепловой защиты доходит до 53 % [32]. С другой стороны, экономия энергии на нужды отопления и вентиляции за счет ужесточения норм и правил строительной теплотехники для вновь строящихся зданий не составит и 5 % в ближайшие 10 лет (при ежегодном приросте новых жилых площадей примерно на 1,5 % от существующих площадей) [3]. Таким образом, здания стареют быстрее, чем идет строительство новых и проводятся капитальный ремонт, модернизация или реконструкция ветхого и аварийного жилищного фонда.

Результаты расчетов эффективности рассматриваемой системы вентиляции для различных условий ее работы представлены в [12, 33]. Приведем описание основных принципов расчета, отражающих способ получения оценки тепловой и экономической эффективности системы вентиляции в двух случаях. Поступление теплоты от солнечной радиации не поддается упорядочиванию по часам суток и не зависит от температуры наружного воздуха (рис. 5) [12].

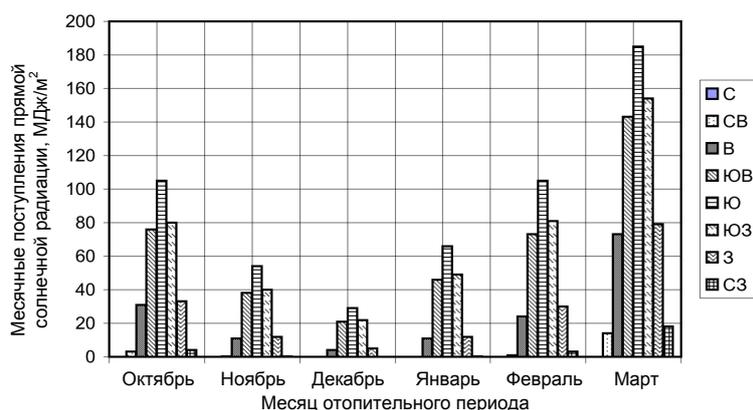


Рис. 5. Месячные поступления прямой солнечной радиации на вертикальную поверхность различной ориентации при средних условиях облачности в отопительный период (метеорологическая станция «Полоцк», по данным СНБ 2.04.02–2000)

Fig. 5. Monthly receipts of direct solar radiation on a vertical surface of various orientations under average cloudiness conditions during the heating season (by meteorological station “Polotsk”, according to BSB [Construction Standards of the Republic of Belarus] 2.04.02–2000)

Силикатное стекло, используемое в свето-прозрачных ограждающих конструкциях зданий, способно пропускать тепловую энергию от прямой и рассеянной солнечной радиации в зоне спектра видимых лучей и в ближнем инфракрасном диапазоне. Этот тепловой поток, проходя через стекло, поглощается различными поверхностями, которые в итоге становятся источниками инфракрасного излучения дальнего диапазона. Обычное стекло является экраном для излучения дальнего диапазона [12]. Таким образом, изменение температуры воздуха по высоте воздухоприемного щелевого канала определено на примере математической модели теплообмена в обогреваемой щели, образованной поверхностями с различными температурами (облучаемые солнцем стеклянный фасад и наружная поверхность стены здания) [34, 35].

Ширина и высота стекла навесного фасада приняты кратными ширине и высоте стеновой

панели одной жилой комнаты, а расчетный размер щели воздухоприемного канала – 5 см (входит в диапазон рекомендуемых для типовых воздушных прослоек [36]). Среднее по румбам значение суммарной солнечной радиации при средней облачности в отопительный период с октября по март включительно по данным табл. 3.15 СНБ 2.04.02–2000 для вертикальных поверхностей ограждений, ориентированных на В, ЮВ, Ю, ЮЗ и З, составляет для г. Полоцка  $I_{\text{ср}} = 223 \text{ Вт/м}^2$  [12]. Эта величина интенсивности принята в качестве расчетной и предельной для всего отопительного периода. Как было отмечено ранее [12, 33], определить эффективность использования энергии на нужды отопления и вентиляции для каждого месяца отопительного периода невозможно по причине отсутствия зависимости между месячной продолжительностью солнечного сияния и временем стояния температуры наружного воздуха (рис. 6, 7).

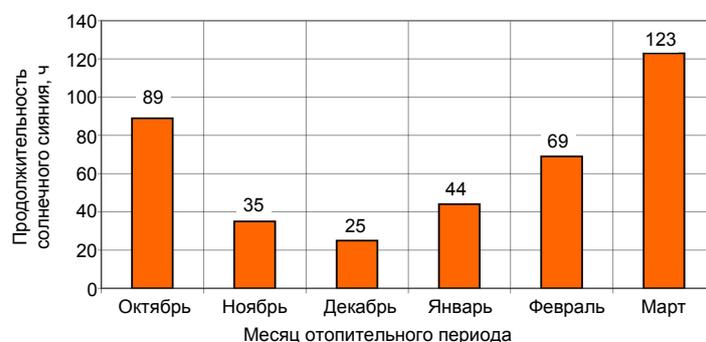


Рис. 6. Продолжительность солнечного сияния по г. Полоцку по месяцам отопительного периода (по данным СНБ 2.04.02–2000)

Fig. 6. Duration of sunshine, hours, in Polotsk town by months of the heating season (according to BSB 2.04.02–2000)

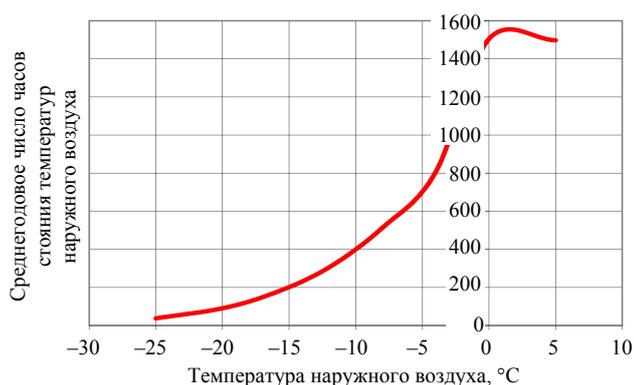


Рис. 7. Среднегодовое число часов стояния температур наружного воздуха по г. Полоцку (по данным СНБ 2.04.02–2000)

Fig. 7. Average annual number of hours of outside air temperatures standings in Polotsk town (according to BSB 2.04.02–2000)

Для решения указанной проблемы разработан следующий подход [12]: величину экономии энергии на нужды отопления и вентиляции здания по каждому месяцу определяли как долю максимально возможной экономии энергии на нужды отопления и вентиляции в отопительный период за счет работы предлагаемой системы вентиляции в зависимости от температуры наружного воздуха, где в качестве коэффициента пропорциональности использовали отношение продолжительности солнечного сияния в часах по каждому месяцу отопительного периода к количеству часов в соответствующем месяце отопительного периода. Таким образом, для Полоцка длительность солнечного сияния в октябре составила 10,7 % от времени работы системы вентиляции за этот месяц, в ноябре – 4,2, в декабре – 3,0, в январе – 5,3, в феврале – 8,3, в марте – 14,9 %.

Соппротивления теплопередаче принимали равными нормативным согласно СН 2.04.02–2020: для наружных стен современного здания с теплопотреблением до 130 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год) – 3,2 м<sup>2</sup>·°C/Вт, для заполнения оконных проемов – 1,0 м<sup>2</sup>·°C/Вт. Для здания с уровнем утепления, не отвечающим современным требованиям (с теплопотреблением до 260 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год)), принято сопротивление теплопередаче наружных стен 1,0 м<sup>2</sup>·°C/Вт, что типично, например, для стен из кирпича толщиной до 400 мм без слоя утеплителя; для заполнения оконных проемов принято сопротивление теплопереда-

че 0,42 м<sup>2</sup>·°C/Вт (двойное остекление в раздельных деревянных переплетах).

Расчетная температура приточного воздуха, подаваемого в помещения, принята во всех случаях одинаковой и равной 22 °C (верхний предел диапазона оптимальных значений для жилых помещений согласно ГОСТ 30494–2011). На самом деле, величина этой температуры должна быть переменной (определяемой по расчету) в зависимости от изменения температуры наружного воздуха, а мощность устройства дополнительного (пикового) подогрева, а также его включение и выключение в предлагаемой системе вентиляции должны управляться автоматически по сигналам датчика температуры, установленного в контрольном помещении. Очевидно, что при низких температурах наружного воздуха теплового потенциала воздуха в приточной струе с температурой 22 °C может попросту не хватить для обеспечения нужд отопления и вентиляции и поддержания нормируемого уровня температуры в помещениях только лишь за счет работы предлагаемой системы вентиляции. Поэтому в данном случае следует говорить о том, что в период экстремально низких температур наружного воздуха пиковый догрев воздуха в помещениях, в первую очередь с точки зрения санитарных требований, было бы более целесообразно осуществить за счет традиционной водяной системы отопления с отопительными приборами. Тем не менее это не означает, что предлагаемая система вентиляции не может справиться с обеспечением и поддержанием в помещениях нормируемой температуры воздуха в периоды экстремально низких температур.

Производительность предлагаемой системы вентиляции принята исходя из нормируемого количества приточного воздуха на 1 м<sup>2</sup> жилой площади, равного 3 м<sup>3</sup>/(ч·м<sup>2</sup>) согласно требованиям СН 3.02.01–2019 «Жилые здания». Для многоквартирных жилых домов типовых серий, применяемых в Республике Беларусь [37], воздухообмен одной жилой комнаты площадью пола 4 · 5 = 20 м<sup>2</sup> авторами статьи оценен как 3 · 20 = 60 м<sup>3</sup>/ч. Соответственно в девятиэтажном жилом здании система вентиляции должна обеспечивать воздухообмен девяти таких комнат: 9 · 60 = 540 м<sup>3</sup>/ч.

В проводимом исследовании исключены из рассмотрения воздухо- и паропроницаемость ограждающей конструкции, закрытой навесным остекленным фасадом, а также конвективный перенос водяных паров в щелевом канале в связи с пренебрежимо малым влиянием на теплообмен [38]. Влияние на тепловую неоднородность ограждающей конструкции стены опорных элементов навесного фасада не учитывали, поскольку натурными тепловизионными исследованиями [16] на стене не было выявлено регулярно повторяющихся температурных неоднородностей, связанных с опорными элементами вентилируемого фасада.

При наличии солнечного излучения интенсивностью  $I_{\text{ср}}$  количество воспринимаемой приточным воздухом лучистой теплоты определено исходя из значения тепловой эффективности существующих солнечных панелей, которая в настоящее время не превышает  $E = 0,14-0,17$  [36]. Коэффициент теплопропускания солнечного излучения стеклом навесной панели принят  $C_{\text{ст}} = 0,6$  [39]. Учтено загрязнение атмосферного воздуха, характерное для крупных городов, из-за чего воздушная среда имеет более высокую оптическую плотность, что является причиной ухудшения условий инсоляции. Кроме того, пылевые и сажевые микрочастицы, витающие в воздухе, способны оседать на поверхности светопрозрачных элементов зданий, снижая степень их свето- и теплопропускания. Солнечное излучение, частично пропущенное стеклом навесной панели, частично воспринятое потоком приточного воздуха, поглощается наружной стеной с коэффициентом поглощения  $A = 0,6$  [40]. Таким образом, количество отраженной от стены в поток воздуха вторичной радиационной теплоты составляет  $0,6 \cdot (1 - A) \cdot (1 - E)I_{\text{ср}}$ .

Плотность результирующего теплового потока при теплообмене излучением между стенкой и воздухом,  $\text{Вт}/\text{м}^2$  [41]:

$$q_{\text{изл.рез}} = \varepsilon'_{\text{ст}} (E_{\text{ст}} - E_{\text{г}}), \quad (1)$$

где  $\varepsilon'_{\text{ст}}$  – эффективная степень черноты поверхностей канала,  $\varepsilon'_{\text{ст}} = \frac{\varepsilon_{\text{ст}} + 1}{2}$ ;  $\varepsilon_{\text{ст}}$  – степень черноты стенок канала, принята 0,93 [12];  $E_{\text{ст}}$  – плотность потока излучения, поглощенного возду-

хом от стенок канала (складывается из части излучения, падающего на стеклянную панель навесного фасада, и излучения, отраженного от поверхности стены),  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $E_{\text{г}}$  – плотность потока собственного излучения воздуха при его температуре в воздухоприемном канале,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Лучистая теплота солнечного излучения проходит через светопрозрачные оконные конструкции и нагревает внутренние поверхности помещений, что учитывается дополнительно при расчете бытовых теплопоступлений,  $\text{Вт}$  [12]:

$$Q_{\text{быт.доп}} = 9 \cdot (1 - \eta) F_{\text{пом}} + C_{\text{стп}} C_{\text{ст}} (1 - E) F_{\text{ост}}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий способ регулирования тепловой нагрузки системы отопления здания (СН 4.02.03–2019, Приложение К), используется в расчете для здания с традиционными системами отопления и вентиляции, без автоматического регулирования;  $C_{\text{стп}}$  – то же теплопропускания стеклопакета, колеблется в пределах 0,30–0,75 [42], принят равным 0,60;  $F_{\text{пом}} = 4 \cdot 5 = 20 \text{ м}^2$ ,  $F_{\text{ост}} = 1,5 \cdot 2 = 3 \text{ м}^2$  – площадь пола помещения и остекления соответственно.

Количество теплоты, требуемой для нагрева инфильтрующегося воздуха, рассчитывается согласно методике СН 4.02.03–2019 (Приложение Е) и учитывается в тепловом балансе только для периода отсутствия солнечного излучения. При наличии солнечного излучения инфильтрующийся воздух подогревается за счет теплоты солнечной радиации и входит в тепловой баланс как теплопоступления [2]. При отсутствии навесного фасада расход теплоты на нагрев наружного воздуха при инфильтрации составляет по расчету  $Q_{\text{инф}} = 9151 \text{ Вт}$  [12].

В связи с вышеизложенным теплообмен в дневное время суток значительно отличается от теплообмена в ночное время суток, и уравнение теплового баланса принимает вид [12]:

– для периода без солнечного излучения,  $\text{Вт}$ :

$$\pm \Delta Q = Q_{\text{тр}}^{\text{ст}} + Q_{\text{тр}}^{\text{ок}} + Q_{\text{тр}}^{\text{пл}} + Q_{\text{тр}}^{\text{пт}} + Q_{\text{инф}} - Q_{\text{быт}}; \quad (3)$$

– для периода с наличием солнечного излучения,  $\text{Вт}$

$$\pm \Delta Q = Q_{\text{тр}}^{\text{ст}} + Q_{\text{тр}}^{\text{ок}} + Q_{\text{тр}}^{\text{пл}} + Q_{\text{тр}}^{\text{пт}} - Q_{\text{быт.доп}} - Q_{\text{конв}}; \quad (4)$$

где  $Q_{\text{тр}}^{\text{ст}}$ ,  $Q_{\text{тр}}^{\text{ок}}$ ,  $Q_{\text{тр}}^{\text{пл}}$ ,  $Q_{\text{тр}}^{\text{пт}}$  – трансмиссионные потери теплоты через стены, окна, перекрытие

подвала и покрытие (чердачное перекрытие), Вт;  $Q_{инф}$  – потери теплоты на нагрев инфильтрирующегося воздуха, Вт;  $Q_{быт}$ ,  $Q_{быт.доп}$  – бытовые тепловыделения и тепловыделения в помещениях с учетом аккумулированной теплоты внутренними поверхностям, Вт;  $Q_{конв}$  – конвективный тепловой поток от воздуха к стене в воздухоприемном канале, Вт;  $\pm \Delta Q$  – избытки («+») или недостатки («–») теплоты.

Экономия теплоты, Гкал, в случае наличия устойчивого солнечного излучения

$$\begin{aligned} \Delta Q = 8,6 \cdot 10^{-4} \cdot \left( Q_{тр}^{ст} + Q_{тр}^{ок} + Q_{тр}^{пл} + \right. \\ \left. + Q_{тр}^{пт} - Q_{быт.доп} - Q_{конв} \pm Q_{ТВТ} \right) z_{ч}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $Q_{ТВТ}$  – подогрев приточного воздуха в теплообменнике-утилизаторе типа «труба в трубе», кВт (знак «–» подставляется в случае необходимости включения устройства пикового подогрева приточного воздуха, «+» – наоборот);  $z_{ч}$  – время стояния температур наружного воздуха, ч.

Затраты теплоты, Гкал, в случае отсутствия солнечного излучения

$$\begin{aligned} Z_Q = 8,6 \cdot 10^{-4} \cdot \left( Q_{тр}^{ст} + Q_{тр}^{ок} + Q_{тр}^{пл} + Q_{тр}^{пт} + \right. \\ \left. + Q_{инф} - Q_{быт} \pm Q_{ТВТ} \right) z_{ч}. \end{aligned} \quad (6)$$

## Результаты исследования

В диапазоне температур наружного воздуха  $(-26) - (+8) \text{ } ^\circ\text{C}$  в отопительный период при устойчивом солнечном облучении на выходе из воздухоприемного канала воздух имеет на  $0,9 - 3,0 \text{ } ^\circ\text{C}$  более высокую температуру в здании с уровнем утепления, не отвечающим современным требованиям (далее – здание без термореновации), чем в современном здании (далее – здание с термореновацией) (рис. 8). Зависимость температуры воздуха на выходе из воздухоприемного канала от температуры наружного воздуха практически линейная. Причем, чем выше температура наружного воздуха, тем менее интенсивно подогревается воздух в воздухоприемном канале здания без термореновации. Интенсивность теплообмена по высоте щелевого канала снижается, в том числе вследствие уменьшения температурного напора между подогреваемым воздухом и температурой поверхности стены.

Требуемая величина догрева приточного воздуха после щелевого канала снижается при повышении температуры наружного воздуха, и при температурах наружного воздуха от  $(-5,9) \text{ } ^\circ\text{C}$  и выше включение устройства дополнительного подогрева воздуха не требуется для обоих сравниваемых зданий.

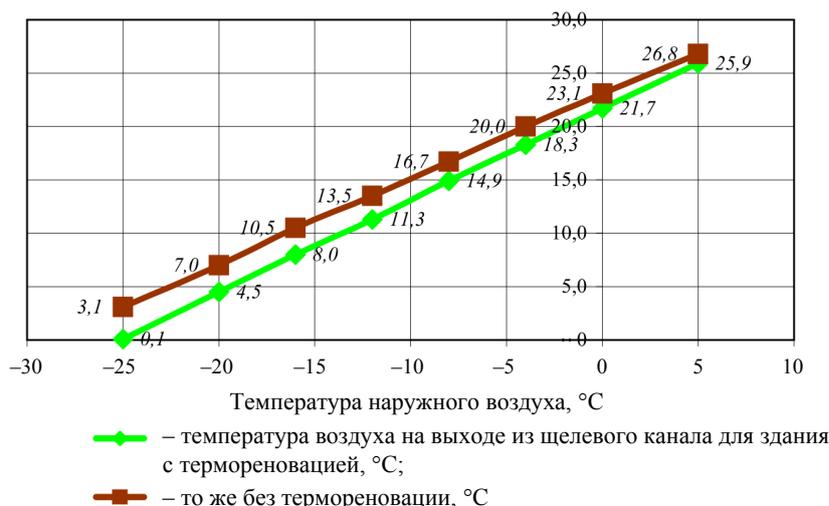


Рис. 8. Зависимость температуры воздуха на выходе из воздухоприемного канала от температуры наружного воздуха при разном уровне утепления здания

Fig. 8. Dependence of air temperature at the outlet of air intake duct on the outside air temperature at different levels of building insulation

При температурах наружного воздуха от  $(-1,9)$  °С и выше для обоих зданий догрев воздуха после щелевого канала вовсе не требуется. Как было отмечено в [12], для недопущения перегрева помещений в периоды, когда не требуется догрев воздуха после щелевого канала, удаление загрязненного воздуха из помещений следует производить по резервированным вентиляционным шахтам без утилизации теплоты удаляемого воздуха в теплообменнике «труба в трубе» приточно-вытяжной шахты. В том случае, если устройство дополнительного подогрева воздуха задействовано не будет, верхним температурным пределом для нагрева приточного воздуха в теплообменнике, расположенном в приточно-вытяжной шахте, будет температура вытяжного воздуха, удаляемого из помещений.

При движении по воздухоприемному каналу температура воздуха повышается и в какой-то момент становится выше, чем температура поверхности стены здания [12] (для рассматриваемого девятиэтажного здания это происходит на уровне 3–5 этажей). При этом направление конвективного теплового потока меняется на противоположное, в результате чего воздух при движении вниз начинает охлаждаться, отдавая стене теплоту в ходе конвективного теплообмена. Величина результирующего потока тепловой энергии, переносимой излучением, уменьшается медленнее, чем величина теплового потока, обусловленного конвективным теплообменом, и для здания без термореновации оказывается на 0,5–1,3 % меньше, чем для здания с термореновацией (меньшие значения соответствуют более высоким температурам наружного и подогреваемого в щелевом канале воздуха, и наоборот).

Во всем диапазоне температур наружного воздуха в отопительный период при устойчивом солнечном облучении величина конвективного потока от воздуха в щелевом канале к поверхности стены здания в 1,07–1,34 раза больше для здания с термореновацией, чем для здания без нее (рис. 9, 10), поскольку встречный тепловой поток от стены здания без термореновации частично снижает интенсивность охлаждения воздуха у поверхности этой стены (меньшие значения соответствуют более высо-

ким температурам наружного и подогреваемого в щелевом канале воздуха, и наоборот).

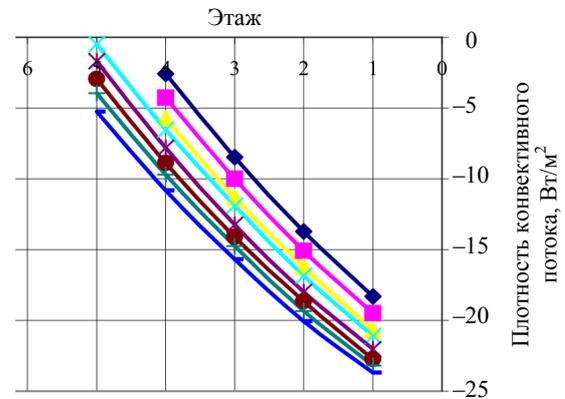


Рис. 9. Изменение плотности конвективного потока в воздухоприемном канале от воздуха к стене по этажам при наличии солнечного облучения для здания с термореновацией: —♦— при температурах минус 26–22 °С; —▲— минус 17,9–14,0 °С; —\*— минус 9,9–6,0 °С; —+— от минус 1,9 до плюс 2,0 °С; —■— минус 21,9–18,0 °С; —x— минус 13,9–10,0 °С; —●— минус 5,9–2,0 °С; —■— от плюс 2,1 до плюс 8,0 °С

Fig. 9. Changes in density of convective flow in air intake duct from air to wall along the floors of the building in the presence of solar irradiation for a building with thermal renovation: —♦— at temperatures of minus 26–22 °С; —▲— minus 17.9–14.0 °С; —\*— minus 9.9–6.0 °С; —+— from minus 1.9 to plus 2.0 °С; —■— minus 21.9–18.0 °С; —x— minus 13.9–10.0 °С; —●— minus 5.9–2.0 °С; —■— from plus 2.1 to plus 8.0 °С

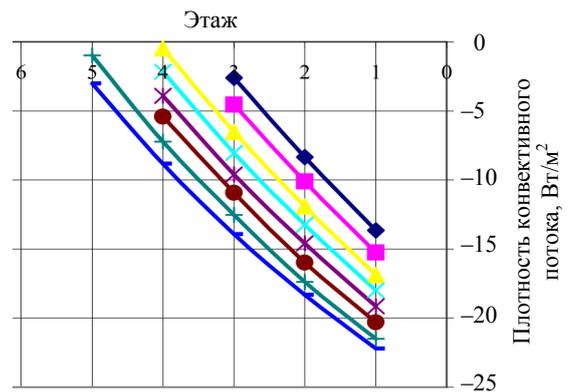


Рис. 10. Изменение плотности конвективного потока в воздухоприемном канале от воздуха к стене по этажам при наличии солнечного облучения для здания без термореновации (обозначения те же, что на рис. 9)

Fig. 10. Change in density of convective flow in air intake duct from air to wall along the floors of the building in the presence of solar irradiation for a building without thermal renovation (the designations are the same as in Fig. 9)

На рис. 11 показано изменение величин возможной экономии энергии на нужды отопления и вентиляции здания за счет работы предлагаемой системы вентиляции (при наличии устойчивого солнечного облучения) и затрат энергии на нужды отопления и вентиляции (в случае отсутствия или невозможности использования вторичных и возобновляемых источников энергии для нужд отопления и вентиляции) в зависимости от температуры наружного воздуха для здания без термореновации ограждающих конструкций и современного здания (с термореновацией).

При устойчивом солнечном облучении здания предлагаемая система вентиляции будет обеспечивать расчетную температуру приточного воздуха без необходимости использования дополнительных (пиковых) устройств подогрева при температурах наружного воздуха от  $(-1,9)^\circ\text{C}$  и выше в здании с термореновацией и от  $(+2,1)^\circ\text{C}$  и выше в здании без нее. Этому обстоятельству соответствует величина максимальной теоретической экономии энергии на нужды отопления и вентиляции при работе предлагаемой системы вентиляции – большей, чем затраты на те же нужды в традиционных системах отопления и вентиляции при температурах наружного воздуха от  $(-1,9)^\circ\text{C}$  и выше для здания с термореновацией и от  $(+2,1)^\circ\text{C}$  и выше для здания без нее.

При температурах наружного воздуха от  $(-14)^\circ\text{C}$  и ниже для здания с термореновацией и от  $(-10)^\circ\text{C}$  и ниже для здания без нее отсутствует экономический эффект за счет использо-

вания тепловой энергии возобновляемых и вторичных источников (солнечное излучение, теплота удаляемого воздуха) в предлагаемой системе вентиляции. В эти периоды нормируемые условия микроклимата должны обеспечиваться за счет включения устройств дополнительного подогрева воздуха в рассматриваемой системе вентиляции, либо за счет включения в работу традиционной системы водяного отопления.

Максимальные затраты энергии на нужды отопления и вентиляции в отопительный период в домах с традиционными источниками энергии или в случае полного отсутствия солнечного облучения в зданиях с предлагаемой системой вентиляции составляют 14,71 Гкал (1165,00 бел. руб.) при нормируемом уровне утепления и 20,21 Гкал (1599,30 бел. руб.) в зданиях без термореновации (т. е. для домов с недостаточным уровнем тепловой защиты затраты энергии на нужды отопления и вентиляции получились в 1,37 раза больше, чем с нормативным уровнем утепления).

В зданиях же с предлагаемой системой вентиляции в случае наличия устойчивого солнечного облучения максимальная экономия энергии на нужды отопления и вентиляции в отопительный период составила 12,40 Гкал (981,60 бел. руб.) при нормируемом уровне утепления и 6,30 Гкал (499,16 бел. руб.) в зданиях без термореновации (т. е. для домов с недостаточным уровнем тепловой защиты экономия энергии на нужды отопления и вентиляции в отопительный период получилась в 1,97 раза меньше, чем в домах с нормативным уровнем утепления).

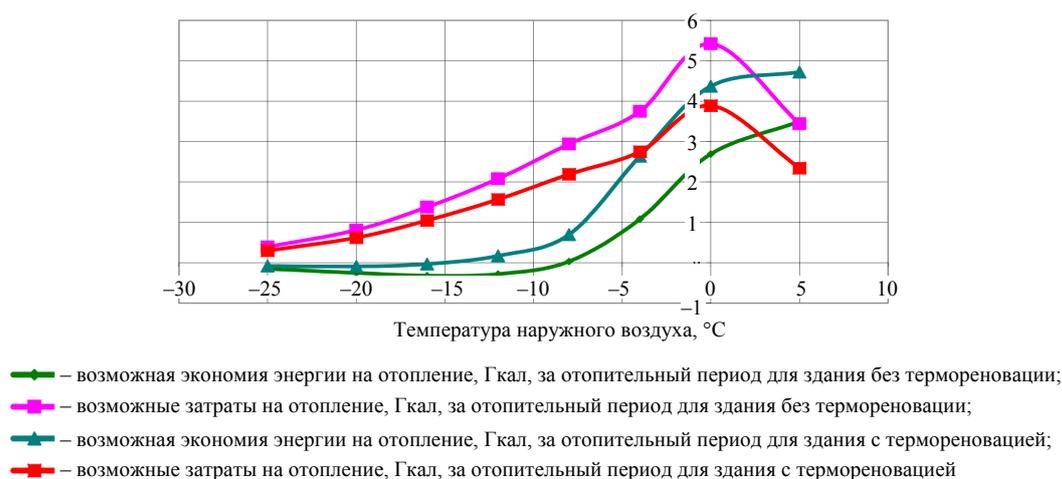


Рис. 11. Возможные экономия и затраты энергии на нужды отопления и вентиляции за отопительный период в расчете на одну солнцеприемную панель девяти типовых жилых комнат при разных уровнях утепления здания

Fig. 11. Possible savings and energy costs for heating and ventilation during the heating period per one solar panel of nine typical living rooms at different levels of building insulation

Максимальная теоретическая величина экономии тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции за счет работы предлагаемой системы вентиляции при наличии устойчивого солнечного облучения в течение отопительного периода составила 84,3 % от затрат тепловой энергии в традиционных системах отопления и вентиляции аналогичного здания (с термореновацией) и 31,2 % по зданию без термореновации. Реальная же экономия в расчете на одну солнцеприемную панель девяти типовых жилых комнат за 385 ч солнечного сияния (по Полоцку) в течение отопительного периода оказалась 0,97 Гкал (76,72 бел. руб.) для здания с нормируемым и 0,49 Гкал (39,01 бел. руб.) с недостаточным уровнем утепления. Таким образом, чем выше уровень тепловой защиты наружных ограждающих конструкций здания, тем больше величина экономии энергии на нужды отопления и вентиляции за счет работы предлагаемой системы вентиляции и соответственно выше экономическая целесообразность ее внедрения. В случае применения предлагаемой системы вентиляции она будет работать экономичнее в два раза для здания с нормируемым уровнем тепловой защиты, чем для аналогичного по планировочной структуре здания постройки до 1993 г. То есть рациональным и экономически целесообразным способом повышения энергоэффективности является только сочетание различных конструктивных, инженерных и архитектурно-планировочных мероприятий [43]. Например, увеличение теплозащитных свойств ограждающих конструкций при одновременном использовании современных инженерных энергосберегающих методов и технологий в сочетании с компактной формой и планировкой здания.

## ВЫВОДЫ

1. В результате проведенных исследований установлено, что сокращение потребления тепловой энергии на нужды отопления и вентиляции зданий жилого фонда Республики Беларусь за счет тепловой реабилитации их ограждающих конструкций до уровня, соответствующего действующим нормам тепловой устойчивости, не является экономически эффективным по причине длительности сроков окупаемости затрат на тепловую реабилитацию, поскольку действующие для населения тарифы на тепловую энергию, получаемую от централизованных источников, все еще не покрывают эконо-

мически обоснованных затрат на ее генерацию и транспортировку.

2. С использованием разработанного авторами метода технико-экономического расчета установок с теплообменными аппаратами рекуперативного типа исследованы режимы эксплуатации предложенной централизованной приточно-вытяжной системы организованной вентиляции, в которой подогрев приточного воздуха осуществляется за счет теплоты солнечного излучения и теплоты удаляемого из помещений воздуха.

3. Установлено влияние термических сопротивлений ограждающих конструкций здания на показатели термодинамической и экономической эффективности рассмотренной системы вентиляции.

4. Определены климатические условия, при которых утилизация теплоты удаляемого воздуха в предлагаемой системе вентиляции технически оправдана и экономически целесообразна.

5. Результаты выполненных исследований могут быть использованы при определении путей тепловой модернизации зданий с традиционными системами отопления и вентиляции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетический баланс Республики Беларусь: статистический сборник / редкол.: И. В. Медведова (отв. ред.) [и др.]. Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2020. 152 с.
2. Программа развития Организации Объединенных Наций. Итоговая оценка проекта ПРООН/ГЭФ: Беларусь: «Повышение энергетической эффективности жилых зданий»: отчет о проведении итоговой оценки [Электронный ресурс]: Ид. номер проекта ГЭФ: 4228; Ид. номер проекта PIMS ПРООН: 4290 / международный консультант Роланд Вон; национальный консультант Виктория Калоша. Минск, 2018. Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/33.pdf>. Дата доступа: 27.08.2021.
3. Кузнецов, Ю. В. Энергосберегающие технологии и мероприятия в системах энергосбережения / Ю. В. Кузнецов, С. В. Федорова. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 356 с.
4. Молодежникова, Л. И. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / Л. И. Молодежникова. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. 205 с.
5. Гребеньков, А. Ж. Основные направления реализации проекта ПРООН/ГЭФ «Повышение энергетической эффективности жилых зданий в Республике Беларусь» [Электронный ресурс] / А. Ж. Гребеньков // IV Международный конф. «Энергосбережение и повышение энергоэффективности. Энергоэффективность в жилом секторе: актуальные направления и практический опыт», Минск, 17 окт. 2013 г. Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/53.pdf>. Дата доступа: 27.08.2021.

6. Хрусталева, Б. М. Расширение энергосберегающей базы в условиях централизованного теплоснабжения и доминирования энергоёмких технологий / Б. М. Хрусталева, В. Н. Романюк // Энергоэффективность. 2017. № 12. С. 20–27.
7. Жукова, И. С. Оценка снижения затрат на отопление за счет утилизации теплоты приточно-вытяжной вентиляции в офисных зданиях / И. С. Жукова, И. С. Казакова // Молодежь и системная модернизация страны: сб. науч. ст. 2-й Междунар. науч. конф. студ. и молод. ученых. Курск: Университетская книга, 2017. С. 293–296.
8. Игнаткин, И. Ю. Оптимизация эффективности утилизации теплоты воздушно-воздушного рекуператора / И. Ю. Игнаткин // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. Т. 83, № 1. С. 34–39. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-1-34-39>.
9. Тябина, Д. А. Приточно-вытяжная система вентиляции с рекуперацией тепла как способ энергосбережения / Д. А. Тябина, П. Е. Манохин // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 1, № 12. С. 587–591.
10. Определение влияния установки для рекуперации тепла на эффективность и стоимость механической вентиляции / Е. О. Чеботарева [и др.] // Студент и наука. 2020. Т. 14, № 3. С. 65–71.
11. Костуганов, А. Б. Исследование эффективности утилизации теплоты в рекуперативных теплообменниках установок автономной вентиляции / А. Б. Костуганов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 1. С. 36–46. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.01.6>.
12. Зафатаев, В. А. Термодинамическое обоснование применения системы приточно-вытяжной вентиляции зданий с утилизацией теплоты удаляемого воздуха в условиях ее работы при низких температурах наружного воздуха [Электронный ресурс] / В. А. Зафатаев, С. В. Ланкович, А. С. Лапезо // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: электрон. сб. ст. II Междунар. науч. конф., Новополюк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет; под ред. Л. М. Парфеновой. Новополюк: Полоц. гос. ун-т, 2020. С. 499–513. Режим доступа: <https://elib.psu.by/handle/123456789/25549>.
13. Устройство тепловой вентиляции здания: пат. ВУ 22969 / В. И. Липко, В. А. Зафатаев, С. В. Ланкович. Опубл. 30.06.2020.
14. Фиалко, И. Ф. Энергоэффективность систем утепления наружных стен зданий и сооружений с вентилируемыми воздушными прослойками / И. Ф. Фиалко, А. С. Стаценко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 3. С. 82–87.
15. Протасевич, А. М. Аэродинамический расчет вентилируемых фасадных систем зданий со сплошными экранами / А. М. Протасевич, А. Б. Крутилин // Жилищное строительство. 2011. № 7. С. 37–40.
16. Ольшевский, В. Я. Энергоэффективность навесных вентилируемых фасадов / В. Я. Ольшевский, А. Е. Донцова, А. В. Калинина // AlfaBuild. 2019. Т. 10, № 3. С. 48–58.
17. Попова, Е. Е. Повышение энергоэффективности домов с помощью навесных вентилируемых фасадов / Е. Е. Попова, А. Е. Городилова, М. И. Куколев // Ростовский научный журнал. 2017. № 12. С. 367–378.
18. Емельянова, В. А. Оптимизированная конструкция навесного вентилируемого фасада / В. А. Емельянова, Д. В. Немова, Д. Р. Мифтахова // Инженерно-строительный журнал. 2014. Т. 50, № 6. С. 53–66.
19. Немова, Д. В. Интегральные характеристики термогравитационной конвекции в воздушной прослойке навесных вентилируемых фасадов / Д. В. Немова // Инженерно-строительный журнал. 2013. Т. 37, № 2. С. 24–36.
20. Петриченко, М. Р. Гидравлически оптимальная вентилируемая щель / М. Р. Петриченко, М. В. Петроченко, Е. Б. Явтушенко // Инженерно-строительный журнал. 2013. Т. 37, № 2. С. 35–40.
21. Явтушенко, Е. Б. Основы гидравлического расчета навесных вентилируемых фасадов / Е. Б. Явтушенко // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. Т. 7, № 2. С. 55–61.
22. Liu, L. Simulation Study of an Innovative Ventilated Facade Utilizing Indoor Exhaust Air / L. Liu, Z. Yu, H. Zhang // Energy Procedia. 2017. Vol. 121. P. 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.009>.
23. Experimental and Numerical Studies to Assess the Energy Performance of Naturally Ventilated PV Facade Systems / M. Shahrestani [et al.] // Solar Energy. 2017. Vol. 147. P. 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.034>.
24. Theodosiou, T. Analysis of the Thermal Bridging Effect on Ventilated Facades / T. Theodosiou, K. Tsikaloudaki, D. Bikas // Procedia Environmental Sciences. 2017. Vol. 38. P. 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.121>.
25. Повышение энергоэффективности зданий при условии утилизации тепла вытяжного воздуха [Электронный ресурс] / П. С. Хужаев [и др.] // Бюллетень науки и практики. 2017. Т. 16, № 3. С. 57–63. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28856245>. Дата доступа: 21.10.2021.
26. Mandapati, M. J. K. Thermodynamic Performance Evaluation of an Air-Air Heat Pipe Heat Exchanger / M. J. K. Mandapati, K. S. Chandra, G. S. Narayan // Thermal Science. 2014. Vol. 18, No 4. P. 1343–1353. <https://doi.org/10.2298/tsci121214123k>.
27. Утилизация теплоты вытяжного воздуха в перекрестном рекуператоре / С. М. Анисимов [и др.] // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. 2014. Т. 151, № 7. С. 79–83.
28. Зыков, А. П. Повышение энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования общественных зданий за счет использования технологии утилизации тепла вытяжного воздуха / А. П. Зыков, А. В. Барков // Высокие технологии и инновации в науке: сб. избран. ст. Междунар. науч. конф., Санкт-Петербург, 28 мая 2020 г. СПб., 2020. С. 160–166.
29. Овчинников, Ю. В. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / Ю. В. Овчинников, О. К. Григорьева, А. А. Францева. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. 258 с.
30. Тарифы на тепловую энергию для физических лиц [Электронный ресурс] // РУП Витебскэнерго. Режим доступа: <https://www.vitebsk.energo.by/media/uploads/2021/01/13/01012021-.pdf>. Дата доступа: 27.08.2021.
31. Пиир, А. Э. Пути снижения нормативных теплопотерь в жилых зданиях / А. Э. Пиир, О. А. Козак, В. Б. Кунтыш // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 2. С. 113–118. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-113-118>.
32. Борухова, Л. В. Нормирование воздухообмена в помещениях и энергоэффективность жилых зданий / Л. В. Борухова, А. С. Шибек // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 4. С. 306–313. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-306-313>.
33. Зафатаев, В. А. Оценка эффективности организованной приточно-вытяжной вентиляции многоэтажного здания в условиях загрязненного атмосферного воздуха крупных городов [Электронный ресурс] / В. А. За-

- фатаев, С. В. Ланкович // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Респ. науч.-техн. конф., г. Минск, 20–21 мая 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. Минск, 2021. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/96022>.
34. Бессонный, А. Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
  35. Маньковский, О. Н. Теплообменная аппаратура химических производств / О. Н. Маньковский, А. Р. Толчинский, М. В. Александров. Л.: Химия, 1976. 369 с.
  36. Ганжа, В. Л. Основы эффективного использования энергоресурсов: теория и практика энергосбережения / В. Л. Ганжа. Минск: Белор. наука, 2007. 451 с.
  37. Серии домов и планировки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tipdoma.com/serii-domov-belarus/>. Дата доступа: 11.11.2017.
  38. Дячек, П. И. Моделирование микроклимата отапливаемых помещений / П. И. Дячек, А. Э. Захаревич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2009. № 2. С. 34–47.
  39. Сазонов, Э. В. Вентиляция общественных зданий / Э. В. Сазонов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 188 с.
  40. Русланов, Г. В. Отопление и вентиляция жилых и гражданских зданий / Г. В. Русланов, Э. Л. Ямпольский. Киев: Будивельник, 1983. 272 с.
  41. Брюханов, О. Н. Теплообмен / О. Н. Брюханов, С. Н. Шевченко. М.: Изд-во АСВ, 2005. 460 с.
  42. Фокин, В. М. Основы энергосбережения и энергоаудита / В. М. Фокин. М.: Машиностроение-1, 2006. 256 с.
  43. Лихачева, А. Е. Влияние проектных решений на энергоэффективность зданий / А. Е. Лихачева, А. Д. Лопатин // Творчество и современность. 2019. Т. 11, № 3–4. С. 53–62.
- Поступила 21.12.2021  
Подписана в печать 22.02.2022  
Опубликована онлайн 31.03.2022
- ## REFERENCES
1. *Energy Balance of the Republic of Belarus. Statistical Compendium*. Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2020. 152 (in Russian).
  2. *United Nations Development Programme. Terminal Evaluation of UNDP/GEF Project: Belarus: Improving Energy Efficiency in Residential Buildings: Terminal Evaluation Report*. GEF [Global Environmental Fund] Project ID: 4228; UNDP [United Nations Development Programme] PIMS Project ID: 4290. Minsk, 2018. Available at: <http://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/33.pdf>. (Accessed 27 August 2021) (in Russian).
  3. Kuznetsov Yu. V., Fedorova S. V. (2008) *Energy Saving Technologies and Measures in Energy Saving Systems*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 356 (in Russian).
  4. Molodezhnikova L. I. (2011) *Energy Saving in Thermal Power Engineering and Heat Technologies*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University. 205 (in Russian).
  5. Grebenkov A. Zh. Main Areas of Implementation of the UNDP/GEF Project “Improving the Energy Efficiency of Residential Buildings in the Republic of Belarus”. *IV Mezhdunar. Konf. “Energoberezhenie i Povyshenie Energoeffektivnosti. Energoeffektivnost’ v Zhilom Sektore: Aktual’nye Napravleniya i Prakticheskii Opyt”*, Minsk, 17 Okt. 2013 g. [IV International Conference “Energy Saving and Energy Efficiency Improvement. Energy Efficiency in the Residential Sector: Current Trends and Practical Experience”, Minsk, Octob. 17, 2013]. Available at: <http://energoeffekt.gov.by/effbuild/download/53.pdf>. (Accessed 27 August 2021) (in Russian).
  6. Khroustalev B. M., Romanyuk V. N. (2017) Expansion of the Energy-Saving Base in the Context of District Heating and the Dominance of Energy-Intensive Technologies. *Energoeffektivnost* [Energy Efficiency], (12), 20–27 (in Russian).
  7. Zhukova I. S., Kazakova I. S. (2017) Assessment of Reducing Heating Costs by Utilizing the Heat of Supply and Exhaust Ventilation in office Buildings. *Molodezh’ i Sistemnaya Modernizatsiya Strany: Sb. Nauch. St. 2-i Mezhdunar. Nauch. Konf. Stud. i Molod. Uchenykh* [Youth and Systemic Modernization of the Country: Collection of Scientific Papers of the 2<sup>nd</sup> International Scientific Conference of Students and Young Scientists]. Kursk, Universitetskaya Kniga Publ., 293–296 (in Russian).
  8. Ignatkin I. Yu. (2018) Optimization of the Heat Recovery Efficiency of an Air-to-Air Heat Exchanger. *Vestnik Federal’nogo Gosudarstvennogo Obrazovatel’nogo Uchrezhdeniya Vysshego Professional’nogo Obrazovaniya “Moskovskii Gosudarstvennyi Agroinzhenernyi Universitet imeni V. P. Goryachkina”* = *Vestnik of Federal State Educational Institution of Higher Professional Education “Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin”*, 83 (1), 34–39. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-1-34-39> (in Russian).
  9. Tyabina D. A., Manokhin P. E. (2018) Supply and Exhaust Ventilation System with Heat Recovery as a Way to Save Energy. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Razrabotki* [Modern Research and Development], 1 (12), 587–591 (in Russian).
  10. Chebotareva E. O., Anikin E. N., Korobova M. M., Martynov E. N. (2020) Determination of the Influence of the Installation for Heat Recovery on the Efficiency and Cost of Mechanical Ventilation. *Student i Nauka* [Student and Science], 14 (3), 65–71 (in Russian).
  11. Kostuganov A. B. (2020) Study of the Efficiency of Heat Utilization in Recuperative Heat Exchangers of Autonomous Ventilation Installations. *Gradostroitelstvo i Arkhitektura = Urban Construction and Architecture*, 10 (1), 36–46. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.01.6> (in Russian).
  12. Zafataev V. A., Lankovich S. V., Lapezo A. S. (2020) Thermodynamic Substantiation of the Use of the Supply-and-Exhaust Ventilation System of Buildings with the Utilization of the Heat of the Removed Air in the Conditions of its Operation at Low Outdoor Temperatures. *Arkhitekturno-Stroitel’nyi Kompleks: Problemy, Perspektivy, Innovatsii: Elektron. Sb. St. II Mezhdunar. Nauch. Konf., Novopolotsk, 28–29 Noyab. 2019 g.* [Architectural and Construction Complex: Problems, Prospects, Innovations: Electronic Collection of Papers of the II International Scientific Conference, Novopolotsk, Novem. 28–29, 2019]. Polotsk, Polotsk State University; Edited by L. M. Parfenova. Novopolotsk, 499–513 (in Russian).
  13. Lipko V. I., Zafataev V. A., Lankovich S. V. (2020) *Thermal Ventilation Device*. Patent BY No 22969 (in Russian).
  14. Fialko I. F., Statsenko A. S. (2009) Power Efficiency of Systems Applied for Heating Building and Structure External Walls With Ventilated Air Spaces. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob’edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, (3), 82–87 (in Russian).

15. Protasevich A. M., Krutilin A. B. (2011) Aerodynamic Calculation of Ventilated Facade Systems of Buildings with Solid Screens. *Zhishchnoe Stroitelstvo = Housing Construction*, (7), 37–40 (in Russian).
16. Olshevsky V. Ya., Dontsova A. E., Kalinina A. V. (2019) Energy Efficiency of Hinged Ventilated Facades. *AlfaBuild*, 10 (3), 48–58 (in Russian).
17. Popova E. E., Gorodilova A. E., Kukolev M. I. (2017) Improving the Energy Efficiency of Houses Using Hinged Ventilated Facades. *Rostovskii Nauchnyi Zhurnal [Rostov Scientific Journal]*, (12), 367–378 (in Russian).
18. Emelyanova V. A., Nemova D. V., Miftakhova D. R. (2014) Optimized Design of a Hinged Ventilated Façade. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 50 (6), 53–66 (in Russian).
19. Nemova D. V. (2013) Integral Characteristics of Thermo-gravitational Convection in the Air Gap of Hinged Ventilated Facades. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 37 (2), 24–36 (in Russian).
20. Petrichenko M. R., Petrochenko M. V., Yavtushenko E. B. (2013) Hydraulically Optimal Ventilated Slot. *Inzhenerno-Stroitelny Zhurnal = Magazine of Civil Engineering*, 37 (2), 35–40 (in Russian).
21. Yavtushenko E. B. (2013) Fundamentals of Hydraulic Calculation of Suspended Ventilated Facades. *Stroitelstvo Unikalnykh Zdanii i Sooruzheniy = Construction of Unique Buildings and Structures*, 7 (2), 55–61 (in Russian).
22. Liu L., Yu Z., Zhang H. (2017) Simulation Study of an Innovative Ventilated Façade Utilizing Indoor Exhaust Air. *Energy Procedia*, 121, 126–133. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.009>.
23. Shahrestania M., Yaoa R., Essaha E., Shaoa L., Oliveirab A. C., Hepbaslic A., Biyike E., del Cañod T., Ricod E., Lechónd J. L. (2017) Experimental and Numerical Studies to Assess the Energy Performance of Naturally Ventilated PV Façade Systems. *Solar Energy*, 147, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.034>.
24. Theodosiou T., Tsikaloudaki K., Bikas D. (2017) Analysis of the Thermal Bridging Effect on Ventilated Facades. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.121>.
25. Khuzhaev P. S., Nazarov R. S., Alimardonov A. B., Sul-tonmamadov Kh. P. (2017) Improving the Energy Efficiency of Buildings under the Condition of Utilizing the Heat of Exhaust Air. *Byulleten Nauki i Praktiki [Bulletin of Science and Practice]*, 16 (3), 57–63. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28856245>. (Accessed: 21 October 2021) (in Russian).
26. Mandapati M. J. K., Chandra K. S., Narayan G. S. (2014) Thermodynamic Performance Evaluation of an Air-Air Heat Pipe Heat Exchanger. *Thermal Science*, 18 (4), 1343–1353. <https://doi.org/10.2298/tsci121214123k>.
27. Anisimov S. M., Vasil'ev V. F., Edlikovskii A., Pandelidis D. (2014) Extract Air Heat Recovery in a Cross-Flow Heat Exchanger. *Santekhnika, Otoplenie, Konditsionirovanie [Plumbing, Heating, Air Conditioning]*, 151 (7), 79–83 (in Russian).
28. Zykov A. P., Barkov A. V. (2020) Increasing the Energy Efficiency of Ventilation and Air Conditioning Systems in Public Buildings Through the Use of the Exhaust Air Heat Recovery Technology. *Vysokie Tekhnologii i Innovatsii v Nauke: Sb. Izbran. St. Mezhdunar. Nauch. Konf., Sankt-Peterburg, 28 Maya 2020 g. [High Technologies and Innovations in Science: Collection of Selected Papers of the International Scientific Conference]*. Saint-Petersburg, 160–166 (in Russian).
29. Ovchinnikov Yu. V., Grigorieva O. K., Frantseva A. A. (2015) *Energy Saving in Heat Power Engineering and Heat Technologies*. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 258 (in Russian).
30. Heat Energy Tariffs for Individuals. *Republican Unitary Enterprise Vitebskenergo*. Available at: <https://www.vitebsk.energo.by/media/uploads/2021/01/13/01012021-.pdf>. (Accessed 27 August 2021) (in Russian).
31. Piir A. E., Kozak O. A., Kuntyshev V. B. (2017) Method for Decrease of Standard Heat Losses in Residential Buildings. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (2), 113–118. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-113-118> (in Russian).
32. Borukhava L. V., Shybeka A. S. (2018) Introduction of Norms for Air Exchange in Rooms and Energy Efficiency of Residential Buildings. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (4), 306–313. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-306-313> (in Russian).
33. Zafataev V. A., Lankovich S. V. (2021) Evaluation of the Effectiveness of Organized Supply and Exhaust Ventilation of a Multi-Storey Building in the Conditions of Polluted Atmospheric Air in Large Cities. *Innovatsionnye Tekhnologii v Vodnom, Kommunal'nom Khozyaistve i Vodnom Transporte: Materialy Resp. Nauch.-Tekhn. Konf., g. Minsk, 20–21 Maya 2021 g. [Innovative Technologies in Water, Utilities and Water Transport: Proceedings of the Republican Scientific and Technical Conference, Minsk, May 20–21, 2021]*. Minsk, 13–17 (in Russian).
34. Bessonny A. N., Dreitser G. A., Kuntyshev V. B. (1996) *Fundamentals of Calculation and Design of Heat Exchangers for Air Cooling*. Saint Petersburg, Nedra Publ., 512 (in Russian).
35. Mankovsky O. N., Tolchinsky A. R., Aleksandrov M. V. (1976) *Heat Exchange Equipment of Chemical Production*. Leningrad, Khimiya Publ., 369 (in Russian).
36. Ganzha V. L. (2007) *Fundamentals of Efficient Use of Energy Resources: Theory and Practice of Energy Saving*. Minsk, Belorusskaya Nauka Publ., 451 (in Russian).
37. *Series of Houses and Layout*. Available at: <http://tipdoma.com/serii-domov-belarus/>. (Accessed 11 November 2017) (in Russian).
38. Diachek P. I., Zakharevich A. E. (2009) Simulation of Micro-Climate in Heated Buildings. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Association*, (2), 34–47 (in Russian).
39. Sazonov E. V. (1991) *Ventilation of Public Buildings*. Voronezh, Voronezh State University Publ., 188 (in Russian).
40. Ruslanov G. V., Yampolsky E. L. (1983) *Heating and Ventilation of Residential and Civil Buildings*. Kiev, Budivelnik Publ., 272 (in Russian).
41. Bryukhanov O. N., Shevchenko S. N. (2005) *Heat and Mass Transfer*. Moscow, ASV Publ., 460 (in Russian).
42. Fokin V. M. (2006) *Fundamentals of Energy Saving and Energy Audit*. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 256 (in Russian).
43. Likhacheva A. E., Lopatin A. D. (2019) Influence of Design Solutions on the Energy Efficiency of Buildings. *Tvorchestvo i Sovremennost [Creativity and Modernity]*, 11 (3–4), 53–62 (in Russian).

Received: 21.12.2021

Accepted: 22.02.2022

Published online: 31.03.2022