

УДК630.8/816.2

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-181-188

## Анализ теплозащитных показателей ограждающих конструкций объектов малоэтажного домостроения лесных и сельских районов в условиях периодической генерации тепловой энергии

С.Н. Долматов

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва,  
пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия  
pipinaskus@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>

Статья поступила 03.11.2023, принята 13.11.2023

*Индивидуальное жилищное строительство активно развивается в СФО. Рост цен на жилье в многоэтажных домах, увеличение плотности застройки, социально-демографические факторы повышают популярность индивидуального строительства. Технологии такого строительства подразумевают широкое применение доступных местных строительных материалов. В работе рассматриваются три вида ограждающих конструкций: каркасная с утеплителем из минеральной плиты, блочная из газобетона, блочная из древесно-минерального композита. Целью исследования является определение теплового режима ограждающих конструкций в условиях нестационарного теплового режима, вызванного ограниченным временем работы теплогенерирующих устройств. В работе применялись системы твердотельного моделирования Elcut, КОМПАС. Проводился расчет тепловых и температурных показателей ограждающих конструкций в стационарных и нестационарных условиях теплопередачи. Расчетная величина удельных потерь теплоты через расчетную конструкцию в условиях стационарного режима равна: (каркасная стена — 11,7 Вт/(м<sup>2</sup> · °C), древесно-минеральная стена — 21,9 Вт/(м<sup>2</sup> · °C), газобетон — 27,7 Вт/(м<sup>2</sup> · °C). Величина сопротивления теплопередаче соответственно  $R_s = 3,75$  (м<sup>2</sup> · °C)/Вт,  $R_s = 1,73$  (м<sup>2</sup> · °C)/Вт,  $R_s = 2,0$  (м<sup>2</sup> · °C)/Вт. В условиях нестационарного режима с генерацией тепла 10 ч в сутки конструкции в виде каркасной стены и газобетона имеют неудовлетворительные показатели по санитарно-гигиеническим показателям, поскольку температура поверхности стен ниже температуры точки росы. Стена из древесно-минерального композита имеет лучшие показатели тепловой аккумуляции, обеспечивая режим эксплуатации, соответствующий нормативным показателям. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации строительных конструкций.*

**Ключевые слова:** домостроение; каркасная технология; газобетон; древесно-минеральный композит; удельные потери теплоты; сопротивление теплопередаче; нестационарный режим; тепловая эффективность.

## Analysis of heat-protective indicators of enclosing structures of low-rise housing construction objects in forest and rural areas under conditions of periodic generation of thermal energy

S.N. Dolmatov

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarskii rabochii prospect, Krasnoyarsk  
pipinaskus@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>

Статья поступила 03.11.2023, принята 13.11.2023

*Individual housing construction is actively developing in the Siberian Federal District. Rising housing prices in multi-storey buildings, increasing building density, and socio-demographic factors are increasing the popularity of individual construction. Technologies for such construction imply the widespread use of available local building materials. The work considered three types of enclosing structures: frame with mineral slab insulation, block made of aerated concrete, block made of wood-mineral composite. The purpose of the study was to determine the thermal regime of enclosing structures under non-stationary thermal conditions caused by the limited operating time of heat-generating devices. The Elcut solid modeling system, COMPAS, was used in the work. Thermal and temperature indicators of enclosing structures were calculated under stationary and non-stationary conditions of heat transfer. The calculated value of specific heat losses through the design structure under stationary conditions is equal to: (frame wall - 11.7 W/(m<sup>2</sup> · °C), wood-mineral wall - 21.9 W/(m<sup>2</sup> · °C), aerated concrete - 27.7 W/(m<sup>2</sup> · °C). The value of heat transfer resistance, respectively, is  $R_s=3.75$  (m<sup>2</sup> · °C)/W,  $R_s=1.73$  (m<sup>2</sup> · °C)/W,  $R_s=2.0$  (m<sup>2</sup> · °C)/W. In non-stationary conditions with heat generation 10 hours a day, structures in the form of a frame wall and aerated concrete have unsatisfactory sanitary and hygienic indicators, since the wall surface temperature is below the dew point temperature. The best indicators of thermal accumulation, providing an operating mode that complies with standard indicators. The results obtained can be used in the design and operation of building structures.*

**Keywords:** house building; frame technology; aerated concrete; wood-mineral composite; specific heat loss; heat transfer resistance; unsteady mode; thermal efficiency.

**Введение.** В настоящее время имеется особая актуальность решения задач, связанных с повышением качества жизни, для удаленных территорий, где существенная часть населения не имеет доступа к значительной части социально-гуманитарных благ, привычных для населения центральных территорий страны [1]. В СФО эти территории представлены таежной зоной, подлежащей промышленному освоению. Этапы освоения лесных массивов территории Сибири и Дальнего Востока тесно связаны с потребностями населения в обеспечении жильем, в том числе за счет реализации технологий индивидуального домостроения из местных доступных материалов [2].

Поскольку климатические условия этих районов весьма суровы, важен вопрос отопления таких объектов. В центральных районах страны отопление объектов ИЖС обычно осуществляется за счет магистрального газа. Существует устойчивое мнение, что подавляющее большинство объектов газородной недвижимости России газифицировано. ПАО «Газпром» сообщает, что в 2022 г. завершено строительство 177 межпоселковых газопроводов протяженностью более 3,3 тыс. км, и уровень газификации природным газом в России на конец 2022 г. достиг 73,1 % [3]. Согласно планам газификации, планируемый уровень газификации регионов РФ к концу 2025 г. должен составить не менее 75 %. Это следует из паспорта госпрограммы РФ «Развитие энергетики» [4].

Однако если рассмотреть территориальные особенности газификации России, то оказывается, что львиная доля объектов газифицируется в Европейской части РФ на Юге, Урале. Что касается СФО, то, согласно докладу полномочного представителя президента РФ в СФО, за 2022 г. запланировано газифицировать 360 тыс. домохозяйств [5]. Эти 360 тыс. домохозяйств распределены в Республике Алтай, Алтайском крае, Иркутской, Кемеровской, Новосибирской, Омской и Томской областях. На территории республик Тыва и Хакасия, Красноярского края на данный момент вообще отсутствует магистральный газ.

Учитывая динамику ввода площадей индивидуального жилищного строительства и долю в общем объеме строительства жилья в субъектах РФ (табл. 1) [6], можно сказать, что 360 тыс. объектов — это гомеопатически малая величина. Только за последние 10 лет в СФО введено в эксплуатацию около 3,5 млн м<sup>2</sup> объектов ИЖС.

**Таблица 1.** Ввод в действие жилых домов, построенных за счет собственных и привлеченных средств, тыс. м<sup>2</sup>

Субъект/год	2005	2010	2015	2018	2019	2020
РФ	17 530	25 518	35 203	32 421	38 503	39 802
СФО	1 399	2 040	3 003	2 834	3 590	3 442
Красноярск	160	236	461	323	848	557

Поэтому теплоснабжение не газифицированных территорий за счет автономных источников является актуальной и важной задачей, которая стоит перед строителями и эксплуатантами объектов ИЖС. Устойчивая постоянная генерация тепла может быть достигнута за счет электроотопления, но постоянный рост тарифов делает такое отопление малодоступным из-за его дороговизны.

При условии постоянной генерации тепловой энергии, а это возможно в системах с автоматическим регулированием, следует рассматривать тепловой баланс ограждающей конструкции в стационарном режиме. Такой режим отопления здания практически реализуем при использовании электрической энергии, сжигании газа или жидкого топлива, частично при работе автоматизированных пеллетных горелок. В условиях сельских районов, а также районов, тяготеющих к лесозабыточным, актуальным топливом остаются дрова, а также низкосортные бурые угли, с которыми также весьма затруд-

нительно организация стабильной генерации тепла на протяжении суток.

Условия отопления также обусловлены режимом пребывания людей в жилище. При условии занятости на производстве, учебе или иной деятельности, связанной с нахождением вне помещения, фактическое время нахождения людей внутри теплового контура здания составляет не более 12 ч. Как правило, вернувшись с учебы или работы, жильцы запускают генератор тепловой энергии (дровяная или угольная печь, котел). Также рано утром, перед тем как покинуть жилище и выдвигаться к месту трудовой деятельности, производится закладка твердого топлива в печь или котел. Т. е. время непосредственной генерации тепла, ограниченной временем горения твердого топлива в печи или котле, не превышает 8...10 ч в сутки. Остальные 14...16 ч дом медленно остывает. Конечно, условия эти достаточно условны, поскольку будет иметь место накопление тепловой энергии предметами быта, мебелью и т. п. Но, по большому счету, объект будет находиться в условиях нестационарного теплового режима, вызванного дозированным, циклическим поступлением тепловой энергии. А температура за пределами ограждающей конструкции будет стабильно отрицательна. Это значит, что при отсутствии поступления тепловой энергии температура стен, перекрытий, полов будет медленно снижаться, а это может привести к выходу за нормативные пределы теплового и влажностного режима, допустимого для объектов длительного пребывания людей. На темп снижения внутренней температуры при снижении тепловой нагрузки основное влияние оказывают: соотношение расчетных тепловых нагрузок на горячее водоснабжение и отопление, тепловая аккумуляция наружных ограждений и температура наружного воздуха [7].

*Цель исследования* — определение теплового режима ограждающих конструкций объекта малоэтажного домостроения в условиях нестационарного теплового режима, вызванного ограниченным временем работы теплогенерирующих устройств.

*Предмет исследования* — показатели, определяющие тепловую эффективность ограждающих конструкций объектов малоэтажного домостроения сельских и лесных районов.

*Задачи исследования.*

1. Обосновать конкурирующие технологии доступного малоэтажного строительства для сельской и лесной местности

2. Методами твердотельного имитационного моделирования определить тепловой режим элементов конструкции малоэтажного строительства.

Сельская и лесная зона и ее объекты жилья традиционно отличаются применением местных недорогих строительных материалов. Это дерево, различного рода малоформатные блоки (газоблоки, пеноблоки, блоки из древесно-минеральных композитов).

Преимуществами деревянного домостроения являются комфортность, экологичность, экономичность и доступность материала, а также энергоэффективность и доступность индивидуализации [8]. Деревянное домостроение из массива древесины или из оцилиндрованных бревен трудно отнести к бюджетным решениям. Учитывая цену на 1 м<sup>3</sup> таких материалов, которая составляет 30...40 тыс. р. и более, логично что в последнее время такие конструкции встречаются нечасто и носят элементы премиального сектора строительства, объемы которого не превышают 5...10 % деревянного домостроения.

Широкое распространение имеет более доступная каркасная технология домостроения. В основе экономичных конструкций каркасного домостроения, широко представленных на рынке индивидуальной коттеджной застройки Красноярска, положена технология «Платформа». Система «Платформа» [9] представляет собой деревянную каркасную конструкцию с несущими стенами. Название «Платформа» отображает метод строительства. Строение возводится этаж за этажом. Таким образом, что перекрытие цоколя или меж-

дуэтажное перекрытия служат площадкой, где собираются будущие стены, которые затем монтируют в вертикальном положении. Система позиционируется как высокоэкономичное решение для индивидуальных домов. Такие технологические и конструктивные решения взяты на вооружение индивидуальными и частными застройщиками. Особенно агрессивно технология «Платформа» продвигается в сочетании с технологией быстровозводимых фундаментов на винтовых сваях. Сочетание этих решений позволяет получить высокую скорость строительства, экономичность.

Традиционно широко распространено в СФО строительство из мелкоформатных блоков. Такое строительство допускает более низкую квалификацию рабочих, по сравнению с каркасной. Это важно для условий сельской местности и удаленных районов. В качестве материалов блоков выступают пено- и газобетон, древесно-минеральные композиты (арболит).

При решении вопроса о приоритетности той или иной конкурирующей технологии строительства не только скорость строительства и минимальная стоимость являются определяющими факторами. Основными показателями будут комфортность проживания, хорошие санитарно-бытовые условия, микроклимат, влажность. Теплозащитные качества стен с точки зрения расхода тепловой энергии определяются величиной теплового потока, проходящего через ограждения, или обратной ему величиной сопротивления теплопередаче. В зимнее время санитарно-гигиенические условия зависят от температуры внутренних поверхностей ограждающей конструкции. Одно из приоритетных условий — на поверхности не должно наблюдаться выпадение конденсата.

Согласно требованиям [10] для соответствия санитарно-гигиеническим требованиям, температура внутренней поверхности ограждающей конструкции должна быть не ниже точки росы, кроме того, нормативный перепад температуры внутреннего воздуха и температуры внутренней поверхности стен не должен превышать 4 °С (для жилых помещений). В условиях ограниченного времени работы генератора тепловой энергии в помещении и ограждающих конструкциях будут происходить явления нестационарного теплопереноса. Тогда для обеспечения нормативных санитарно-бытовых условий и исключения выпадения росы стены должны обладать определенной тепловой инерцией, которая тем выше, чем более массивна стена.

Рядом авторов проводились исследования в области работы объектов при аварийном отключении тепла. В работе [11] обосновано, что тепловая инерция материала стен имеет влияние на климатические параметры внутри помещения в условиях нестационарного режима передачи тепловой энергии через ограждающие конструкции, что следует учесть при расчете числовых значений сопротивления теплопередаче. В работе [12] исследовали использование пенобетона в качестве ограждающего материала во Франции. Пришли к выводу, что тепловая инерция пенобетона ниже, чем у бетона, и предложили комбинировать пенобетон с материалом с более высокой плотностью, чтобы снизить амплитуду колебаний температуры конструкции. Вместе с тем, очевидно, что делать стену из максимально плотного материала нерационально, поскольку плотность оказывает важное влияние на теплопроводность [13]. Бетоны высокой плотности будут иметь неприемлемые показатели теплопроводности. Тогда как путем добавления материалов низкой плотности, например, древесных опилок или стружки можно получить оптимальное соотношение массивности и теплопроводности. В работе [14] показали, что добавление древесной стружки в песчаный бетон позволяет снизить теплопроводность с 1,20 до 0,55 Вт/(м·°С) при одновременном снижении плотности с 2100 до 1400 кг/м<sup>3</sup>. Диапазон изменения температуры внутри помещения коррелирует с тепловой инерцией ограждающей кон-

струкции, чем больше тепловая инерция — тем амплитуда колебаний будет меньше [15]. Установлено, что в случае отключения приборов отопления объекты, имеющие большую массивность, снижают температуру с меньшей скоростью. В летнее же время массивная конструкция может отдавать накопленное тепло в ночное время [16].

Теплоаккумуляция обеспечивает запас тепла для оптимального решения динамических характеристик систем теплоснабжения: динамики потребления тепла и электричества, создания запаса прочности в случае длительного отсутствия подачи тепла. Когда отсутствует баланс между выработкой и накоплением тепловой энергии появляется риск расходования энергии впустую. Или, что хуже, переохлаждения стен объекта при недостаточной теплогенерации. Отопление частного дома дровами или углем — типичный пример пульсирующей, неравномерной подачи тепла.

Известны работы в области систем хранения тепловой энергии с целью управления разрывом между спросом и потреблением тепла. Такие системы действуют как буфер между спросом и предложением, позволяя максимизировать гибкость и производительность систем отопления, а также улучшить интеграцию возобновляемых источников энергии в тепловых сетях [17]. Чем больше теплонакопительная способность ограждающей конструкции, тем менее влиятельны колебания наружного воздуха. В случае плавного снижения температуры до определенного момента времени характер распределения температур практически соответствует таковому при стационарном режиме. Обосновано, что показатели теплопроводности, массивности, инерционности влияют на смещение максимумов и минимумов температур и тепловых потоков поверхности ограждающей конструкции. Для объектов средней плотности (керамзитобетон) такие смещения наблюдаются в интервале 8–12 ч, для фрагмента низкой плотности (пенополистирол) смещений практически нет, т. е. практически отсутствует тепловая инерционность, для объектов из пено и газобетона — в пределах 3–8 ч [18].

В количественном отношении теплоустойчивость конструкции обусловлена показателем тепловой инерции  $D$ . Величина может быть определена по зависимости:

$$D = \sum R_i S_i, \quad (1)$$

где  $D$  — тепловая инерция;  $R_i$  — термическое сопротивление  $i$ -го слоя ограждающей конструкции, м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $S_i$  — коэффициент теплоусвоения материала  $i$ -го слоя ограждающей конструкции, Вт/(м<sup>2</sup>·°С):

$$R_i = \frac{1}{\alpha_{si}} + \sum R_s + \frac{1}{\alpha_{se}}, \quad (\text{м}^2 \cdot \text{C}^0) / \text{Вт}, \quad (2)$$

где  $R_s$  — термическое сопротивление однородной части фрагмента, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт;  $\alpha_{si}$  — коэффициент теплоотдачи ограждающей поверхности (наружной), Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\alpha_{se}$  — коэффициент теплоотдачи ограждающей поверхности (наружной), Вт/(м<sup>2</sup>·°С):

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s} \quad (3)$$

где  $\lambda_s$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\delta_s$  — толщина слоя материала, м.

Коэффициент теплоусвоения характеризует способность материала конструкции воспринимать определенное количество теплоты. Определяется по зависимости:

$$S = \sqrt{2\pi\lambda_s\rho c/z}, \quad (4)$$

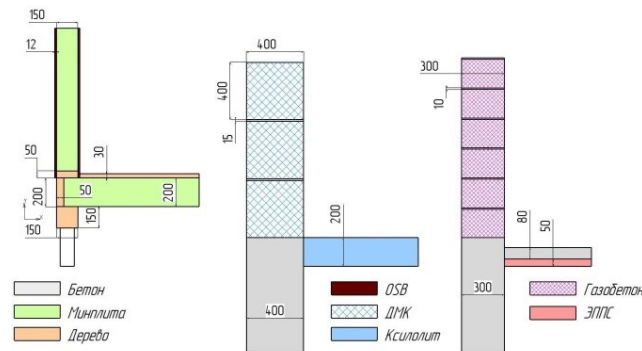
где  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);  $z$  — период тепловых колебаний, с.

Коэффициент теплоусвоения зависит от физических свойств материала, а также промежутка времени, в котором происходит изменение теплового потока.

Рассмотрим три варианта ограждающей конструкции (рис. 1), размеры в мм. Все три варианта имеют широкое распространение и активно применяются индивидуальными застройщиками СФО. В первом варианте — это пример каркасного домостроения. Стойки каркаса — сосна, утеплитель — минплита. Обшивка каркаса — листы OSB. Вентилируемое подполье, фундамент — винтовые сваи. Второй вариант — конструкция из блоков древесно-минерального композита (ДМК) (арболита). Блоки сложены на цементно-песчаный раствор (ЦПС), полы из опилкобетона (ксилолита) по грунту. Фундамент — мелкозаглубленная лента. Сечение блоков 40×40×60 см. В третьем варианте — это стена из газобетонных блоков D400, сечение 30×20×60 см, укладка также на ЦПС, полы в виде массивной стяжки из бетона, укладка по слою экструзионного пенополистирола (ЭППС). Фундамент — мелкозаглубленная лента. Показатели материалов приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Физико-механические показатели материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C)	Плотность материала, кг/м <sup>3</sup>
Минплита	0,04	0,84	80
Сосна	0,18	2,3	600
OSB	0,18	1,9	650
ДМК	0,23	2,3	650
Ксилолит	0,45	2,3	1200
Газобетон D400	0,15	0,84	400
	1,1	1,1	2 200
ЭППС	0,03	1,42	35



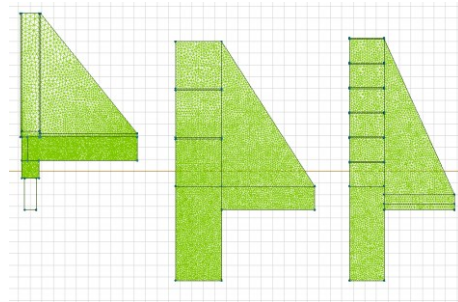
**Рис. 1.** Варианты ограждающих конструкций

Следует сказать, что принятые конструктивные решения, а также их возможное сочетание перекрывают до 80 % технологий, применяемых индивидуальным застройщиком. Практика таких застройщиков показывает упор на снижение стоимости строительства даже в ущерб тепловой эффективности. Нормативная величина сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции для климатических условий г. Красноярск по требованиям [10] составляет  $R = 3,6$  (м<sup>2</sup>·°C)/Вт. Для принятых конструкций, согласно формуле 3, эта величина равна  $R_s = 3,75; 1,73$  и  $2,0$  (м<sup>2</sup>·°C)/Вт (для стен) соответственно. Т. е. только каркасная технология формально удовлетворяет нормативным требованиям по тепловой эффективности.

Ограждающая конструкция была смоделирована в системе КОМПАС и экспортирована в формате *dfx* (*Autodesk*) в систему твердотельного моделирования *Elcut* [19-23]. При

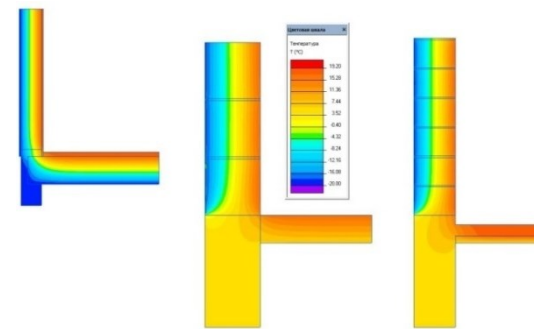
моделировании тепловых процессов тепловой поток был направлен по нормали к поверхности пола и стены. В качестве граничных условий были заданы: внутренняя температура воздуха  $t_{int} = +20$  °C; температура снаружи: воздух  $t_{ext} = -20$  °C, почва  $t_{ext} = +5$  °C; коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности стен (СП 50.13330.2012)  $\alpha_{si} = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C); коэффициент теплоотдачи поверхности наружной стены (СП 50.13330.2012)  $\alpha_{se} = 23$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Модель в *Elcut* разбивается на сетку конечных элементов, назначаются граничные условия (рис. 2). Густота сетки задавалась автоматически. В телах с незначительными геометрическими размерами (листы OSB, швы ЦПС) сетка размечалась вручную, с дискретным элементом меньшего размера. Затем был проведен расчет. В первой части исследования моделировалась задача теплопереноса в стационарных условиях. Т. е. имитировались условия постоянного нагрева помещения с расчетной величиной  $\alpha_{si} = 8,7$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C). В программе определялся тепловой поток через определенное сечение при помощи метода тепловых полей.



**Рис. 2.** Разбивка сеткой конечных элементов проектного тела в программе *Elcut*

Картина тепловых полей распределяется в соответствии с рис. 3.



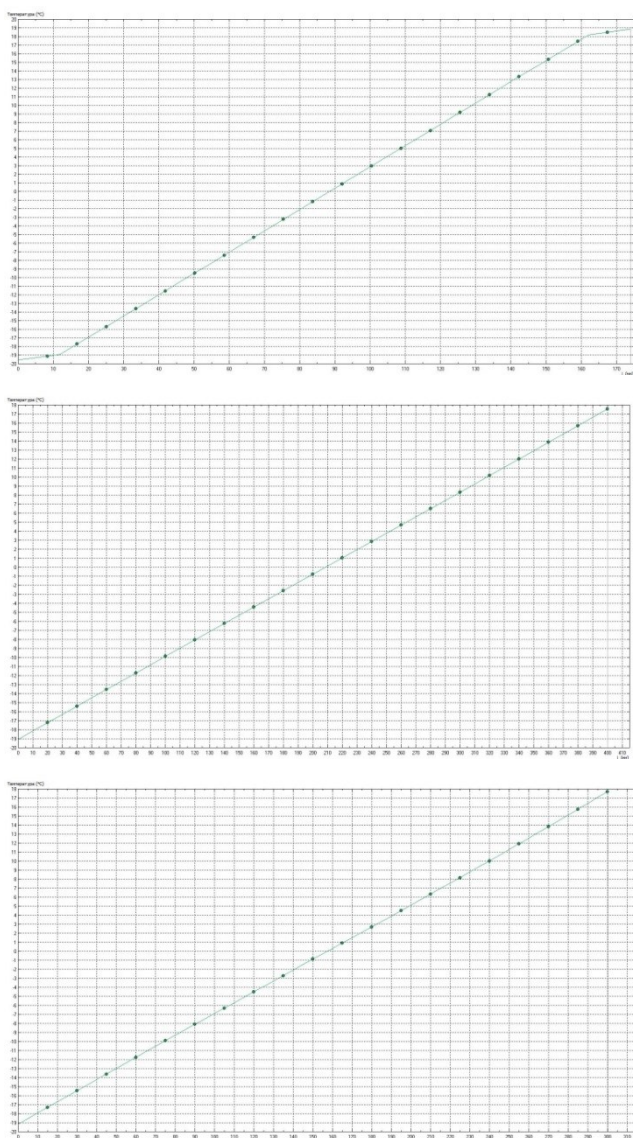
**Рис. 3.** Тепловые поля и температуры проектного тела в программе *Elcut*

Путем добавления линий контура в пакете *Elcut* проводилась оценка величины теплового потока ограждающей конструкции стен, температуры внутренней поверхности стены, температуры по объему стены, пола. Полученные данные приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Показатели тепловой эффективности сравниваемых вариантов

Конструкция	Температура, °C		Тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>		Средняя температура по объему, °C	
	стена	пол	стена	пол	стена	пол
Каркасная	+19,9	+19,9	11,7	8,8	0	-1,2
ДМК	+19,9	+19,6	21,9	31,2	+0,4	+12,3
Газоблок	+19,9	+19,7	27,7	17,0	+0,5	+19,3

На рис. 4 показано распределение температуры по сечению ограждающей конструкции (стена).



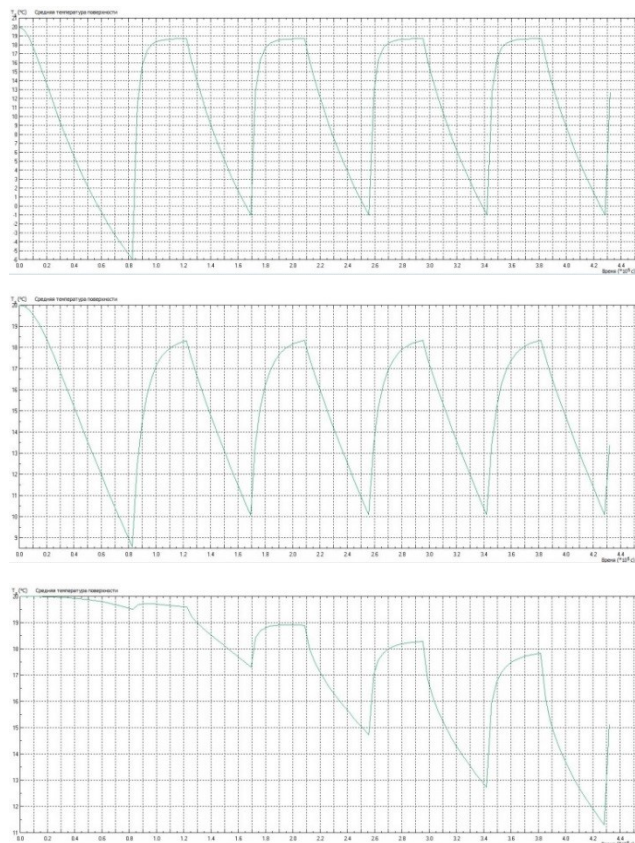
**Рис. 4.** Распределение температуры по сечению стены (сверху-вниз: каркасная стена, ДМК, газоблок)

Во второй части исследования моделировалась задача теплопереноса в нестационарном режиме. Для этого в программе *Elcut* задействовалась функция *impulse*. Был задан интервал наблюдения в 5 суток, или 432 000 с с шагом срезов в 1 ч, или 3 600 с. Начальная температура стены принята +20 °С. Был задан режим «конвекция». И функция вида:

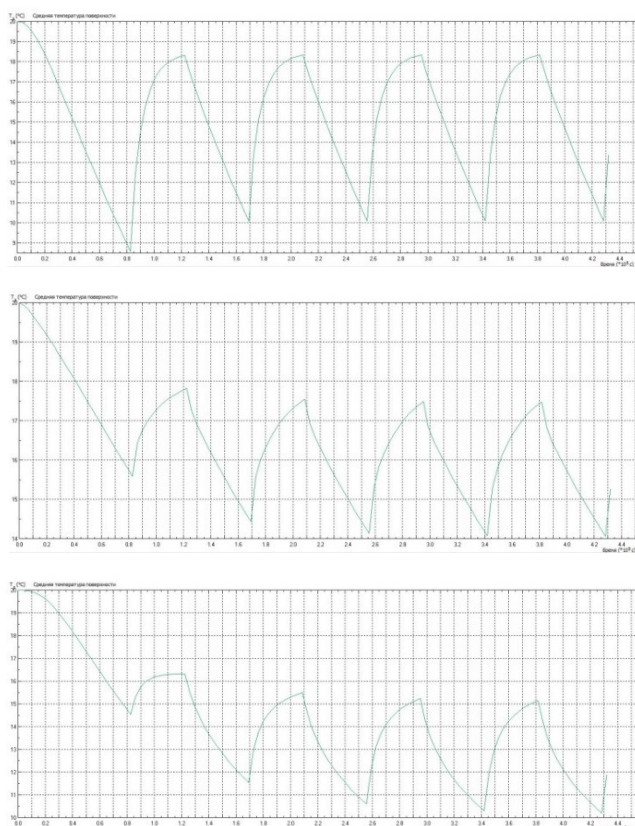
$$K=8.7*(impulse(t/3600,24,24+10))+8.7*(impulse(t/3600,48,48+10))+8.7*(impulse(t/3600,72,72+10))+8.7*(impulse(t/3600,96,96+10))+8.7*(impulse(t/3600,120,120+10))$$

Т. е. имитировались условия нагрева помещения с расчетной величиной  $\alpha_{si} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$  в течении 10 ч в сутки. В дальнейшем генерация тепловой энергии прекращалась. Это имитировало нагрев помещения при помощи печи или котла с периодической топкой.

На рис. 5 показан график изменения температуры внутренней поверхности стены. На рис. 6 показан график изменения температуры поверхности пола. Динамика изменений температуры зафиксирована за 5 суток, или 432 000 с.



**Рис. 5.** Динамика изменения температуры поверхности стены (сверху-вниз: каркасная стена, газоблок, ДМК)



**Рис. 6.** Динамика изменения температуры поверхности пола (сверху-вниз: каркасная стена, газоблок, ДМК)

Коэффициент теплопроводности воздуха принят  $0,026 \text{ Вт}/(\text{м}^0\text{С})$ , удельная теплоемкость  $800 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^0\text{С})$ . Шаг линий изотерм  $2 \text{ } ^0\text{С}$ . На рис. 7 показана картина тепловых полей в динамике через 8; 16; 24 ч (начальная температура  $+20 \text{ } ^0\text{С}$ ).

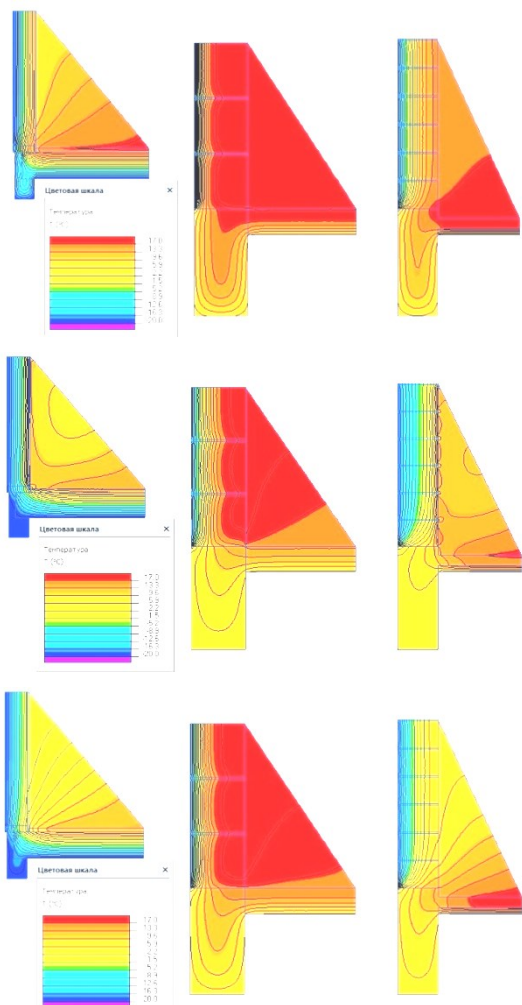


Рис. 7. Тепловые поля и тепловые изотермы через 8; 16; 24 ч (сверху-вниз)

**Результаты и их обсуждение.** При работе рассмотренных ограждающих конструкций в условиях стационарной теплопередачи с устойчивой генерацией тепла, полученные величины удельных потерь теплоты составляют от  $8,8$  до  $31,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^0\text{С})$ , величина сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции  $1,73$  до  $3,75 \text{ (м}^2 \cdot ^0\text{С})/\text{Вт}$ . Каркасная стена имеет максимальную из рассмотренных величину сопротивления теплопередаче  $R_s = 3,75 \text{ (м}^2 \cdot ^0\text{С})/\text{Вт}$ . Эта величина полностью соответствует нормативным показателям (для Красноярска нормативный  $R = 3,6 \text{ (м}^2 \cdot ^0\text{С})/\text{Вт}$ ). Температура поверхности пола и стен всех рассмотренных конструкций соответствует санитарно-гигиеническим требованиям, точка росы находится внутри массива стены. Теплотехнические показатели ограждающих конструкций из газобетона и древесно-минерального композита существенно хуже.  $R_s = 2,0 \text{ (м}^2 \cdot ^0\text{С})/\text{Вт}$  и  $R_s = 1,73 \text{ (м}^2 \cdot ^0\text{С})/\text{Вт}$ , соответственно. Конструкция полов по грунту с эффективным утеплителем в виде ЭППС имеет высокие показатели тепловой эффективности  $17 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^0\text{С})$ , что практически вдвое эффективней конструкции полов из ксилолита  $32 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^0\text{С})$ . Таким образом, рассматривая рациональную конструкцию эффективного и недорогого объекта ИЖС возможно сочетание, например стен из ДМК, а полов из бетона с утеплителем ЭППС, или варианты каркаса на МЗЛ фундаменте.

Ситуация кардинальным образом меняется в режиме периодической, непостоянной генерации тепла. Для принятых условий работы генерирующей тепло установки (10 часов в сутки) каркасная конструкция и стена из газобетона D400 из-за недостаточной массивности и теплоаккумуляции быстро остывают.

Зададимся условием эксплуатации А, нормальный влажностный режим, температура формирования точки росы  $+11 \text{ } ^0\text{С}$ . Согласно данным графика (рис. 6), температура стены снизится до  $+11 \text{ } ^0\text{С}$  через  $7,5 \text{ ч}$  — для каркасной стены, через  $18 \text{ ч}$  — для стены из газоблоков. Поверхность стены из древесно-минерального композита даже на 5-е сутки будет иметь температуру  $+11,3 \text{ } ^0\text{С}$ . Поверхность пола остынет до  $+11 \text{ } ^0\text{С}$  через  $18,1 \text{ ч}$  у каркасной конструкции, через  $68 \text{ ч}$  у конструкции из ДМК, бетонные полы по грунту с утеплителем ЭППС и стеной из газоблоков на 5-е сутки остынут до  $+14,2 \text{ } ^0\text{С}$ . Таким образом, в условиях непостоянной генерации тепловой энергии, легкие каркасные стены с утеплителем из минеральной плиты не обеспечивают нормативные санитарные условия, конструкция быстро прогревается и также быстро остывает. Опыт проживания в таких домах показывает, что, желая максимально быстро обеспечить повышение температуры в помещении (например, вернувшись домой с работы), жильцы начинают форсировано протапливать печь или котел. При этом температура в помещении резко повышается, становится душно, и приходится интенсивно проветривать помещение. В условиях низкой массивности и теплонакопления каркасных стен эксплуатант жилого объекта для обеспечения постоянной генерации тепловой энергии пытается обеспечить длительное горение топлива в котле или печи. Обеспечить устойчивое горение в твердотопливных печах и котлах малой интенсивностью тепловыделения достаточно затруднительно. Обычно это достигается ограничением притока воздуха. При этом температура внутри топочной камеры, дымоходе резко снижаются, уменьшается скорость течения дымовых газов. При снижении температуры топочных газов ниже точки росы в дымоходах активно формируется конденсат. А учитывая то, что топливом помимо дров служит низкосортный бурый уголь с повышенным содержанием серы, в сочетании с влагой образуются кислоты, способствующие активной коррозии частей дымоходов, топочных колодцев и конвективной части котлов.

Кроме того, важен фактор фактического теплового сопротивления конструкции. Установлено [24], что максимальная величина несоответствия расчетного и фактического термического сопротивления имеет место для конструкций с утеплителем (наблюдаются отклонения до  $56 \%$  от нормативного). При этом на термическое сопротивление влияет качество строительных решений, такие как наличие и место установки пароизоляции, средства монтажа слоя утеплителя [24]. Т. е. при условии работы малоквалифицированного застройщика практически невозможно обеспечить качественное выполнение узлов многослойной каркасной стены. Таким образом, каркасная конструкция с фундаментом на винтовых сваях малопривлекательна для комфортного проживания в условиях периодической тепловой генерации.

Конструкция из газобетона с ленточным мелкозаглубленным фундаментом, с точки зрения тепловых показателей, выглядит существенно более выигрышно. Температура внутренней поверхности стены снизится до критично низкой величины через  $18 \text{ ч}$ . Т. е. в принципе, учитывая среднее время отсутствия жильцов в доме (не более  $10 \dots 12 \text{ ч}$  в сутки), имеется возможность компенсировать потери тепла протопкой котла или печи. Особенно перспективна конструкция пола из массива бетона с утеплителем в виде ЭППС, которые даже на 5-е сутки сохраняют нормативную температуру поверхности.

Стены из древесно-минерального композита в принятых эксплуатационных условиях имеют лучшие эксплуатационные характеристики. За счет большей массивности теплоем-

кости в процессе тепловой генерации они «запасают» тепло и «отдают» его в помещение при остывании. Даже на 5-е сутки температура поверхности стены не выходит в режим конденсации влаги в виде росы. Полы из ксилолита менее эффективны, поскольку не имеют тепловой изоляции от поверхности грунта. В случае их устройства по слою ЭППС, тепловые показатели будут еще выше.

**Заключение.** Рассматривая ограждающие конструкции объектов малоэтажного домостроения сельских и лесных районов, определяющим решением в пользу той или иной технологии будет являться фактор высокой тепловой эффективности, простоты возведения, доступности материалов. В исследовании рассматривались три варианта таких конструкций. Это каркасная, стена из газобетона и их древесно-минерального композита.

Программные средства имитационного моделирования, в частности пакет программ Elcut в сочетании с КОМПАС поз-

воляют определять показатели тепловой эффективности в стационарных и нестационарных условиях. Величина удельных потерь теплоты через расчетную конструкцию в условиях стационарного режима равна: (каркасная стена — 11,7 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), древесно-минеральная стена — 21,9 Вт/(м<sup>2</sup>·°C), газобетон — 27,7 Вт/(м<sup>2</sup>·°C). Величина сопротивления теплопередаче соответственно  $R_s = 3,75$  (м<sup>2</sup>·°C)/Вт,  $R_s = 1,73$  (м<sup>2</sup>·°C)/Вт,  $R_s = 2,0$  (м<sup>2</sup>·°C)/Вт. В условиях нестационарного режима с генерацией тепла 10 ч в сутки конструкции в виде каркасной стены и газобетон имеют неудовлетворительные показатели по санитарно-гигиеническим показателям, поскольку температура поверхности стен ниже температуры точки росы.

Работа выполнена при поддержке гранта Благотворительного фонда В. Потанина (№ ГСГК -031/23).

### Литература

1. Лукьянова А.А., Кононова Е.С., Подвербных О.Е. Актуальные подходы к оценке качества жизни коренного населения мультиэтнических регионов // Региональные проблемы преобразования экономики. 2022. № 4 (138). С. 35-41.
2. Михайлов И.Р., Абрамов Н.А., Долматов С.Н., Куриленко Н.И. Роль деревянного домостроения в истории освоения лесных массивов Сибири // Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины: сб. ст. IX Всерос. науч.-практической конф. (10 марта 2022 г.). Красноярск: ФГБОУ ВО «Сибирский гос. ун-т науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева», 2022. С. 94-101.
3. Газификация [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/gas-infrastructure-expansion> // (дата обращения: 16.10.2023).
4. Уровень газификации России к концу 2025 года составит 75% [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/ekonomika/18890459> // (дата обращения: 10.10.2023).
5. В регионах Сибири до конца 2022 года планируют газифицировать более 360 тысяч хозяйств [Электронный ресурс]. URL: <https://tass.ru/ekonomika/11993517> (дата обращения: 10.10.2023).
6. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2021: стат. сб. / Росстат. М., 2021. 1112 с.
7. Рафальская Т.А., Рудяк В.Я., Литвинова Е.Е. Исследование теплозащитных свойств наружных ограждений при нарушениях теплоснабжения // Енисейская теплофизика: тез. докл. I Всерос. науч. конф. с междунар. участием (28-31 марта 2023 г.). Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2023. С. 134-136.
8. Девятникова Л.А., Емельянова Е.Г., Кузьменков А.А., Симонова А.А. Исследование технико-экономических параметров при выборе технологии возведения ограждающих конструкций индивидуальных жилых домов // Учен. записки Петрозаводского гос. ун-та. 2015. № 4 (149). С. 82-89.
9. Вильякайнен М., Алппи А., Валкама А. Индивидуальный дом «Платформа». Справочник. Проектирование и строительство. Финляндия: «Пууинфо» (Puufinfo), 2000. 137 с.
10. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М.: Минрегион России, 2012. 75 с.
11. Курочкин С.Н. Методика оценки влияния тепловой инерции материалов на теплозащитные свойства ограждающих конструкций // Вестн. Череповецкого гос. ун-та. 2013. № 2 (47). С. 12-15.
12. Maalouf C., Tran Le A.D., Umurigirwa S.B., Lachi M., Douzane O. Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France, Energy and Buildings. 2014. V. 77. P. 48-57.
13. Florence Collet, Sylvie Pretot. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, Construction and Building Materials. 2014. V. 65. P. 612-619.
14. Bederina M., Marmoret L., Mezreb K., Khenfer M.M., Bali A., Quéneudec M. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling, Construction and Building Materials. 2007. 21. P. 662-668.
15. Грызлов В.С., Курочкин С.Н. Оценка тепловой инерционности при теплотехническом расчете ограждающих конструкций // Строительные материалы. 2013. № 8. P. 73-76.
16. Грызлов В.С., Каптюшин А.Г. Предложения по нормированию сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 1. С. 41-46.
17. Elisa Guelpa, Vittorio Verda. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review, Applied Energy. 2019. V. 252. P. 113474.
18. Курочкин С.Н. Оценка нестационарных тепловых воздействий на ограждающие конструкции в натуральных условиях // Череповецкие науч. чтения: материалы Всерос. науч.-практической конф. (1-2 нояб. 2012 г.). Череповец, 2012. С. 143-146.
19. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя. СПб.: ПК TOP, 2009. 339 с.
20. Долматов С.Н., Колесников П.Г. Исследование тепловой эффективности ограждающих конструкций из древесно-цементных композитов // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 4. С. 294-299.
21. Долматов С.Н., Колесников П.Г. Исследование влияния материала кладочных швов на тепловую эффективность ограждающих конструкций из древесно-цементных композитов // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер. Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 4. С. 34-44.
22. Dolmatov S.N. Use of wood and mineral composite as an alternative filler for sip panels. AIP Conf. Proc. 21 August 2023; 2911 (1): 020041. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0162672> (дата обращения: 15.11.2023).
23. Dolmatov S.N. Factors that determine the thermal insulation performance of enclosing structures made of wood-mineral composites. AIP Conf. Proc. 8 November 2022; 2767 (1): 020007. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0127526> (дата обращения: 15.11.2023).
24. Тарасюк П.Н., Ващенко Д.А., Трубаев П.А., Радченко В.В. Анализ термического сопротивления ограждающих конструкций различного типа по результатам инструментальных измерений // Вестн. Белгородского гос. технологического ун-та им. В.Г. Шухова. 2015. № 2. С. 152-158.

### References

1. Luk'yanova A.A., Kononova E.S., Podverbnyh O.E. Current approaches to assessing the quality of life of the indigenous population of multiethnic regions // Regional problems of transforming the economy. 2022. № 4 (138). P. 35-41.
2. Mihajlov I.R., Abramov N.A., Dolmatov S.N., Kurilenko N.I. The role of wooden house construction in the history of the development of forests in Siberia // Lesoekspluatatsiya i kompleksnoe ispol'zovanie drevesiny: sb. st. IX Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (10 marta 2022 g.). Krasnoyarsk: FGBOU VO «Sibirskij gos. un-t nauki i tekhnologij im. akad. M.F. Reshetneva», 2022. P. 94-101.
3. Gasification [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.gazprom.ru/about/production/gas-infrastructure-expansion> // (data obrashcheniya: 16.10.2023).
4. The level of gasification in Russia by the end of 2025 will be 75% [Elektronnyj resurs]. URL: <https://tass.ru/ekonomika/18890459> // (data obrashcheniya: 10.10.2023).
5. In the regions of Siberia, by the end of 2022, it is planned to gasify more than 360 thousand farms [Elektronnyj resurs]. URL:

- <https://tass.ru/ekonomika/11993517> (data obrashcheniya: 10.10.2023).
6. Regions of Russia. Socio-economic indicators. 2021: stat. sb. / Rosstat. M., 2021. 1112 p.
  7. Rafal'skaya T.A., Rudyak V.YA., Litvinova E.E. Investigation of heat-protective properties of external fences in case of heat supply violations // Enisejskaya teplofizika: tez. dokl. I Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem (28-31 marta 2023 g.). Krasnoyarsk: Sib. fed-er. un-t, 2023. P. 134-136.
  8. Devyatnikova L.A., Emel'yanova E.G., Kuz'menkov A.A., Simonova A.A. Study of technical and economic parameters when choosing the technology for the construction of enclosing structures of individual residential buildings // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2015. № 4 (149). P. 82-89.
  9. Vil'yakajnen M., Alppi A., Valkama A. Individual house "Platforma". Spravochnik. Design and construction. Finlyandiya: «Puuinfo» (Puuinfo), 2000. 137 p.
  10. SP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. M.: Minregion Rossii, 2012. 75 p.
  11. Kurochkin S.N. Methodology for assessing the effect of thermal inertia of materials on the heat-protective properties of enclosing structures // Cherepovets State University Bulletin. 2013. № 2 (47). P. 12-15.
  12. Maalouf C., Tran Le A.D., Umurigirwa S.B., Lachi M., Douzane O. Study of hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope under summer conditions in France, Energy and Buildings. 2014. V. 77. P. 48-57.
  13. Florence Collet, Sylvie Pretot. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content, Construction and Building Materials. 2014. V. 65. P. 612-619.
  14. Bederina M., Marmoret L., Mezreb K., Khenfer M.M., Bali A., Quéneudec M. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: Experimental study and modelling, Construction and Building Materials. 2007. 21. P. 662-668.
  15. Gryzlov V.S., Kurochkin S.N. Assessment of thermal inertia in the thermal engineering calculation of enclosing structures // Construction materials. 2013. № 8. P. 73-76.
  16. Gryzlov V.S., Kaptyushin A.G. Proposals for rationing the heat transfer resistance of building enclosing structures // Modern High Technologies. 2019. № 1. P. 41-46.
  17. Elisa Guelpa, Vittorio Verda. Thermal energy storage in district heating and cooling systems: A review, Applied Energy. 2019. V. 252. P. 113474.
  18. Kurochkin S.N. Assessment of non-stationary thermal effects on enclosing structures in full-scale conditions // Cherepoveckie nauch. chteniya: materialy Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (1-2 noyab. 2012 g.). Cherepovec, 2012. P. 143-146.
  19. ELCUT. Modeling of two-dimensional fields by the finite element method. Rukovodstvo pol'zovatelya. SPb.: PK TOR, 2009. 339 p.
  20. Dolmatov S.N., Kolesnikov P.G. Investigation of thermal efficiency of enclosing structures made of wood-cement composites // Conifers of the boreal area. 2021. V. 39, № 4. P. 294-299.
  21. Dolmatov S.N., Kolesnikov P.G. Investigation of the effect of masonry joints material on the thermal efficiency of enclosing structures made of wood-cement composites // Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Materials. Constructions. Technologies. 2022. № 4. P. 34-44.
  22. Dolmatov S.N. Use of wood and mineral composite as an alternative filler for sip panels. AIP Conf. Proc. 21 August 2023; 2911 (1): 020041. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0162672> (data obrashcheniya: 15.11.2023).
  23. Dolmatov S.N. Factors that determine the thermal insulation performance of enclosing structures made of wood-mineral composites. AIP Conf. Proc. 8 November 2022; 2767 (1): 020007. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0127526> (data obrashcheniya: 15.11.2023).
  24. Tarasyuk P.N., Vashchenko D.A., Trubaev P.A., Radchenko V.V. Analysis of thermal resistance of enclosing structures of various types based on the results of instrumental measurements // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2015. № 2. P. 152-158.