

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ. ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ И ОБСЛЕДОВАНИЕ ЗДАНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 692.232.7

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.1

Выбор ограждающей конструкции для жилых зданий в условиях сурового климата

Любовь Юрьевна Гнедина

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Актуальность исследований по выбору ограждающей конструкции для увеличения тепловой защиты здания в условиях сурового климата связана со снижением затрат на отопление. Это, в свою очередь, влияет на улучшение экологической обстановки в регионах, развитие строительной индустрии при резком увеличении цен на энергоресурсы и необходимости соблюдения требований энергетической эффективности, способствует повышению интереса к технологиям, которые могут обеспечить более эффективную тепловую защиту зданий.

Материалы и методы. Изучены применяемые приемы наружных ограждающих конструкций монолитно-каркасных жилых зданий и выбраны наиболее рациональные с точки зрения тепловой защиты решения для проектирования в условиях сурового климата.

Результаты. Исследованы используемые ограждающие конструкции в зданиях с каркасной конструктивной системой, рассмотрена необходимость повышения тепловой защиты зданий в Республике Саха (Якутия), изучена сырьевая база для строительства на территории Якутии. Выполнены анализ климатических условий, расчет теплофизических свойств конструкций, экономический анализ стоимости строительных материалов и затрат на возведение ограждающих конструкций.

Выводы. Исходя из результатов исследования, составлен перечень рассматриваемых конструкций, рассчитаны теплофизические и технико-экономические показатели для ограждающих конструкций жилых зданий. Опираясь на полученные результаты, выбран наилучший вариант наружной ограждающей конструкции с точки зрения тепловой защиты зданий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тепловая защита зданий, энергоэффективность, наружные ограждающие конструкции, суровые климатические условия, теплотехнический расчет, местные сырьевые ресурсы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гнедина Л.Ю. Выбор ограждающей конструкции для жилых зданий в условиях сурового климата // Строительство: наука и образование. 2025. Т. 15. Вып. 3. Ст. 1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.1

Автор, ответственный за переписку: Любовь Юрьевна Гнедина, GnedinaLYu@mgsu.ru.

Choice of enclosing structures for residential buildings in harsh climates

Lyubov' Yu. Gnedina

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

ABSTRACT

Introduction. The relevance of research on the choice of enclosing structures to increase the thermal protection of the building in harsh climates is associated with the reduction of heating costs. However, that affects the improvement of the environmental situation in the regions, the development of the construction industry in conditions of a sharp increase in energy prices and the need to comply with the requirements of energy efficiency, contributes to increased interest in technologies that can provide a more effective thermal protection of buildings.

Materials and methods. Types of enclosing structures of monolithic frame residential buildings are studied and the most rational solutions in terms of thermal protection for designing in harsh climate conditions are selected.

Results. Enclosing structures in buildings with frame structural system were studied, the necessity of increasing thermal protection of buildings in the Republic of Sakha was considered, the resource base for construction in Yakutia was studied. The climatic conditions were analyzed, calculation of thermophysical properties of structures, economic analysis of the cost of construction materials and the cost of building envelopes were made.

Conclusions. Based on the results of the study, a list of considered structures is compiled, thermophysical and technical and economic indicators for the enclosing structures of residential buildings are calculated. Obtained results led to the selection of the best type of enclosing structure with thermal protection.

KEYWORDS: thermal protection of buildings, energy efficiency, external enclosing structures, harsh climatic conditions, thermal calculation, local raw materials

FOR CITATION: Gnedina L.Yu. Choice of enclosing structures for residential buildings in harsh climates. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(3):1. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.3.1

Corresponding author: Lyubov' Yu. Gnedina, GnedinaLYu@mgsu.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство используемых энергетических ресурсов — невозобновляемые, следовательно, необходимо применять тепловую энергию рационально и принимать меры по уменьшению энергопотребления без ухудшения эксплуатационных показателей возводимых зданий и сооружений. На энергопотребление в период эксплуатации здания приходится 90 % от общего энергопотребления строительной отрасли, большая часть из этого объема уходит на жилые здания — 50–55 % [1].

Одним из способов сокращения расхода тепловой энергии является использование эффективных ограждающих конструкций. При проектировании энергоэффективной наружной ограждающей конструкции применяют конструкции с выраженным теплоизоляционным слоем. Помимо этого, требуемый уровень тепловой эффективности достигается исходя из рационального размещения теплоизоляционных слоев в составе конструкции и увеличения однородности конструкции [2].

В работах [3–11] проанализированы преимущества и недостатки современных ограждающих конструкций, имеющих в своем составе различные строительные материалы.

В настоящее время наибольшее распространение получили две конструктивные системы многослойных ограждающих конструкций — система с вентилируемой воздушной прослойкой и система штукатурного утепленного фасада. Благодаря воздушному зазору появляется возможность удаления влаги, конденсирующейся в слое утеплителя и несущей стены. Необходимая ширина прослойки зависит от расстояния между вентиляционными отверстиями, их длины, разницы температур и плотности воздуха. Согласно теории термодинамики минимальная величина воздушного зазора должна составлять 40 мм [12].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим облицовочную систему с навесным вентилируемым фасадом. Система представля-

ет собой конструкцию, состоящую из кронштейнов, вертикальных и/или горизонтальных профилей, теплоизоляционного слоя и облицовочного слоя из различных материалов. В большинстве случаев применяется несущая подсистема из алюминия и стали. Недостаток системы — низкое значение коэффициента теплотехнической однородности за счет использования большого количества металлических включений. Для уменьшения тепловых потерь через металлические включения в системе вентилируемого навесного фасада применяют двойной слой утепления, такая конструкция увеличивает теплотехническую однородность вследствие перекрывания швов верхним слоем утеплителя [13].

Преимуществами вентилируемых фасадов можно назвать:

- способность обеспечивать защиту строительных конструкций от повреждений и атмосферных воздействий при сохранении хорошей вентиляции фасада;
- монтаж конструкции можно проводить вне зависимости от сезона;
- возможность замены облицовочного и теплоизоляционного материалов;
- возможность выбора различных облицовочных материалов.

Системы фасадные теплоизоляционные композитные (СФТК)

Имеют многослойную структуру, к основанию стены слой утеплителя крепится с помощью клеевого штукатурного раствора совместно с тарельчатыми анкерами, далее на теплоизоляционное изделие наносится базовый слой штукатурки с армированием сеткой, отделочным слоем служит декоративная штукатурка различных видов с последующим окрашиванием или без него. Преимущество конструкции заключается в ее однородности, значение количества теплопроводных включений — одно из самых наименьших среди многослойных конструкций. Высокий показатель однородности можно отнести и к недостатку конструкции, так как в случае выхода из строя или необходимости замены

системы разрушаются все слои СФТК. Проводить работы по устройству СФТК требуется при температуре не менее +5 °С иначе понижается адгезионная и ударная прочность штукатурных составов. При необходимости создания штукатурного слоя в условиях с более низкими наружными температурами следует применять специализированные штукатурные материалы с модифицирующими добавками, понижающие возможную температуру проведения работ до –10 °С [14].

Облицовка из кирпичной кладки

Применение облицовки кирпичом в многоэтажных зданиях с опиранием на межэтажное перекрытие не допускается при высоте этажа 3,6 м. При использовании лицевого кирпича стоит устраивать вертикальные и горизонтальные деформационные швы, дабы избежать аварийной ситуации при возникновении температурно-влажностных усилий из-за температурных перепадов, а также применять антикоррозийные гибкие связи для обеспечения целостности конструкции. Для соблюдения необходимого влажностного состояния конструкции следует устраивать воздушную прослойку между лицевым кирпичом и теплоизоляционным слоем, помимо этого полагается предусматривать продухи в кладке для циркуляции воздуха. К преимуществам данного вида облицовки можно отнести:

- доступность строительных материалов;
- высокий уровень огнестойкости;
- устойчивость к атмосферным воздействиям;
- экологичность.

Недостатки системы:

- трудоемкость возведения и необходимость в высококвалифицированных специалистах;
- ограничение архитектурного разнообразия;
- низкий коэффициент теплотехнической однородности вследствие применения различных гибких связей и бетонных включений;
- большая нагрузка на фундамент;
- использование материалов для внутренне-го слоя конструкции, отличных от кирпича, может повлечь независимые деформации между лицевым слоем и внутренней конструкцией.

Исходя из широкого выбора материалов и зависимости теплотехнических характеристик ограждающих конструкций от расположения слоев в массиве стен, возникает множество различных конструкций с уникальными теплотехническими параметрами. Климатические условия, а также локационная доступность сырья влияют на выбор материала, состав и толщину ограждающей конструкции. Для нахождения наиболее рационального вида ограждающей конструкции, соответствующей требованиям тепловой защиты здания, целесообразно провести исследование целого комплекса конструкций и определить наиболее оптимальные варианты исходя из теплотехнических свойств и экономических показателей.

Необходимость повышения энергоэффективности ограждающей конструкции на территории Севера и, в частности, в Республике Саха (Якутия)

Опираясь на схематическую карту районирования северной строительной климатической зоны России, представленной в СП 131.13330.2020 «Строительная климатология»¹, территории Республики Саха находятся в наиболее суровых климатических условиях.

Якутия стоит на первом месте по количеству общих запасов природных ресурсов в России, на ее территории расположено 2959 учтенных Госбалансом месторождений по 59 видам сырья на 2020 г. Для улучшения экономики нашей страны развитие стратегически значимых субъектов является приоритетной задачей. Несмотря на существенный экономический потенциал, плотность населения невелика и составляет на 2021 г. 0,32 чел/км² — это один из самых низких показателей по всей России. Якутия располагается в центре Восточной Сибири, длительность зимнего периода в разы превышает летний. Климат отличается значительной разницей температур в холодное и теплое время года, небольшим количеством осадков и слабыми ветрами.

С целью заинтересованности населения и улучшения экономической ситуации необходимо создавать благоприятные условия для эксплуатации зданий и сооружений, а также следить за эффективным использованием тепловой энергии и повышением энергоэффективности зданий. Согласно Постановлению Правительства Республики Саха (Якутия) «О проекте Стратегии социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2030 года с определением целевого видения до 2050 года» для социально-экономического развития республики и повышения уровня жизни одним из стратегических приоритетов является создание комфортной и безопасной среды проживания для человека.

На 2019 г. количество аварийного жилья в Республике Саха составило 3629 многоквартирных домов, вследствие чего существует острая необходимость в проектировании и строительстве большого количества жилых зданий.

В климатических условиях с низкими температурами (отопительный период в г. Якутске — 252 дня для жилых зданий) увеличивается потребление энергоресурсов, поэтому изучение, анализ и разработка мероприятий по сохранению и рациональному использованию поступающего тепла в здания — актуальная задача.

Все вышесказанное указывает на необходимость исследования вопросов рационального проектирования энергоэффективных ограждающих конструкций

¹ СП 131.13330.2020. Строительная климатология. М. : Стандартинформ, 2021. 153 с.

зданий, в частности, на территории с суровым климатом, а именно в Республике Саха.

Сырьевая база для строительства на территории Республики Саха (Якутия)

В связи с суровыми климатическими условиями транспортировка материалов имеет ряд сложностей, таких как большая цена и длительные сроки перевозки, что ведет к увеличению сроков строительства и повышению себестоимости объектов. Использование строительных материалов местного производства может решить возникновение этих проблем и повысить экономическую эффективность строительства.

На территории республики находится существенное количество сырья, которое может быть использовано для производства строительных материалов. Территория Якутии богата глиняным сырьем, которое возможно применять для производства изделий из керамзита. Известно 43 месторождения керамзитового сырья на территории республики, 24 из которых не учтены сводным балансом запасов. На данный момент эксплуатируются только 4 месторождения. Согласно исследованиям [15], на территории Якутии есть месторождения глин, которые можно использовать для производства легкого и высокопрочного керамзитобетона для строительства зданий различной высоты. Залежи глиняного сырья, расположенные в Якутии, возможно применять не только для производства изделий из керамзита, а также для получения лицевого кирпича, отвечающего требованиям ГОСТ 530–2012 [16–18].

На основе анализа научно-технических исследований установлена возможность производства пенобетона проектной марки D600 с использованием портландцементного клинкера АО ПО «Якутцемент» и минерального сырья Якутии. В качестве минеральных добавок для изготовления пенобетона можно применять природный цеолит Сунтарского района и кварцевый песок Ленского бассейна. Блоки из пенобетона, произведенного с использованием местного сырья, подходят для возведения наружных самонесущих стен монолитно-каркасных зданий [19, 20].

Инаглинское месторождение в Нерюнгринском районе Республики Саха (Якутия) — единственная сырьевая база вермикулита на Дальнем Востоке России. Вспученный вермикулит — экологически безопасный материал, который за счет своих теплоизоляционных свойств и сравнительно небольшого веса может применяться для производства штукатурных смесей для наружной и внутренней отделки.

Благодаря такой богатой сырьевой базе на территории республики имеется возможность строительства из различных строительных материалов: керамический кирпич, теплоизоляционные изделия на основе керамзита и ячеистого бетона, вермикулитовые материалы для оштукатуривания стен [21, 22]. Для дальнейшего исследования принимаются наружные ограждающие конструкции, подобранные исходя из конструктивной системы рассматриваемых зданий (каркасная), с учетом наиболее распространенных конструктивных решений наружных стен (табл. 1).

Табл. 1. Типы ограждающих конструкций

Наименование материала	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Толщина δ , мм	Теплопроводность λ , Вт/(м·°C)	Паропроницаемость μ , мг/(м·ч·Па)
<i>Трехслойная конструкция стены по СФТК с использованием вермикулитовой штукатурки</i>				
1.1 Тип конструкции				
Штукатурка вермикулитовая для наружных работ F50	1000	30	0,15	0,07
Плиты минераловатные	120	150	0,042	0,32
Штукатурно-клеевая смесь для минеральных плит, применение в холодных условиях	5	5	0,76	0,035
Керамзитобетонные блоки с 3-рядной пустынностью D600; B2,5; F35	600	390	0,2	0,26
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09
1.2 Тип конструкции				
Штукатурка вермикулитовая для наружных работ F50	1000	30	0,15	0,12
Плиты минераловатные	120	130	0,042	0,32
Штукатурно-клеевая смесь для минеральных плит	5	5	0,76	0,035
Пенобетонные блоки D600 на клеевом растворе, 400 × 200 мм B2,5; F25	600	300	0,14	0,17
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09

Наименование материала	Плотность ρ_0 , кг/м ³	Толщина δ , мм	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)	Паропроницаемость μ , мг/(м·ч·Па)
<i>Трехслойная конструкция с вентилируемым зазором с облицовкой кирпичом</i>				
2.1 Тип конструкции				
Керамический кирпич лицевой пустотелый утолщенный ГОСТ 530–2012 М100; F75; на цементном растворе М100	1600	120	0,58	0,14
Воздушный зазор	–	40	–	–
Плиты минераловатные	120	200	0,042	0,32
Керамзитобетонные блоки с 3-рядной пустынностью D600; В2,5	600	390	0,2	0,26
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09
2.2 Тип конструкции				
Керамический кирпич лицевой пустотелый утолщенный ГОСТ 530–2012 М100; F75; на цементном растворе М100	1600	120	0,58	0,14
Воздушный зазор	–	40	–	–
Плиты минераловатные	120	180	0,042	0,32
Пенобетонные блоки D600 на клеевом растворе, 400 × 200 мм В2,5; F25	600	300	0,14	0,17
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09
<i>Трехслойная конструкция стены с вентилируемым зазором по системе навесной вентилируемый фасад (НВФ)</i>				
3.1 Тип конструкции				
Композитные плиты по системе НВФ	7000	2	48	–
Воздушный зазор	–	60	–	–
Плиты минераловатные	120	200	0,042	0,32
Керамзитобетонные блоки с 3-рядной пустынностью D600; В2,5	600	390	0,2	0,26
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09
3.2 Тип конструкции				
Композитные плиты по системе НВФ	7000	2	48	–
Воздушный зазор	–	60	–	–
Плиты минераловатные	120	200	0,042	0,32
Пенобетонные блоки D600 на клеевом растворе, 400 × 200 мм В2,5; F25	600	300	0,14	0,17
Цементно-песчаная штукатурка для внутренних работ	1800	20	0,76	0,09

Теплотехнический расчет

При выполнении теплотехнического расчета были учтены материалы, изложенные в статье [23].

Теплотехнический расчет производится для жилого многоэтажного здания на территории г. Якутска. Для проведения расчетов на соблюдение поэлементного требования согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий»² рассматривается глухая

часть стены каркасно-монолитного здания размером 1000 × 1000 мм. В качестве точечных включений рассматриваются теплозащитные элементы, рекомендованные для соответствующих видов стеновых конструкций СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей»³.

² СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М. : Мин-регион России, 2012. 100 с.

³ СП 230.1325800.2015. Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей. М. : Минстрой России, 2015. 72 с.

Исходные данные для расчета представлены в табл. 2, на их основе получены расчетные показатели для района строительства (табл. 3).

Для трехслойных конструкций стен с облицовкой по СФТК с наружными штукатурными слоями в качестве точечных неоднородностей принимаются тарельчатые анкеры с заглушкой, обеспечивающей гидро- и теплоизоляцию из морозостойкого полиэтилена, стальной распорный элемент имеет антикоррозийное покрытие. При возведении трехслойной стены с облицовочным слоем из лицевого кирпича используются гибкие связи металлические из коррозионностойкой стали с тарельчатым дюбелем, обеспечивающие создание вентиляционного зазора толщиной 40 мм. Для крепления системы навесного вентилируемого фасада используются кронштейны алюминиевые, усиленные высотой 150 мм

и шириной 55 мм. Крепление кронштейнов производится к межэтажным перекрытиям.

Удельные потери тепла через точечные включения χ_k , Вт/°С, и их количество на 1 м² n_k , шт/м², для различных типов конструкции указаны в табл. 4, данные были определены, опираясь на техническую документацию производителей и нормативную документацию СП 230.1325800.2015 «Конструкции ограждающие зданий. Характеристики теплотехнических неоднородностей».

Для соблюдения поэлементного требования необходимо, чтобы величина приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки $R_{o\text{пр}}$, (м²·°С)/Вт, была больше нормируемого значения $R_o^{\text{норм}}$, (м²·°С)/Вт (СП 50).

Приведенное сопротивление теплопередаче фрагмента теплозащитной оболочки без учета линейных

Табл. 2. Исходные данные для проведения теплотехнического расчета

Расчетный параметр	Расчетное значение по СП 50.13330.2012
Влажностный режим	Нормальный ²
Относительная влажность воздуха внутри здания ϕ_v , %	55 (по СП 50)
Условия эксплуатации конструкции	A (по СП 50)
Температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 $t_{н^{\circ}}$, °С	–52 (по СП 131)
Продолжительность отопительного периода со средней суточной температурой наружного воздуха не более 8 °С $Z_{от}$, сут	252 (по СП 131)
Средняя температура наружного воздуха для периода со средней суточной температурой наружного воздуха не более 8 °С $t_{от}$, °С	–20,6 (по СП 131)
Расчетная средняя температура внутреннего воздуха помещений здания для теплозащиты $t_{в}$, °С	21
Коэффициенты теплоотдачи: • внутренней поверхности конструкций $\alpha_{в}$, Вт/(м ² ·°С); • наружной поверхности конструкций с воздушным зазором $\alpha_{н}$, Вт/(м ² ·°С); • наружной поверхности конструкций без воздушного зазора $\alpha_{н}$, Вт/(м ² ·°С)	8,7 (по СП 50) 12 (по СП 50) 23 (по СП 50)

Табл. 3. Расчетные показатели для района строительства

Расчетный параметр	Расчетное значение
Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП), °С·сут/год	10 483,2
Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередачи ограждающей конструкции $R_o^{\text{норм}}$, м ² ·°С/Вт	5,069
Базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции $R_o^{\text{тр}}$, м ² ·°С/Вт	5,069

Табл. 4. Расчетные показатели для района строительства

Тип конструкции	Тип точечных включений	n_k , шт/м ²	χ_k , Вт/°С
1.1	Тарельчатые анкеры	6,7	0,001
1.2	Тарельчатые анкеры	6,7	0,001
2.1	Гибкие связи	9,0	0,006
2.2	Гибкие связи	7,0	0,006
3.1	Кронштейны	0,56	0,079
	Тарельчатые анкеры	6,94	0,001
3.2	Кронштейны	0,56	0,080
	Тарельчатые анкеры	6,94	0,001

Табл. 5. Сравнительный анализ конструкций

Тип конструкции	R_{n1}^{TP}	R_{n2}^{TP}	R_n	Плоскость увлажнения
1.1	0,671	2,446	2,334	Слой утеплителя (плиты минераловатные)
1.2	0,666	2,869	2,536	
2.2	2,160	1,752	2,549	
3.2	0,000	1,600	2,612	

элементов R_o^{np} , (м²·°C)/Вт определяется по формуле (СП 50):

$$R_o^{np} = \frac{1}{1/R_o^{ysl} + \sum n_k \chi_k}, \tag{1}$$

где R_o^{ysl} — осредненное по площади условное сопротивление теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции, (м²·°C)/Вт.

Коэффициент однородности рассчитан по формуле (СП 50):

$$r = R_o^{np}/R_o^{ysl}. \tag{2}$$

Расчет конструкции на защиту от переувлажнения

Необходимо проверить конструкцию на защиту от переувлажнения, чтобы определить, будет ли выпадать конденсат в толще конструкции (СП 50). Для обеспечения этого требования необходимо, чтобы конструкция была запроектирована с сопротивлением паропроницанию внутренних слоев (от внутренней поверхности до плоскости максимального увлажнения) R_n , (м²·ч·Па)/мг, не менее наибольшего из требуемых значений паропроницанию R_{n1}^{TP} , R_{n2}^{TP} , (м²·ч·Па)/мг, т.е. следует обеспечить соблюдение требований (СП 50):

$$R_n > R_{n1}^{TP};$$

$$R_n > R_{n2}^{TP},$$

где R_{n1}^{TP} — требуемое сопротивление паропроницанию из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации; R_{n2}^{TP} — требуемое сопротивление паропроницанию из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха (СП 50).

Расчет экономических показателей ограждающих конструкций

Требуется рассчитать себестоимость и общую сметную стоимость возведения ограждающих конструкций.

Используем для: определения расценок на материалы индекс $K_m = 10,99^4$; расценок на эксплуатацию машин и механизмов $K_{эм} = 18,34^5$; установления расценок на оплату труда $K_{зп} = 65,38^6$.

Полная сметная стоимость складывается из прямых затрат, накладных расходов и сметной прибыли. Следует учесть затраты от уплаты налога на добавленную стоимость (НДС). Размер НДС составляет 20 % от сметной стоимости.

Выбор наиболее эффективной ограждающей конструкции для обеспечения тепловой защиты здания в условиях сурового климата

Для проведения окончательного сравнительного анализа была рассчитана нагрузка от 1 пог. м стеновой конструкции на плиту перекрытия. Результаты проведенных расчетов указаны в табл. 5.

Конструкции 3.2 удовлетворяет обязательное поэлементное требование, проходит проверку на защиту от переувлажнения, толщина конструкции является ниже средней в сравнении с рассматриваемыми в работе типами конструкций. Нагрузка на перекрытия, оказываемая наружной стеной, почти вдвое меньше в сравнении с конструкциями с облицовочным слоем из керамического кирпича.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты теплотехнического расчета рассматриваемых конструкций представлены в табл. 6.

На основании расчетов можно сделать вывод, что конструкция 2.1 с конструктивно-теплоизоляционным слоем из керамзитобетона и облицовкой из лицевого кирпича имеет наибольшую толщину конструкции и величину утеплителя выше среднего

⁴ Об утверждении Методики определения сметных цен на материалы, изделия, конструкции, оборудование и цен услуг на перевозку грузов для строительства : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 20.12.2016 № 1001/пр.

⁵ Расценки на эксплуатацию строительных машин и авто-транспортных средств : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 26.12.2019 № 876/пр.

⁶ Об утверждении Методики определения сметных цен на затраты труда работников в строительстве : Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 01.07.2022 № 534/пр.

Табл. 6. Результаты теплотехнического расчета

Тип	Толщина конструкции δ_k , мм	Толщина утеплителя $\delta_{ут}$, мм	$R_o^{пр}$, $м^2 \cdot ^\circ C / Вт$	Коэффициент однородности, учитывающий точечные включения r
1.1	595	150	5,687	0,96
1.2	485	130	5,425	0,96
2.1	730	200	5,225	0,72
2.2	640	180	5,424	0,78
3.1	592	200	5,105	0,73
3.2	522	200	5,323	0,74

значения в 1,23 и 1,13 раз соответственно, при этом приведенное значение сопротивления теплопередачи с учетом точечных включений является наименьшим. Конструкция 3.1 также имеет толщину утеплителя выше среднего значения в 1,13 раз, при этом приведенное значение сопротивления теплопередачи наименьшее из рассматриваемых конструкций. На базе проведенного анализа можно сказать, что стеновые конструкции из керамзитобетонных блоков с воздушным зазором и облицовкой лицевым кирпичом, а также облицовкой по навесной фасадной системе композитными плитами не рекомендуется применять в рассмотренных условиях с суровым климатом. Опираясь на данные табл. 5, можно убедиться, что конструкции по СФТК имеют наименьшее количество точечных теплопроводных включений, конструкции наиболее однородны.

Для выполнения дальнейшего исследования конструкции тип 2.1 и 3.1 следует исключить из списка рассматриваемых. Результаты расчета на защиту от переувлажнения приведены в табл. 7.

Конструкции с отделкой по СФТК не проходят проверку на защиту от переувлажнения и не удов-

летворяют требованиям по паропроницаемости, следовательно, в этих конструкциях будет накапливаться влага. Зона максимального увлажнения находится в слое утеплителя: минеральная вата ПЖ, за счет переувлажнения эксплуатационные и теплоизоляционные свойства утеплителя и штукатурной облицовки будут значительно снижены, что может привести к созданию неблагоприятных условий для пребывания человека и повышению тепловых потерь через конструкцию. Учитывая результаты, конструкции не могут быть использованы для эксплуатации в зданиях и сооружениях. Для дальнейшего исследования конструкции типа 1.1, 1.2 не будут использованы.

Результаты по расчету сметной стоимости строительства рассматриваемых конструкций стен указаны в табл. 8.

Устройство слоя отделки из керамического кирпича на 21,7 % эффективнее, чем устройство системы навесного вентилируемого фасада согласно локальной смете.

Табл. 7. Результаты расчета на защиту от переувлажнения

Тип конструкции	$R_{n1}^{тр}$	$R_{n2}^{тр}$	R_n	Плоскость увлажнения
1.1	0,671	2,446	2,334	Слой утеплителя (плиты минераловатные)
1.2	0,666	2,869	2,536	
2.2	2,160	1,752	2,549	
3.2	0,000	1,600	2,612	

Табл. 8. Результаты сметного расчета на 1 м²

Наименование затрат	Сметная стоимость в базисном уровне цен, руб.	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
Итого прямые затраты	16 504	66 021
Итого фонд оплаты труда (ФОТ)	388,62	25 408
Итого накладные расходы	436,86	28 562
Итого сметная прибыль	245,02	16 019
Итого по конструкции типа 3.2 с учетом НДС		132 724
Итого прямые затраты	17 227,43	53 143,85
Итого ФОТ	517,14	33 811
Итого накладные расходы	555,26	36 303
Итого сметная прибыль	275,69	18 024
Итого по конструкции типа 4.2 с учетом НДС		169 541

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе научно-исследовательской работы выявлено, что наилучшим вариантом конструкции для проектирования с точки зрения тепловой защиты здания в условиях сурового климата является конструкция из пенобетонных блоков D600 толщиной 300 мм с теплоизоляционным слоем из минераловатного утеплителя ПЖ120 толщиной 200 мм с применением навесной фасадной системы с отделкой композитными панелями и системой крепления к межэтажному перекрытию.

Конструкция с облицовочным слоем из лицевого кирпича имеет больший вес и толщину. Конструкция из пенобетонных блоков D600 толщиной 300 мм с теплоизоляционным слоем из минераловатного утеплителя ПЖ120 толщиной 180 мм и лицевым слоем из керамического кирпича с устрой-

ством вентилируемого зазора на 22 % эффективнее конструкции 3.2 по экономическим показателям, исходя из этого рекомендовано продолжить изучение возможности использования данного типа конструкции для малоэтажных жилых зданий в условиях сурового климата.

Конструкции с применением пенобетонных блоков и керамических изделий возможно использовать для строительства эффективных ограждающих конструкций, таким образом рекомендовано продолжить изучение применения местных ресурсов для производства указанных материалов с целью увеличения экономической эффективности конструкций. Сдерживающим фактором служит низкая культура производства пенобетонных блоков и, как следствие, неустойчивые теплотехнические и прочностные характеристики блоков даже в пределах одной партии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гликин С.М. Современные ограждающие конструкции и энергоэффективность зданий. М., 2003. 157 с.
2. Adilhodzhayev A., Shaumarov S., Shipacheva E., Shermuhamedov U. New method for diagnostic of heat engineering and mechanical properties of cellular concrete // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. Vol. 9. Issue 1. Pp. 6885–6887. DOI: 10.35940/ijeat.a2993.109119
3. Александровский С.В. Долговечность наружных ограждающих конструкций : монография. М. : НИИСФ РААСН, 2004. 322 с. EDN QNKKYB.
4. Ясин Ю.Д., Ясин В.Ю., Ли А.В. Пенополистирол. Ресурс и старение материала. Долговечность конструкций // Строительные материалы. 2002. № 5. С. 33–35. EDN IBEEST.
5. Хаит В.Л. Фундаментальная наука и жилище будущего // Жилищное строительство. 2004. № 10. С. 4–5. EDN IXUGJH.
6. Фокин В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита. М. : Машиностроение-1, 2006. EDN QMJGGF.
7. Табунчиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания. М. : АВОК-пресс, 2003. 192 с.
8. Табунчиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий (2-е издание, исправленное и дополненное). М. : АВОК, 2012. 204 с. EDN SXQNSV.
9. Савин В.К. Строительная физика. Энергоэкономика. М. : Лазурь, 2011. 415 с. EDN QNPJFL.
10. Опарина Л.А. Результаты расчета энергоемкости жизненного цикла зданий // Жилищное строительство. 2013. № 11. С. 50. EDN RKVZMJ.
11. Матросов Ю.А. Энергосбережение в зданиях. Проблема и пути ее решения : монография. М. : НИИСФ, 2008. 495 с.
12. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гнедина Л.Ю., Гуцин А.В. Воздушная прослойка в многослойных ограждающих конструкциях при нестационарном тепло- и массопереносе // Информационная среда вуза : мат. XI Междунар. науч.-техн. конф. 2004. 676 с.
13. Юн А.Я. Анализ эффективности двухслойного и однослойного утепления вентилируемых фасадов // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 77. EDN ZCSLAD.
14. Косарев Л.В., Добрынкина О.В., Болдырев Н.Ю., Костюкова Ю.С., Большанов С.А. Выбор современных модификаторов для устройства штукатурных фасадов зданий в условиях Крайнего Севера // Инновации и инвестиции. 2021. № 11. С. 168–171. EDN COEXLW.
15. Местников А.Е. Глинистое сырье Якутии для производства керамзита // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 3. С. 30–34. DOI: 10.17513/snt.39069. EDN YSCCMS.
16. Трепалина Ю.Н., Кириллова Н.К. Керамический кирпич из сырья Якутии с добавлением тонкомолотого стеклобоя // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 138–143. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d798f87.83499465. EDN ZDDGHR.
17. Осорова Р.С., Колесов М.В., Михайлов Д.А. Строительная керамика из сырья Якутии с модифицирующими добавками // Энергия молодых — строительному комплексу : сб. мат. XI Всеросс. науч.-техн. конф. 2017. С. 81–84.

18. Егорова А.Д., Осорова Р.С., Слепцова Л.В., Дьячкова Е.С., Ядреева З.И. Актуальность организации производства керамического кирпича в Якутии // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение : сб. мат. III Всеросс. науч.-практ. конф. 2014. С. 247–250. EDN SSFJSL.

19. Местников А.Е., Семенов С.С., Федоров В.И. Производство и применение пенобетона автоклавного твердения в условиях Якутии // Фундаментальные исследования. 2015. № 12–3. С. 490–494. EDN VDFWPX.

20. Рожин В.Н. Пенобетон на композиционном вяжущем из сырьевых ресурсов Якутии : дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2022. 165 с. EDN LULGGQ.

21. Буренина О.Н., Андреева А.В., Саввинова М.Е. Сырьевая база производства строительных материалов в Республике Саха (Якутия) // Инновации в науке. 2017. № 5 (66). С. 69–73. EDN YHQZQL.

22. Местников А.Е., Семенов С.С., Васильева Д.В. Рациональное использование минерально-сырьевых ресурсов Якутии в технологии строительных материалов // Фундаментальные исследования. 2017. № 12–1. С. 80–84. EDN ZXPVTB.

23. Tushina V., Tushin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. P. 103439. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103439

Поступила в редакцию 20 ноября 2024 г.

Принята в доработанном виде 18 декабря 2024 г.

Одобрена для публикации 20 января 2025 г.

ОБ АВТОРЕ: **Любовь Юрьевна Гнедина** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 298544, Scopus: 57200283960, ResearcherID: AFN-6870-2022, ORCID: 0000-0002-3402-644X; GnedinaLYu@mgsu.ru.

INTRODUCTION

Most of the energy resources used are non-renewable, therefore, it is necessary to use thermal energy rationally and take measures to reduce energy consumption without deteriorating the performance of the buildings and structures constructed. Energy consumption during the building operation period accounts for 90 % of the total energy consumption by the construction industry, most of this amount is spent on residential buildings — 50–55 % [1].

One of the ways to reduce heat energy consumption is the use of efficient building envelopes. When designing an energy-efficient exterior envelope, structures with a pronounced thermal insulation layer are used. In addition, the required level of thermal efficiency is achieved based on the rational placement of thermal insulation layers in the structure and increasing the homogeneity of the structure [2].

The works [3–11] analyze the advantages and disadvantages of modern building envelopes with different building materials.

Currently, two structural systems of multilayer building envelopes are the most widespread: the system with a ventilated air gap and the system of plaster insulated facade. Thanks to the air gap, moisture condensing in the insulation layer and the load-bearing wall can be removed. The required width of the air gap depends on the distance between the ventilation openings, their length, temperature difference and air density. According to the theory of thermodynamics, the minimum value of the air gap should be 40 mm [12].

MATERIALS AND METHODS

Consider a cladding system with a curtain-type ventilated façade. The system is a structure consisting of brackets, vertical and/or horizontal profiles, a thermal insulation layer and a cladding layer made of various materials. In most cases, a supporting sub-system made of aluminium and steel is used. The disadvantage of the system is the low value of the coefficient of thermal homogeneity due to the use of a large number of metal inclusions. In order to reduce heat losses through metal inclusions in the ventilated curtain facade system, a double layer of insulation is used; this design increases the thermal homogeneity due to the overlapping of joints with the upper layer of insulation [13].

The advantages of ventilated facades are:

- the ability to provide protection of building structures from damage and weathering while maintaining good ventilation of the facade;
- installation of the structure can be carried out regardless of the season;
- the possibility of replacing cladding and thermal insulation materials;
- the possibility of choosing different cladding materials.

Facade thermal insulation composite systems (FTCS)

They have a multilayer structure, the insulation layer is fixed to the wall base with the help of adhesive-plastering mortar together with disc anchors, then the base layer of plaster with mesh reinforcement is ap-

plied to the heat-insulating product, the finishing layer is decorative plaster of various types with or without subsequent painting. The advantage of the construction lies in its homogeneity, the value of the number of thermal conductive inclusions is one of the lowest among multilayer constructions. The high homogeneity index can also be attributed to the disadvantage of the construction, because in case of failure or the need to replace the system, all layers of FTCS are destroyed. It is necessary to carry out works on the device FTCS at a temperature of at least $+5^{\circ}\text{C}$ otherwise the adhesion and impact strength of plaster compositions decreases. If it is necessary to create a plaster layer in conditions with lower outside temperatures, it is necessary to use specialized plastering materials with modifying additives that reduce the possible temperature of works down to -10°C [14].

Brickwork cladding

The use of brick cladding in multi-storey buildings resting on the floor slab is not permitted at a storey height of 3.6 m. When using face bricks, it is necessary to make vertical horizontal expansion joints in order to avoid an emergency situation in case of temperature and humidity forces due to temperature fluctuations, and to use anti-corrosion flexible bonds to ensure the integrity of the structure. In order to maintain the required humidity state of the structure, an air gap should be created between the face brick and the thermal insulation layer, in addition to this it is necessary to provide vents in the masonry for air circulation. The advantages of this type of cladding include:

- availability of construction materials;
- high level of fire resistance;
- resistance to atmospheric influences;
- environmental friendliness.

Disadvantages of the system:

- labour-intensive erection and the need for highly qualified specialists;
- limitation of architectural diversity;
- low coefficient of thermal homogeneity due to the use of various flexible links and concrete inclusions;
- high load on the foundation;
- the use of materials for the inner layer of the structure other than bricks may entail independent deformations between the face layer and the inner structure.

Based on the wide choice of materials and the dependence of the thermal performance of the envelope on the arrangement of layers in the wall mass, many different structures with unique thermal performance parameters arise. Climatic conditions as well as the local availability of raw materials influence the choice of material, composition and thickness of the envelope. In order to find the most rational type of envelope structure that meets the requirements of thermal protection of the building, it is advisable to conduct a study of a whole complex of structures and determine the most optimal options based on thermophysical properties and economic indicators.

The need to improve the energy efficiency of the building envelope in the North and, in particular, in the Republic of Sakha (Yakutia)

Based on the schematic map of zoning of the northern construction climatic zone of Russia, presented in CP 131.13330.2020 "Construction Climatology"¹, the territory of the Republic of Sakha is located in the most severe climatic conditions. The territories of the Republic of Sakha are located in the most severe climatic conditions.

Yakutia ranks first in the number of total reserves of natural resources in Russia, with 2959 deposits of 59 types of raw materials accounted for by the State Balance for 2020. To improve the economy of our country, the development of strategically important subjects is a priority task. Despite its significant economic potential, the population density is low and amounts to 0.32 people/km² in 2021, one of the lowest figures in the whole of Russia. Yakutia is located in the centre of Eastern Siberia, and the winter period is many times longer than the summer period. The climate is characterized by a significant temperature difference between cold and warm seasons, low precipitation and weak winds.

In order to keep the population interested and improve the economic situation, it is necessary to create favourable conditions for the operation of buildings and structures, as well as to monitor the efficient use of heat energy and increase the energy efficiency of buildings. According to the Resolution of the Government of the Republic of Sakha (Yakutia) "The Draft Strategy of Socio-Economic Development of the Republic of Sakha (Yakutia) until 2030 with the definition of the target vision until 2050", one of the strategic priorities for socio-economic development of the Republic and improvement of living standards is to create a comfortable and safe living environment for people.

As of 2019, the number of emergency housing in the Republic of Sakha totaled 3,629 apartment buildings, as a result of which there is an urgent need to design and construct a large number of residential buildings.

In climatic conditions with low temperatures (the heating period in Yakutsk is 252 days for residential buildings), the consumption of energy resources increases, so the study, analysis and development of measures to preserve and rationally use the incoming heat in buildings is an urgent task.

All of the above points to the need to study the issues of rational design of energy-efficient building envelopes, in particular, in the territory with a harsh climate, namely, in the Republic of Sakha.

Raw material base for construction in the Republic of Sakha (Yakutia)

Due to harsh climatic conditions, transportation of materials has a number of difficulties, such as high

¹ CP 131.13330.2020. Construction climatology. Moscow, Standardinform, 2021; 153.

price and long transport times, which leads to longer construction periods and higher costs of construction projects. The use of locally produced construction materials can solve these problems and increase the economic efficiency of construction.

There is a significant amount of raw materials on the territory of the Republic that can be used for the production of construction materials. The territory of Yakutia is rich in clay raw materials that can be used for the production of expanded clay products. There are 43 known deposits of expanded clay raw materials on the territory of the republic, 24 of which are not included in the consolidated balance of reserves. At the moment only 4 deposits are exploited. According to studies [15], there are clay deposits on the territory of Yakutia, which can be used for the production of light and high-strength expanded clay concrete for the construction of buildings of various heights. Deposits of clay raw materials located in Yakutia can be used not only for the production of expanded clay products, but also for the production of face bricks that meet the requirements of GOST 530–2012 [16–18].

Based on the analysis of scientific and technical research, the possibility of producing foam concrete of the design grade D600 using Portland cement clinker

of JSC PO “Yakutcement” and mineral raw materials of Yakutia has been established. Natural zeolite from Suntar district and quartz sand from Lena basin can be used as mineral additives for foamed concrete production. Blocks made of foam concrete produced with the use of local raw materials are suitable for the construction of external self-supporting walls of monolithic frame buildings [19, 20].

Inaglinskoye deposit in Neryungri district of the Republic of Sakha (Yakutia) is the only raw material base of vermiculite in the Far East of Russia. Uplifted vermiculite is an environmentally safe material, which due to its thermal insulation properties and relatively low weight can be used for the production of plaster mixtures for exterior and interior finishing.

Due to such a rich raw material base on the territory of the republic there is a possibility of construction from various building materials: ceramic bricks, heat insulating products based on expanded clay and cellular concrete, vermiculite materials for wall plastering [21, 22]. For further research, the external envelope structures selected on the basis of the structural system of the buildings under consideration (frame), taking into account the most common design solutions of external walls (Table 1).

Table 1. Types of envelope structures

Name of material	Density ρ_0 , kg/m ³	Thickness δ , mm	Thermal conductivity λ , W/(m·°C)	Vapour permeability μ , mg/(m·h·Pa)
<i>Three-layer wall construction on FTCS using vermiculite plaster</i>				
1.1 Type of construction				
Vermiculite plaster for exterior works F50	1,000	30	0.15	0.07
Mineral wool boards	120	150	0.042	0.32
Plastering and adhesive mix for mineral boards, application in cold conditions	5	5	0.76	0.035
Clay concrete blocks with 3-row desert D600; B2.5; F35	600	390	0.2	0.26
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
1.2 Type of construction				
Vermiculite plaster for exterior works F50	1,000	30	0.15	0.12
Mineral wool boards	120	130	0.042	0.32
Plastering and adhesive mix for mineral boards	5	5	0.76	0.035
Foam concrete blocks D600 on glue mortar, 400 × 200 mm B2.5; F25	600	300	0.14	0.17
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
<i>Three-layer construction with ventilated gap with brick cladding</i>				
2.1 Type of construction				
Ceramic brick face hollow thickened GOST 530-2012 M100; F75; on cement mortar M100	1,600	120	0.58	0.14
Air gap	–	40	–	–
Mineral wool boards	120	200	0.042	0.32

Name of material	Density ρ_0 , kg/m ³	Thickness δ , mm	Thermal conductivity λ , W/(m·°C)	Vapour permeability μ , mg/(m·h·Pa)
Three-layer construction with ventilated gap with brick cladding				
2.1 Type of construction				
Clay concrete blocks with 3-row desert D600; B2.5	600	390	0.2	0.26
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
2.2 Type of construction				
Ceramic brick face hollow thickened GOST 530-2012 M100; F75; on cement mortar M100	1,600	120	0.58	0.14
Air gap	–	40	–	–
Mineral wool boards	120	180	0.042	0.32
Foam concrete blocks D600 on glue mortar, 400 × 200 mm B2.5; F25	600	300	0.14	0.17
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
Three-layer wall construction with a ventilated gap using a curtain-type ventilated facade (CVF) system				
3.1 Type of construction				
Composite slabs using the CVF system	7,000	2	48	–
Air gap	–	60	–	–
Mineral wool boards	120	200	0.042	0.32
Clay concrete blocks with 3-row desert D600; B2.5	600	390	0.2	0.26
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09
3.2 Type of construction				
Composite slabs using the CVF system	7,000	2	48	–
Air gap	–	60	–	–
Mineral wool boards	120	200	0.042	0.32
Foam concrete blocks D600 on glue mortar, 400 × 200 mm B2.5; F25	600	300	0.14	0.17
Cement-sand plaster for interior works	1,800	20	0.76	0.09

Thermal calculation

When performing the thermal calculation, the materials described in the article [23] were taken into account.

Thermal calculation is performed for a residential multi-storey building in Yakutsk. To perform calculations for compliance with the element-by-element requirement according to CP 50.13330.2012 “Thermal Protection of Buildings”² the blind part of the wall of a frame-monolithic building with the size of 1,000 × 1,000 mm is considered. As point inclusions we consider thermal protection elements recommended for the corresponding types of wall structures CP

230.1325800.2015 “Building envelope structures. Characteristics of thermal inhomogeneities”³.

The initial data for the calculation are presented in Table 2, and on their basis the design indicators for the construction area are obtained (Table 3).

For three-layer wall constructions with FTCS cladding with external plaster layers as point heterogeneities, disc anchors with a plug providing hydro- and thermal insulation made of frost-resistant polyethylene are accepted, the steel spacer element has an anti-corrosion coating. When erecting a three-layer wall with a facing layer of face brick, flexible metal links

² CP 50.13330.2012. Thermal protection of buildings. Moscow, Ministry of Regional Development of Russia, 2012; 100.

³ CP 230.1325800.2015. Building envelope structures. Characteristics of thermal inhomogeneities. Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2015; 72.

Table 2. Initial data for heat engineering calculation

Calculation parameter	Estimated value by CP 50.13330.2012
Humidity regime	Normal ²
Relative humidity of air inside the building ϕ_h , %	55 (according to CP 50)
Operating conditions of the structure	A (according to CP 50)
Air temperature of the coldest five-day period with a probability of 0.92 t_c , °C	−52 (according to CP 131)
Duration of the heating period with average daily outside air temperature not exceeding 8 °C t_h , days	252 (according to CP 131)
Average outdoor air temperature for the period with average daily outdoor air temperature not exceeding 8 °C t_{out} , °C	−20.6 (according to CP 131)
Estimated average indoor air temperature of the building premises for thermal protection t_m , °C	21
Heat transfer coefficients: • internal surface of structures α_{in} , W/(m ² ·°C); • external surface of structures with air gap α_{out} , W/(m ² ·°C); • external surface of structures without air gap α_{out} , W/(m ² ·°C)	8.7 (according to CP 50) 12 (according to CP 50) 23 (according to CP 50)

Table 3. Estimates for the construction area

Calculation parameter	Estimated value
Heating period degree-days (HPDD), °C·days/year	10,483.2
Normative value of the reduced heat transfer resistance of the enclosing structure R_o^{norm} , m ² ·°C/W	5.069
Basic value of the required heat transfer resistance of the envelope R_o^{req} , m ² ·°C/W	5.069

made of corrosion-resistant steel with a disc dowel are used to create a 40 mm thick ventilation gap. Aluminium reinforced brackets 150 mm high and 55 mm wide are used for fixing the curtain-type ventilated facade system. The brackets are fastened to the floor slabs.

Specific heat losses through point inclusions χ_k , W/°C, and their number per 1 m² n_k , pcs/m², for different types of construction are shown in Table 4, the data were determined based on the manufacturers' technical documentation and normative documentation CP 230.1325800.2015 "Building envelope structures. Characteristics of thermal inhomogeneities".

To comply with the itemized requirement, the reduced heat transfer resistance of the heat shield fragment R_o^{req} , (m²·°C)/W, must be greater than the standard value R_o^{norm} , (m²·°C)/W (CP 50).

The reduced heat transfer resistance of a fragment of the heat-shielding shell without taking into ac-

count linear elements R_o^{req} , (m²·°C)/W is determined by the formula (CP 50):

$$R_o^{req} = \frac{1}{1/R_o^{rel} + \sum n_k \chi_k}, \quad (1)$$

where R_o^{rel} is the average conditional heat transfer resistance of a fragment of the enclosing structure, (m²·°C)/W.

The uniformity coefficient is calculated using the formula (CP 50):

$$r = R_o^{req}/R_o^{rel}. \quad (2)$$

Calculation of the structure for protection against overwatering

It is necessary to test the structure against overwatering to determine whether condensation will occur within the structure (CP 50). To ensure this requirement, the structure must be designed with a vapour permeabil-

Table 4. Estimated values for the construction area

Type of construction	Type of point inclusions	n_k , pcs/m ²	χ_k , W/°C
1.1	Disc anchors	6.7	0.001
1.2	Disc anchors	6.7	0.001
2.1	Flexible links	9.0	0.006
2.2	Flexible links	7.0	0.006
3.1	Brackets	0.56	0.079
	Disc anchors	6.94	0.001
3.2	Brackets	0.56	0.080
	Disc anchors	6.94	0.001

ity resistance of the internal layers (from the internal surface to the plane of maximum wetting) R_n , (m²·h·Pa)/mg, not less than the highest of the required vapour permeability values R_{n1}^{req} , R_{n2}^{req} , (m²·h·Pa)/mg, i.e. the requirements of (CP 50) must be met:

$$R_n > R_{n1}^{req};$$
$$R_n > R_{n2}^{req},$$

where R_{n1}^{req} — the required resistance to vapour permeability from the condition of inadmissibility of moisture accumulation in the building envelope for the annual period of operation; R_{n2}^{req} — the required resistance to vapour permeability from the condition of moisture limitation in the building envelope for the period with negative average monthly outdoor temperatures (CP 50).

Calculation of economic indicators of building envelopes

It is required to calculate the cost of production and total estimated cost of building envelopes.

We use for: determining the rates for materials index $K_m = 10,99^4$; rates for the operation of machines and mechanisms $K_{mo} = 18,34^5$; establishing rates for labour costs $K_s = 65,38^6$.

⁴ Approval of the Methodology for Determination of Estimated Prices for Materials, Products, Structures, Equipment and Service Prices for Cargo Transportation for Construction : Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation of 20.12.2016 No. 1001/pr.
⁵ Cost rates for the operation of construction machinery and motor vehicles : Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation from 26.12.2019 No. 876/pr.
⁶ Approval of the Methodology for Determination of Estimated Prices for Labour Costs of Employees in Construction : Order of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation from 01.07.2022 № 534/pr.

The total estimated cost consists of direct costs, overheads and estimated profit. It is necessary to take into account expenses from payment of the value added tax (VAT). The amount of VAT is 20 % of the estimated cost.

Selection of the most efficient building envelope to ensure thermal protection of the building in a harsh climate condition

For the final comparative analysis, the load from 1 r. m. of the wall structure on the floor slab was calculated. The results of the calculations are shown in Table 5.

Structure 3.2 fulfils the mandatory element-by-element requirement, passes the test for protection against overwatering, the thickness of the structure is below average compared to the types of structures considered in this work. The load on the floor slabs exerted by the external wall is almost halved compared to structures with a ceramic brick facing layer.

RESEARCH RESULTS

The results of the thermal calculation of the considered structures are presented in Table 6.

Based on the calculations, it can be concluded that construction 2.1 with a structural and thermal insulation layer of expanded clay concrete and face brick cladding has the greatest thickness of the structure and the value of insulation above the average value by a factor of 1.23 and 1.13, respectively, with the present value of heat transfer resistance taking into account point inclusions being the smallest. Construction 3.1 also has a thickness of insulation above the average value of 1.13 times, and the reduced value of heat transfer resistance is the smallest of the considered constructions. On the basis of the analysis we can say that wall constructions made of expanded clay concrete blocks with air gap and facing with face brick, as well as facing with composite slabs on the curtain facade system are not recommended to be used in the considered conditions with

Table 5. Comparative analysis of designs

Type of construction	R_{n1}^{req}	R_{n2}^{req}	R_n	Moistening plane
1.1	0.671	2.446	2.334	Insulation layer (mineral wool slabs)
1.2	0.666	2.869	2.536	
2.2	2.160	1.752	2.549	
3.2	0.000	1.600	2.612	

Table 6. Results of thermal calculation

Type	Thickness of the structure δ_k , mm	Insulation thickness δ_{ut} , mm	R_o^{req} , (m ² ·°C)/W	Homogeneity coefficient for point inclusions r
1.1	595	150	5.687	0.96
1.2	485	130	5.425	0.96
2.1	730	200	5.225	0.72
2.2	640	180	5.424	0.78
3.1	592	200	5.105	0.73
3.2	522	200	5.323	0.74

Table 7. Calculation results for overwatering protection

Type of construction	R_{n1}^{req}	R_{n2}^{req}	R_n	Moistening plane
1.1	0.671	2.446	2.334	Insulation layer (mineral wool slabs)
1.2	0.666	2.869	2.536	
2.2	2.160	1.752	2.549	
3.2	0.000	1.600	2.612	

Table 8. Results of estimated calculation per 1 m²

Name of expenditure	Estimated cost in base price level, rub.	Estimated cost at current price level, rub.
Total direct costs	16,504	66,021
Total labour compensation fund (LCF)	388.62	25,408
Total overheads	436.86	28,562
Total estimated profit	245.02	16,019
Total for construction type 3.2 including VAT		132,724
Total direct costs	17,227.43	53,143.85
Total LCF	517.14	33,811
Total overheads	555.26	36,303
Total estimated profit	275.69	18,024
Total for construction type 4.2 including VAT		169,541

severe climate. Based on the data in Table 5, it can be seen that the FTCS structures have the smallest number of point thermal conductive inclusions, the structures are the most homogeneous.

In order to carry out further research, the constructions of type 2.1 and 3.1 should be excluded from the list of considered constructions. The results of the calculation for protection against overmoistening are given in Table 7.

Structures with FTCS finishes are not tested for protection against overwatering and do not fulfil the requirements for vapour permeability, therefore, moisture will accumulate in these structures. The zone of maximum wetting is in the layer of insulation: mineral wool HR, due to over-wetting the performance and thermal insulation properties of the insulation and plaster lining will be significantly reduced, which can lead to unfavourable conditions for human occupancy and increased heat losses through the structure. Considering the results, the structures cannot be used for operation in buildings and structures. For further research the constructions of type 1.1, 1.2 will not be used.

The results of calculation of the estimated cost of construction of the considered wall constructions are shown in Table 8.

The installation of a ceramic brick finishing layer is 21.7 % more efficient than the installation of a curtain-type ventilated facade system according to the local estimate.

CONCLUSION AND DISCUSSION

In the course of research work it was revealed that the best variant of construction for design from the point of view of thermal protection of the building in the conditions of severe climate is the construction from foam concrete blocks D600 with thickness of 300 mm with heat-insulating layer from mineral wool insulation HR120 with thickness of 200 mm with application of hinged facade system with finishing with composite panels and system of fastening to the inter-floor ceiling.

The construction with a facing layer of facing bricks has a higher weight and thickness. The construction from foam concrete blocks D600 with thickness of 300 mm with a thermal insulation layer of mineral wool insulation HR120 with thickness of 180 mm and a facing layer of ceramic bricks with a ventilated gap is 22 % more efficient than the construction 3.2 in terms of economic indicators, on this basis it is recommended to continue studying the possibility of using this type of construction for low-rise residential buildings in harsh climates.

Structures with foam concrete blocks and ceramic products can be used for construction of efficient building envelopes, thus it is recommended to continue studying the use of local resources for the production of these materials in order to increase the economic efficiency of structures. The limiting factor is the low culture of production of foam concrete blocks and, as a consequence, unstable thermal and strength characteristics of blocks even within one batch.

REFERENCES

1. Glikin S.M. *Modern enclosing structures and energy efficiency of buildings*. Moscow, 2003; 157. (rus.).
2. Adilhodzhayev A., Shaumarov S., Shipacheva E., Shermuhamedov U. New method for diagnostic of heat engineering and mechanical properties of cellular concrete. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2019; 9(1):6885-6887. DOI: 10.35940/ijeat.a2993.109119
3. Aleksandrovsky S.V. *Durability of external enclosing structures : monograph*. Moscow, NIISF RAASN, 2004; 322. EDN QNKKYB. (rus.).
4. Yasin Yu.D., Yasin V.Yu., Li A.V. Expanded polystyrene. Resource and aging of the material. Durability of structures. *Construction Materials*. 2002; 5:33-35. EDN IBEST. (rus.).
5. Khait V.L. Fundamental Science and Housing of the Future. *Housing Construction*. 2004; 10:4-5. EDN IXUGJH. (rus.).
6. Fokin V.M. *Fundamentals of energy saving and energy audit*. Moscow, Mashinostroenie-1, 2006. EDN QMJGGF. (rus.).
7. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M., Shilkin N.V. *Energy efficient buildings*. Moscow, AVOK-press, 2003. 192. (rus.).
8. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. *Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings (2nd edition, corrected and supplemented)*. Moscow, AVOK, 2012; 204. EDN SXQNSV. (rus.).
9. Savin V.K. Construction physics. *Energy economics*. Moscow, Lazur, 2011; 415. EDN QNPJFL. (rus.).
10. Oparina L.A. Results of calculating the energy intensity of the life cycle of buildings. *Housing Construction*. 2013; 11:50. EDN RKVZMJ. (rus.).
11. Matrosov Yu.A. Energy saving in buildings. *The problem and its solutions : monograph*. Moscow, NIISF, 2008; 495. (rus.).
12. Fedosov S.V., Ibragimov A.M., Gnedina L.Yu., Gushchin A.V. Air gap in multilayer enclosing structures with non-stationary heat and mass transfer. *Information environment of the University : Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference*. 2004; 676. (rus.).
13. Yun A.Ya. Analysis of efficiency of two-layer and one-layer heat insulation of ventilated facades. *Construction Materials*. 2017; 7:77. EDN ZCSLAD. (rus.).
14. Kosarev L.V., Boldyrev N.Yu., Kostyukova Yu.S., Dobrynina O.V., Bolshanov S.A. Selection of modern modifiers for construction of plaster facades of buildings in extreme north conditions. *Innovation & Investment*. 2021; 11:168-171. EDN COEXLW. (rus.).
15. Mestnikov A.E. Clay raw materials of Yakutia for the production of leaved leaf. *Modern High Technologies*. 2022; 3:30-34. DOI: 10.17513/snt.39069. EDN YSCCMS. (rus.).
16. Trepalina Yu., Kirillova N. Ceramic brick from Yakutia raw materials with the addition of ground cullet. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2019; 4:138-143. DOI: 10.34031/article_5cb1e65d798f87.83499465. EDN ZDDGHR. (rus.).
17. Osorova R.S., Kolesov M.V., Mikhailov D.A. Construction ceramics from raw materials of Yakutia with modifying additives. *Energy of the young — to the construction complex : collection of materials of the XI All-Russian scientific and technical conference*. 2017; 81-84 (rus.).
18. Egorova A.D., Osorova R.S., Sleptsova L.V., Dyachkovskaya E.S., Yadreeva Z.I. Relevance of organizing the production of ceramic bricks in Yakutia. *Modern problems of construction and life support: safety, quality, energy and resource conservation : collection of materials of the III All-Russian scientific and practical conference*. 2014; 247-250. EDN SSFJSL. (rus.).
19. Mestnikov A.E., Semenov S.S., Fedorov V.I. Production and use of foam concrete of autoclave curing in conditions of Yakutia. *Fundamental Research*. 2015; 12-3:490-494. EDN VDFWPX. (rus.).
20. Rozhin V.N. *Foam concrete on a composite binder from raw materials of Yakutia : dis. ... cand. of technical sciences*. Belgorod, 2022; 165. EDN LULGGQ. (rus.).
21. Burenina O., Andreeva A., Savvinova M. Resources production of building materials in the republic of Sakha (Yakutia). *Innovations in Science*. 2017; 5(66):69-73. EDN YHQZQL. (rus.).
22. Mestnikov A.E., Semenov S.S., Vasileva D.V. Rational use of Yakutia's mineral resources in construction materials technology. *Fundamental Research*. 2017; 12-1:80-84. EDN ZXPVTB. (rus.).
23. Tushina V., Tushin A., Alekperov R. Experimental and theoretical studies of the thermal efficiency of multilayer non-uniform building enclosures. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45:103439. DOI: 10.1016/j.job.2021.103439

Received November 20, 2024.

Adopted in revised form on December 18, 2024.

Approved for publication on January 20, 2025.

B I O N O T E S: **Lyubov' Yu. Gnedina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 298544, Scopus: 57200283960, ResearcherID: AFN-6870-2022, ORCID: 0000-0002-3402-644X; GnedinaLYu@mgsu.ru.