



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 12, № 2, 2021

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2021.2.06

УДК 699.86

СОКРАЩЕНИЕ ЗАТРАТ НА СТРОИТЕЛЬСТВО ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ НА ПРИМЕРЕ БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

М.Н. Чекардовский, Т.С. Жилина, К.В. Афонин, К.П. Гусева

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 10 апреля 2021
Принята: 31 мая 2021
Опубликована: 13 июля 2021

Ключевые слова:

ограждающие конструкции, термическое сопротивление, утеплитель, сокращение затрат, сэндвич-панели, блочно-модульные здания, теплопотери, энергосбережение, минеральная вата, пенополиизоцианурат.

АННОТАЦИЯ

Внедрение модернизированных (совершенствованных) и новых технологий строительства необходимо для повышения качества строительства при обоснованном сокращении затрат на капитальное строительство и сроков возведения зданий методом блочно-комплектного строительства (БКС). На данный момент существуют различные технологии блочно-комплектного строительства, которые объединяют известные и разрабатываемые методы и способы возведения зданий и сооружений. Поэтому для повышения эффективности строительства необходимо решить ряд задач, основными из которых являются: расчет ограждающих конструкций при блочно-комплектном строительстве на соответствие требованиям по тепловой защите в конкретной климатической зоне, требованиям пожарной безопасности (объект исследования должен иметь пожаробезопасные ограждающие конструкции, поскольку располагается на месторождении), а также определение экономической целесообразности рассматриваемых мероприятий. На примере объекта исследования представлен выбор ограждающих конструкций с целью уменьшения капитальных затрат на возведение здания. При успешном решении поставленных задач будет возможность предложить восстановление объектов, разрушенных при стихийных бедствиях, блочно-комплектное строительство новых зданий, а также реконструкцию объектов. В статье представлен объект исследования «Компрессорная станция в районе ДНС-2 X месторождения»; рассмотрены блочные здания, расположенные на площадке ДНС; приведены характеристики ограждающих конструкций типа «сэндвич» с различными видами теплоизоляционных материалов, представлено полное описание всех видов используемых теплоизоляционных материалов с указанием достоинств и недостатков; выполнен их теплотехнический расчет и сравнительный анализ эффективности теплоизоляционного материала, используемого в сэндвич-панелях. Представлены выводы, методы и способы решения задач блочно-комплектного строительства, модернизация технологий строительства.

© ПНИПУ

© Чекардовский Михаил Николаевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: chekardovskijmn@tyuiu.ru, ORCID 0000-0002-7166-1936.

Жилина Татьяна Семеновна – кандидат технических наук, профессор, e-mail: zhilinat@tyuiu.ru, ORCID 0000-0001-7832-2331.

Афонин Константин Викторович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: afoninkv@tyuiu.ru, ORCID 0000-0001-7239-5484.

Гусева Ксения Петровна – ассистент, e-mail: gusevakp@tyuiu.ru, ORCID 0000-0002-3995-9759.

Mikhail N. Chekardovskij – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: chekardovskijmn@tyuiu.ru, ORCID 0000-0002-7166-1936.

Tatyana S. Zhilina – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, e-mail: zhilinat@tyuiu.ru, ORCID 0000-0001-7832-2331.

Konstantin V. Afonin – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: afoninkv@tyuiu.ru, ORCID 0000-0001-7239-5484.

Ksenia P. Guseva – Assistant, e-mail: gusevakp@tyuiu.ru, ORCID 0000-0002-3995-9759.

REDUCING CONSTRUCTION COSTS BY OPTIMIZING FENCING STRUCTURES ON THE EXAMPLE OF BLOCK-MODULAR BUILDINGS

M.N. Chekardovskij, T.S. Zhilina, K.V. Afonin, K.P. Guseva

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 10 April 2021
Accepted: 31 May 2021
Published: 13 July 2021

Keywords:

enclosing structures, thermal resistance, insulation, cost reduction, sandwich panels, modular buildings, heat loss, energy saving, mineral wool, polyisocyanurate foam.

ABSTRACT

The introduction of modernized (improved) and new technologies is necessary to improve the quality of construction with a reasonable reduction in costs and terms of block-complete construction (BCS). There are various BCS technologies that combine known and developed methods and methods. Therefore, in order to increase the efficiency of construction, it is necessary to solve a number of tasks: to calculate the enclosing structures at BCS in accordance with their requirements for thermal protection, to determine the economic feasibility of the measures under consideration. On the example of a research object, the choice of enclosing structures is presented in order to reduce capital costs. If the tasks are successfully solved, it will be possible to offer the restoration of objects destroyed by natural disasters, BCS of new buildings, as well as during the reconstruction of objects. The article presents: the object of research "Compressor station in the area of BPS-2 X field"; block buildings located on the site of the booster pump station are considered; the characteristics of the enclosing structures of the "sandwich" type with various heaters are given; their thermal engineering calculation and comparative analysis of the efficiency of the heat-insulating material were carried out. Conclusions, methods and ways of solving BCS problems are presented; modernization of construction technologies.

© PNRPU

Введение

Индустриальное направление строительства и проектирования зданий и сооружений добывающего и перерабатывающего назначения является основным. Это достигается путем применения блочно-комплектного метода строительства. Производственные цеха с находящимся в них технологическим оборудованием, а также здания гаражей, пожарных депо, складов и иных помещений предусмотрены каркасного типа. Наиболее популярными сегодня являются конструкции из металлокаркаса и сэндвич-панелей. Важнейшим преимуществом данных зданий являются короткие сроки возведения и ввода в эксплуатацию зданий, что позволяет снизить капитальные затраты [1–4].

Теплоизоляционные свойства панелей определяются такими критериями, как вид и качество теплоизоляционного материала, входящего в состав панелей утеплителя [2]. В силу необходимости сжатых сроков проектирования современный рынок теплоизоляционных материалов остается малоизученным, и, как следствие, повсеместно применяют минераловатный утеплитель. В настоящее время существуют сэндвич-панели с утеплителями из пенополиуретана и пенополиизоцианурата с улучшенными теплотехническими характеристиками [3].

Актуальность данного исследования базируется на Федеральном законе РФ от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» и на изучении современных разработок в области проектирования ограждающих конструкций [4].

Целью исследования является определение экономической целесообразности рассматриваемых мероприятий (проведение мероприятий, позволяющих снизить капитальные затраты на строительство).

Объектом данного исследования является выбор ограждающих конструкций для компрессорной станции в районе ДНС-2 X месторождения с целью уменьшения капитальных затрат.

Рассчитаны конструкции на соответствие их требованиям по тепловой защите, с дальнейшими расчетами укрупненного показателя капитальных затрат на строительство, которые показывают, какие именно конструкции могут сократить затраты на строительство и соответствуют всем нормативным требованиям [5].

Поскольку такие здания расположены на месторождениях, а вблизи них возможно использование нефтепродуктов, горючих материалов, их переработка и транспортировка, они должны быть пожаробезопасны, особенно это касается зданий, в которых находятся люди [6, 7].

Здания на месторождениях проектируют и возводят каркасного и блочно-модульного типа. Наружные ограждения предусмотрены в виде трехслойных металлических панелей типа «сэндвич» [7].

Оконные блоки предусмотрены в виде ПВХ-профилей, морозостойкие, с нормируемым значением приведенного сопротивления теплопередаче наружного ограждения не менее $R_{req} = 0,65 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ [8].

Рассматриваемый объект расположен на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) Тюменской области. Климатический район 1Г согласно СП 131.13330.2012 «Строительная климатология». Климат района проектирования резко континентальный. Климатические параметры данного района указаны в табл. 1.

Таблица 1

Климатические параметры района застройки

Table 1

Climatic parameters of the building area

Параметр	Значение параметра
Параметры наружного воздуха	– параметры А – для систем вентиляции для теплого периода года; – параметры Б – для систем отопления и вентиляции для холодного периода года, а также для систем кондиционирования для теплого и холодного периода
Расчетная температура наружного воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92	–42,9 °С
Средняя температура за отопительный период (период со средней суточной $t \leq 8 \text{ °C}$)	–12,3 °С
Продолжительность отопительного периода при средней суточной $t \leq 8 \text{ °C}$	301 сут

Основная часть

Ограждающие конструкции типа «сэндвич»

В качестве наружных ограждений приняты сэндвич-панели, состоящие из нескольких слоев, в том числе утеплителей различных видов. Панели легкоборные, заводского изготовления, уже готовые завозятся на строительную площадку и подлежат только соединению между собой по особой технологии при помощи замков для соединения сэндвич-

панелей [9]. Все это обеспечивает минимизацию сроков строительства и уменьшает трудоемкость и трудозатраты на монтаж таких ограждений. Как следствие, уменьшаются не только сроки строительства, но и материальные затраты на строительство, поскольку трудозатраты в таком случае минимальны [10].

В данном случае сэндвич-панели имеют трехслойную структуру, состоящую из двух листов профильной оцинкованной стали и слоя теплоизоляционного материала (на выбор) между ними [11]. Конструкции выполнены из морозостойких, влагостойких, термостойких материалов, не подверженных коррозии, что обеспечивает конструкциям отличные показатели долговечности [12].

В качестве теплоизоляционного материала приняты: базальтовая минеральная вата; пенополиуретан (PUR); полиизоцианурат (PIR); пенополистирол [13].

Толщину утеплителя определяем исходя из удовлетворения ограждающей конструкции требованиям СП 50.13330.2012³. Чем ниже коэффициент теплопроводности, тем меньшее количество тепла пройдет через стенку, следовательно, меньшее количество тепловой энергии потребуется на поддержание нормативной температуры внутреннего воздуха в помещениях в зимний период [5, 14].

Минераловатный утеплитель

Минераловатный утеплитель представлен в виде базальтовой минераловатной плиты. Минеральная базальтовая вата (рис. 1) имеет достаточно низкий коэффициент теплопроводности [15].

Поскольку такие плиты не горючи, их можно использовать в качестве наружных ограждений огнестойких зданий [15].

Помимо этого, базальтовая минеральная вата является достаточно гибким материалом, что позволяет использовать его на ограждениях с измененной геометрией стен. Благодаря натуральному составу, он экологичен и безопасен, во время эксплуатации не выделяется токсичных веществ [16]. Нормальный уровень паропроницаемости базальтовой ваты исключает конденсат на поверхности соприкосновения с другими слоями конструкции при резком перепаде температур [17]. Материал не подвержен образованию грибка и плесени на его поверхности, обладает хорошими звукоизоляционными свойствами. Но имеет один недостаток – обладает хорошей гигроскопичностью, и в результате попадания влаги материал теряет изоляционные свойства [18].



Рис. 1. Сэндвич-панель с утеплителем из минеральной ваты

Fig. 1. Sandwich panel with mineral wool insulation

³ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий: утв. Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 30 июня 2012 г. № 265: введ. в действие 01.07.2013. М.: МинСтрой России, 2013. 137 с.

Таблица 2

Технические характеристики минераловатного утеплителя

Table 2

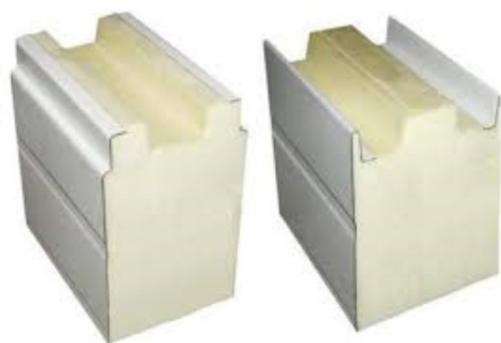
Technical characteristics of mineral wool insulation

Наименование показателя	Значение показателя
Коэффициент теплопроводности	0,047 Вт/м·°С
Максимальная предельная температура эксплуатации	1000 °С
Плотность	200 кг/м ³
Температура спекания волокон	1000 °С
Огнестойкость	НГ (не горючие)
Водопоглощение	3,0 %

Пенополиуретан (PUR)

Пенополиуретан – это синтетическое вещество ячеистой структуры из группы газонаполненных пластмасс. Широко используется для производства сэндвич-панелей (рис. 2). Материал имеет хорошие теплоизоляционные свойства, поскольку имеет довольно низкий коэффициент теплопроводности [19, 20]. Обладает хорошей адгезивной

способностью, что улучшает его сцепление с другими слоями конструкции, стойкостью к химическим и агрессивным средам, имеет небольшую массу [2].



Кроме того, он обладает высокой водопаронепроницаемостью, что дает возможность использовать его при строительстве различных помещений, в которых проводятся технологические процессы, протекающие при высокой влажности и больших температурных перепадах [18].

Рис. 2. Сэндвич-панель с утеплителем из пенополиуретана

Пенополиуретановые сэндвич-панели исключают возможность появления грибка, плесени и развития различных болезнетворных микроорганизмов в конструкции панелей [3]. Технические характеристики пенополиуретана сведены в табл. 3.

Fig. 2. Sandwich panel with polyurethane foam insulation

Таблица 3

Технические характеристики пенополиуретана

Table 3

Technical characteristics of polyurethane foam

Наименование показателя	Значение показателя
Плотность	80 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности	0,025 Вт/м·°С
Водопоглощение	1,2 %
Максимальная предельная температура эксплуатации	От 100 до 250 °С
Огнестойкость	Г1 (слабогорючие)

Пенополиизоцианурат (PIR)

Пенополиизоцианурат (PIR) – современный гидро- и теплоизоляционный материал, модифицированный пенополиуретан, полученный в результате реакции полиола и изоцианурата (рис. 3) [13].

Сэндвич-панели с наполнителем из полиизоцианурата имеют самую низкую теплопроводность среди всех известных теплоизоляционных материалов [13]. Панели относятся к классу Г1, слабогорючие, не горят при отсутствии источника огня, а поскольку они защищены с обеих сторон листами профилированной стали и изолированы от источника огня, то практически не горючи, устойчивы к тлению и гниению, биологически нейтральны [15]. Технические характеристики пенополиизоцианурата представлены в табл. 4.

Строительные конструкции из сэндвич-панелей с пенополиизоциануратом не способствуют распространению горения.



Рис. 3. Сэндвич-панель с утеплителем из пенополиизоцианурата
Fig. 3. Sandwich panel with polyisocyanurate foam insulation

Таблица 4

Технические характеристики пенополиизоцианурата

Table 4

Technical characteristics of polyisocyanurate foam

Наименование показателя	Значение показателя
Плотность	42 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности	0,02 Вт/м·°С
Водопоглощение	0,01 %
Максимальная предельная температура эксплуатации	от 120 до 150 °С
Группа горючести	Г1 (слабогорючие)

К достоинствам данного утеплителя можно отнести влагостойкость, высокую прочность на сжатие (до 120 кПа), увеличенный срок службы (до 50 лет эксплуатации), также он не меняет своих размеров во время эксплуатации [3].

Пенополистирол

Сэндвич-панели с утеплением из пенополистирола по теплотехническим характеристикам превосходят традиционные материалы (рис. 4, табл. 5).

Пенополистирольные утеплители отличаются легкостью и незначительной плотностью, которая, в свою очередь, дает им отличные теплоизоляционные свойства, поскольку при низкой плотности они имеют низкий коэффициент теплопроводности, от которого зависит главный показатель энергоэффективности – теплопотери [5].

Полимерное покрытие, наносимое на поверхность пенополистирольных плит, придает им высокую стойкость к истиранию и коррозии. Добавленные в состав таких плит антипирены делают их не горючими (они относятся к классу горючести Г1) [6].



Рис. 4. Сэндвич-панель с утеплителем из пенополистирола

Fig. 4. Sandwich panel with expanded polystyrene insulation

Таблица 5

Технические характеристики пенополистирола

Table 5

Technical characteristics of expanded polystyrene

Наименование показателя	Значение показателя
Плотность	25 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности	0,038 Вт/м·°С
Водопоглощение	2 %
Максимальная предельная температура эксплуатации	от -80 до +80 °С
Группа горючести	Г1 (слабогорючие)

Нельзя не отметить влагостойкость сэндвич-панелей с пенополистиролом. Структура пенополистирола представляет собой герметичные гранулы, в которые почти не проникает влага. Вода, попадающая на поверхность пенополистирола, не способна разрушить его структуру.

Теплотехнический расчет

Теплотехнический расчет выполнен для четырех вариантов сэндвич-панелей с различными видами утеплителей, все расчеты производятся для холодного периода года, поскольку определить количество потерь тепла через ограждение можно только при значительной разнице температур наружного и внутреннего воздуха, а это возможно только в холодный период года. Определение количества потерь тепла через каждый вид ограждения необходимо для того, чтобы сделать вывод об энергоэффективности наружного ограждения: чем меньше потерь тепла через стену, тем энергоэффективнее ограждающая конструкция. Наименьшее количество тепла, пройденное через стену, позволяет снизить расходы на отопление, а также нагрузку на саму систему отопления [4].

Помимо теплотерь необходимо соответствие ряда других показателей, таких как влагозащита. Ограждающие конструкции, не удовлетворяющие требованиям по тепловой защите зданий, не допускаются к возведению и дальнейшему проектированию [14].

Согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» установлены три показателя тепловой защиты здания:

1) приведенное сопротивление теплопередаче отдельных элементов ограждающих конструкций здания;

2) санитарно-гигиенические требования, включающие температурный перепад между температурами внутреннего воздуха и на поверхности ограждающих конструкций и температуру на внутренней поверхности выше температуры точки росы;

3) удельный расход тепловой энергии на отопление здания, позволяющий варьировать величины теплозащитных свойств различных видов ограждающих конструкций зданий с учетом объемно-планировочных решений здания и выбора систем поддержания микроклимата для достижения нормируемого значения этого показателя.

Состав и характеристики вариантов сэндвич-панелей приведены в табл. 6.

Таблица 6

Послойный состав и теплотехнические характеристики всех вариантов сэндвич-панелей

Table 6

Constant composition and heat engineering characteristics of all variants of sandwich panels

Разрез сэндвич-панели	Послойные состав	Коэффициент теплопроводности материала, λ , Вт/м °С	Толщина слоя δ , м
Вариант 1. Ограждающая конструкция стены с минераловатным утеплителем			
	1-й слой – облицовка оцинкованная профилированная сталь	0,58	0,007
	2-й слой – утеплитель из минеральной ваты	0,047	0,150
	3-й слой – облицовка оцинкованная профилированная сталь	0,58	0,007
Вариант 2. Ограждающая конструкция стены с утеплителем пенополиизоцианурат			
	1-й слой – облицовка оцинкованная профилированная сталь	0,58	0,007
	2-й слой – утеплитель из пенополиизоцианурата	0,02	0,060
	3-й слой – облицовка оцинкованная профилированная сталь	0,58	0,007
Вариант 3. Ограждающая конструкция стены с утеплителем пенополиуретан			
	1-й слой – облицовка оцинкованная профилированная сталь	0,58	0,007
	2-й слой – утеплитель из пенополиуретана	0,025	0,060
	3-й слой – облицовка оцинкованная профилированная сталь	0,58	0,007
Вариант 4. Ограждающая конструкция стены с утеплителем пенополистирол			
	1-й слой – облицовка оцинкованная профилированная сталь	0,58	0,007
	2-й слой – утеплитель из пенополистирола	0,038	0,150
	3-й слой – облицовка оцинкованная профилированная сталь	0,58	0,007

Определение приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций

Определение градусо-суток отопительного периода (ГСОП):

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{в}} - t_{\text{от.пер}}) \cdot z_{\text{от.пер}},$$

где $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха, °С; $t_{\text{от.пер}}$, $z_{\text{от.пер}}$ – средняя температура (°С) и продолжительность (сут) периода со среднесуточной температурой ниже или равной 8 °С согласно [3].

$$\text{ГСОП} = [10 - (-12,3)] \cdot 301 = 6712,3 \text{ °С} \cdot \text{сут};$$

Определение приведенного сопротивления теплопередаче по ГСОП.

Согласно СП 50.13330.2012:

а) стена: $R_{\text{пр}} = 3,21 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$;

б) окна: $R_{\text{пр}} = 0,65 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$;

в) наружные двери: $R_{\text{пр}} = 2,3 \text{ м}^2 \text{ °С/Вт}$.

Определение сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Исходя из санитарно-гигиенических, комфортных условий и условий энергосбережения, приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций R_0 должно быть не менее требуемых значений $R_0^{\text{тп}}$, рассчитывается по формуле

$$R_0^{\text{тп}} = a \cdot \text{ГСОП} + b,$$

где a , b – коэффициенты, значения которых следует принимать по данным табл. 3 СП 50.13330.2012;

Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции ($\text{м}^2 \cdot \text{°С/Вт}$) определили по формуле

$$R_{\text{факт}} = \sum \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + R_{\text{к}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}},$$

где $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи для зимних условий внутренней и наружной поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$;

$R_{\text{к}}$ – термическое сопротивление ограждающей конструкции, определяется по формуле

$$R_{\text{к}} = R_1 + R_2 + \dots R_n,$$

где R_1 , R_2 , R_n – термическое сопротивление отдельных слоев ограждающей конструкции, определяемое по формуле

$$R = \frac{\delta}{\lambda},$$

где δ – толщина слоя, м; λ – расчетный коэффициент теплопроводности материала слоя, $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°С}$.

Результаты сведены в табл. 7.

Сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции

Resistance to heat transfer of the building envelope

Вариант компоновки сэндвич-панели	Сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ (в зависимости от толщины утеплителя, м)									
	0,05	0,06	0,075	0,08	0,1	0,12	0,145	0,15	0,2	0,25
1	1,22	1,44	–	1,86	2,29	2,71	–	3,35	4,41	5,48
2	2,94	3,49	4,33	–	5,71	6,83	8,21	–	–	–
3	1,38	1,62	–	2,11	2,60	3,09	–	3,82	5,04	6,26
4	2,33	2,77	3,42	–	4,51	5,38	6,46	–	–	–

Для дальнейших расчетов по условиям энергосбережения из двух полученных значений коэффициента сопротивления теплопередачи полной конструкции, требуемого значения и фактического принято наибольшее значение коэффициента термического сопротивления, которое уже будет использоваться в последующих расчетах:

- минеральная базальтовая вата – $R_{\text{факт}} = 3,35 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$,
- пенополиизоцианурат – $R_{\text{факт}} = 3,49 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$,
- пенополистирол – $R_{\text{факт}} = 3,82 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$,
- пенополиуретан – $R_{\text{факт}} = 3,42 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$.

Исходя из коэффициента термического сопротивления получены следующие толщины утеплителей для каждого варианта конструкции, которые необходимы для удовлетворения требованиям тепловой защиты зданий. Анализируя полученные значения требуемого сопротивления, получаем следующие толщины:

- минеральная вата на базальтовой основе – 150 мм;
- пенополиизоцианурат – 60 мм;
- пенополиуретан – 60 мм;
- пенополистирол – 150 мм.

Данный расчет показывает, что пенополиизоцианурат – утеплитель с лучшими тепло-техническими характеристиками, при $R_{\text{факт}} = 3,49 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ имеет толщину 50 мм.

Сравнительный анализ теплоизоляционного материала

В подавляющем большинстве в качестве утеплителя, в том числе и для сэндвич-панелей, используется всем известная минеральная вата, получившая свою популярность благодаря низкому коэффициенту теплопроводности, который учитывается при расчете теплотерь, малой массе, удобству монтажа, что тоже немаловажно, и негорючести [7, 15]. Этот материал имеет один недостаток, который в значительной степени сказывается на уровне энергоэффективности материала, – гигроскопичность. Минераловатные плиты хорошо впитывают влагу, поэтому при малейшем увлажнении, в том числе осадками, они теряют свои тепло-технические свойства. Увлажнение может даже отрицательно сказаться на защитных свойствах ограждения [18].

Поэтому все чаще этот вид утеплителя заменяют на пенополиуретановые утеплители, которые по своим физико-техническим характеристикам превосходят минеральную вату,

пенополистирол и многие другие материалы. В отличие от пенополистирола, пенополиуретан – это дышащий материал, а по сравнению с минеральной ватой он влагоустойчив. Однако стоимость панелей с утеплителем из пенополиуретана гораздо выше остальных вариантов. Кроме того, монтаж таких панелей является трудоемким процессом, требующим специальной подготовки людей [11, 12].

Хорошие теплотехнические показатели имеет также пенополистирол, он не горючий, легок в монтаже, сам монтаж не требует больших затрат. Однако материал имеет один значительный недостаток, который зачастую обесценивает его теплотехнические качества, – неэкологичность. При незначительном нагреве он выделяет стиролы – опасные токсичные вещества, которые не только ухудшают состояние здоровья человека, но и приводят к изменению состава крови, поэтому использовать его в качестве ограждений в зданиях на месторождениях с непосредственным пребыванием людей в них не представляется возможным, даже несмотря на отличные показатели энергоэффективности.

Последний вид рассмотренных утеплителей – пенополиизоцианурат – отличается рядом преимуществ: низким коэффициентом теплопроводности, хорошей гидрофобностью, так как практически не впитывает влагу. Это легкий, стойкий к микробиологическим процессам, негорючий материал, имеющий долгий срок эксплуатации. Он экологичен, не выделяет вредных веществ. Недостатков у этого материала не выявлено. При этом по техническим показателям он не уступает другим материалам, а зачастую даже превосходит их.

Сравним все вышеуказанные показатели материалов, сведя все данные в табл. 8.

Таблица 8

Основные характеристики материалов, применяемых в качестве утеплителя для сэндвич-панелей

Table 8

The main characteristics of materials used as insulation for sandwich panels

Материал	Характеристики				
	коэффициент теплопроводности материала, λ , Вт/м °С	водопоглощение, %	паропроницаемость, мг/(м ² ·ч·Па)	прочность на сжатие, МПа	огнестойкость
Минеральная базальтовая вата	0,047	3	0,35	0,06	НГ – не горючий
Пенополиизоцианурат	0,020	0,01	0,002	0,15	Г1 – слабогорючий
Пенополиуретан	0,041	1,2	0,05	0,37	Г1 – слабогорючий
Пенополистирол	0,023	2	0,018	0,35	Г1 – слабогорючий

По данным табл. 8 можно сделать вывод, что пенополиизоцианурат превосходит остальные материалы по показателям теплопроводности, водопоглощения, паропроницаемости, но уступает им по прочности на сжатие, что, однако, не влияет на его энергоэффективность. Этой прочности хватит для его нормальной эксплуатации. Что касается горючести, это слабогорючий материал, поскольку гореть он может только при наличии источника огня, а так как от источника огня он защищен профилированными стальными листами, можно сделать вывод, что он изолирован от источника воспламенения и является негорючим. Исходя из этого он является наилучшим материалом для сэндвич-панелей [16].

Капитальные затраты

Укрупненный показатель капитальных затрат рассчитывается по формуле

$$K_3 = C \cdot S_{\text{ст}},$$

где C – себестоимость стеновой панели руб./м²; $S_{\text{ст}}$ – площадь ограждения, м².

В расчете принимается суммарная площадь стеновых панелей 2617,5 м².



Рис. 5. Укрупненная оценка капитальных затрат
Fig. 5. Rough capital cost estimate

Поскольку при проектировании и строительстве многие заказчики отдают предпочтение такому методу строительства, который обеспечит необходимый микроклимат в помещении, сэкономит расходы на отопление, обеспечит необходимый температурный режим в помещениях с непосредственным нахождением в них людей, сократит сроки строительства и капитальные затраты на строительство, выбор будет сделан в пользу тех ограждающих конструкций, которые значительно сократят сроки и стоимость строительства, а также полностью обеспечат необходимый микроклимат в помещениях в климатической зоне, где будет находиться данное задание и учитываться его назначение [12]. И такой ограждающей конструкцией является сэндвич-панель с утеплителем из пенополиизоцианурата, поскольку она отвечает всем требованиям по тепловой защите, сроки монтажа будут минимальны из-за минимальной трудоемкости процесса возведения таких стен, как следствие, значительно будут снижены и затраты на капитальное строительство здания, которые в данном случае составят 4 161 846,0 руб. Самым затратным способом будет монтаж из повсеместно используемых сэндвич-панелей с минераловатными базальтовыми плитами, который составит 5 050 800, 49 руб.

Заключение

Были изучены все положительные и отрицательные стороны теплоизоляционных материалов, используемых в сэндвич-панелях для блочно-модульного строительства, рассчитаны все технические и стоимостные показатели, определенные необходимостью сжатых

сроков строительства, минимизацией капитальных затрат на строительство и обеспечением необходимого уровня тепловой защиты и безопасности зданий и сооружений, расположенных на месторождениях [3–21].

В результате проведенного анализа всех вариантов ограждающих конструкций в виде сэндвич-панелей с различными типами теплоизоляционных материалов подобран оптимальный теплоизоляционный материал по энергоэффективности, экономическим показателям и безопасности использования [22]. Экономический эффект от выбора утеплителя для сэндвич-панелей из пенополиизоцианурата составил 20 %, что значительно снижает капитальные затраты на строительство.

Библиографический список

1. Беляев В.С., Хохлова Л.П. Проектирование энергоэкономичных и энергоактивных гражданских зданий: учеб. пособие для вузов по специальности «Пром. и гражд. стр-во». – М.: Высш. шк., 1991. – 255 с.
2. Теплоизоляционные материалы и конструкции: учебник / Ю.Л. Бобров, Е.Г. Овчаренко, Б.М. Шойхет, Е.Ю. Петухова. – М.: Инфра-М, 2003. – 265 с.
3. Теплоизоляционные материалы сэндвич-панелей и пожарно-технические характеристики быстровозводимых зданий [Электронный ресурс] / В.С. Мельников, С.В. Кириллов, С.А. Потемкин [и др.] // Профмодуль. – 2015. – URL: <https://profmodul.ru/stati/teploizolyacionnye-materialy-sendvich-paneley-i-pozharno-tehnicheskie-harakteristiki/> (дата обращения: 10.04.2021).
4. Schломанн В., Шлейх J. Adoption of low-cost energy efficiency measures in the tertiary sector – An empirical analysis based on energy survey data // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – No. 43. – P. 1127–1133.
5. Characterization of building thermal energy consumption at the urban scale / G. Mutani, C. Delmastro, M. Gargiulo, S.P. Corgnati // *Energy Procedia*. – 2016. – No. 101. – P. 384–391.
6. Penetration of particles into buildings and associated physical factors. Part I: Model development and comp./ J. Thornburg, D.S. Ensor, C.E. Rodes, P.A. Lawless, L.E. Sparks, R.B. Mosley.
7. Chow Wan-Ki. A discussion on tall building fire safety in the Asia-Oceania Regions. *Fire Science and Technology 2015* // *Proc. of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. – Singapore: Springer Singapore, 2017. – P. 61–72.
8. Gertis K. [et al.] Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 1: Transparente Warmedämmung. *Bauphysik*. – 1999. – No. 21, H. 1. – P. 1–9.
9. Корнилов Т.А., Посельский Ф.Ф., Кардашевский А.Г. Конструктивно-технологические решения в малоэтажном домостроении // *Экономика Востока России*. – 2014. – № 1 (1). – С. 42–57.
10. Al-Homoud M.S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials // *Building and Environment*. – 2005. – Vol. 40, № 3. – P. 353–366.
11. Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review / Nur Najihah Abu Bakar, Hayati Abdullah, Hasimah Abdul Rahman, Md Pauzi Abdullah, Faridah Hussin, Masilah Bandi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – No. 44. – P. 1–11.
12. Dongmei S. Research and application of energy consumption benchmarking method for public buildings based on actual energy consumption // *Energy Procedia*. – 2018. – No. 152. – P. 475–83.

13. Юмалин И. PIR-плита: инновационный утеплитель // Mastergrad. Город мастеров: Ассоциация «НАППАН». – 2016. – URL: <http://www.mastergrad.com/blogs/post/10914/> (дата обращения: 10.04.2021).
14. Богословский В.Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
15. Пожарно-структурная экспертиза повреждений теплоизоляционных материалов из минеральной ваты и пенополиизоцианурату / В.С. Мельников, С.В. Кириллов, М.В. Мельников [и др.]. // Интернет-журнал «Науковедение». – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 129.
16. Study on energy consumption ration for office buildings / Z. Zheng, Z. Zhuang, Z. Lian, Y. Li // *Energy Procedia*. – 2017. – No. 142. – P. 2317–2322.
17. Jelle B. Traditional, state-of- the-art and future thermal building insulation materials and solutions – properties, requirements and possibilities // *Energy and Buildings*. – 2011. – Vol. 43, № 10. – P. 2549–2563.
18. Schoch T., Kreft O. the influence of moisture on the thermal conductivity of AAC // 5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete «Securing a Sustainable Future», September, 14–17. – Bydgoszcz, Poland, 2011. – P. 361–370.
19. Вытчиков Ю.С., Черенева А.В. Исследование воздухопроницаемости «теплой» штукатурки на цементно-перлитовой основе // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 69-й Всерос. науч.-техн. конф. по итогам НИР, СГАСУ, 9–13 апреля 2012 г. – Самара: СГАСУ, 2012. – С. 304–306.
20. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. – М.: Госстройиздат. 1955. – 160 с.
21. Donglan Zha, Ning Ding Threshold characteristic of energy efficiency on substitution between energy and nonenergy factors // *Economic Modelling*. – 2015. – No. 46. – P. 180–187.
22. Karmellos M., Kiprakis A., Mavrotas G. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies // *Applied Energy*. – 2015. – No 139. – P. 131–150.

References

1. Belyaev B.S., Khokhlova L.P. Design of energy-efficient and energy-active civil buildings. Moscow, Higher School., 1991, 255 p.
2. Bobrov Yu.L., Ovcharenko E.G., Shoikhet B.M., Petukhova E.Yu. Thermal insulation materials and structures. Moscow, Infra-M, 2003. – 265 p.
3. Melnikov V.S., Kirillov S.V., Potemkin S.A. [et al.] Thermal insulation materials of sandwich panels and fire-technical characteristics of prefabricated buildings. *Profmodul-2015*, available at: <https://profmodul.ru/stati/teploizolyacionnye-materialy-sendvich-paneley-i-pozharnotekhnicheskie-harakteristiki/> (accessed 10 April 2021).
4. Schломанн B., Schleich J. Adoption of low-cost energy efficiency measures in the tertiary sector – An empirical analysis based on energy survey data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, no. 43, pp. 1127–1133.
5. Mutani G., Delmastro C., Gargiulo M., Corgnati S.P. Characterization of building thermal energy consumption at the urban scale. *Energy Procedia*, 2016, no. 101, pp. 384–991.
6. Thornburg J., Ensor D.S., Rodes C.E., Lawless P.A., Sparks L.E., Mosley R.B. Penetration of particles into buildings and associated physical factors. Part I: Model development and comp.

7. Chow Wan-Ki. A discussion on tall building fire safety in the Asia-Oceania Regions. *Fire Science and Technology 2015. Proc. of 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology*. Singapore, Springer Singapore, 2017, pp. 61–72.
8. Gertis K. et al. Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 1: *Transparente Warmedämmung. Bauphysik*, 1999, no. 21, H. 1, pp. 1–9.
9. Kornilov T.A., Poselsky F.F., Kardashevsky A.G. Constructive and technological solutions in low-rise housing construction. *Economy of the East of Russia*, 2014, no. 1 (1), pp. 42–57.
10. Al-Homoud M.S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*, 2005, vol. 40, no. 3, pp. 353–366.
11. Nur Najihah Abu Bakar, Hayati Abdullah, Hasimah Abdul Rahman, Md Pauzi Abdullah, Faridah Hussin, Masilah Bandi. Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, no. 44, pp. 1–11.
12. Dongmei S. Research and application of energy consumption benchmarking method for public buildings based on actual energy consumption. *Energy Procedia*, 2018, no. 152, pp. 475–483.
13. Yumalin I. PIR-plate: innovative insulation. *Mastergrad. City of Masters: Association "NAPPAN"*, 2016, available at: <http://www.mastergrad.com/blogs/post/10914/> (accessed 10 April 2021).
14. Bogoslovsky V.N. *Stroitel'naya teplofizika (teplofizicheskie osnovy heating, ventilation and air conditioning)*. 2nd ed. Moscow, Higher School, 1982, 415 p.
15. Melnikov V.S., Kirillov S.V., Melnikov M.V. [et al.]. Fire structural examination of damage to mineral wool and polyisocyanurate foam insulation materials. *Naukovedenie*, 2016, vol. 8. no. 3, pp. 129.
16. Zheng Z, Zhuang Z, Lian Z, Li Y. Study on energy consumption ration for office buildings. *Energy Procedia*, 2017, no. 142, pp. 2317–2322.
17. Jelle B.P. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*. 2011, vol. 43, no. 10, pp. 2549–2563.
18. Schoch T., Kreft O. The influence of moisture on the thermal conductivity of AAC. *5th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete «Securing a Sustainable Future»*, 14–17 September. Bydgoszcz, Poland, 2011, pp. 361–370.
19. Bogoslovsky V.N. Fundamentals of the theory of the moisture potential of the material in relation to the external fences of the shell of buildings. Ed. V.G. Gagarin. Moscow, Moscow State University of Civil Engineering, EBS DIA, 2013, 112 p.
20. Vytchikov J.S., Chereneva A.V. Investigation of the air permeability warm plaster, cement-perlite-based. *Traditions and innovations in construction and architecture. Proceedings of the 69th all-Russian scientific-technical conference on the results of the research*, SGASU, 9–13 April 2012, Samara, SHASU, 2012, pp. 304–306.
21. Donglan Zha, Ning Ding Threshold characteristic of energy efficiency on substitution between energy and nonenergy factors. *Economic Modelling*, 2015, no. 46, pp. 180–187.
22. Karmellos M., Kiprakis A., Mavrotas G. A multi-objective approach for optimal prioritization of energy efficiency measures in buildings: Model, software and case studies. *Applied Energy*, 2015, no 139, pp. 131–150.