

Будаўнічыя канструкцыі, будынкi і збудаванні

УДК 624.012.2

doi.org/10.52275/2223-5396-2022-12-2-78-90

В. А. Ржевуцкая, Ю. Г. Москалькова**АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ КЕРАМЗИТОБЕТОНА**

Во введении представлены основные преимущества и недостатки применения конструкционно-теплоизоляционных легких бетонов при изготовлении несущих конструкций зданий на основании аналитического обзора работ различных исследователей. Продемонстрировано, что в Республике Беларусь имеется достаточная производственная база для массового изготовления керамзитобетонных и керамзитожелезобетонных изделий. Для рассмотренного в статье частного случая проектирования несущих стен из керамзитобетонных блоков приведены особенности их проектирования (например, устройство армирующих поясов, армирование кладки сетками). В основной части на примере проектирования несущих наружных стен здания склада расчетным методом на основе вариантного проектирования продемонстрирован достигаемый экономический эффект. Приведены результаты практического расчета, выполненного в рамках вариантного проектирования ограждающих несущих стен здания. Рассмотрены два варианта: традиционное решение – кладка из кирпича силикатного толщиной 380 мм, альтернативный вариант – кладка из керамзитобетонных блоков толщиной 300 мм. Установлено, что экономический эффект от применения керамзитобетонных блоков составляет 9,3 % на 1 м³ стены по сравнению с кладкой из кирпича силикатного без учета положительного эффекта при подборе фундаментных блоков и плит, который достигается в результате уменьшения собственного веса стены. Предложены пути улучшения физико-механических характеристик керамзитобетона: применение в качестве крупного заполнителя керамзитового щебня, увеличение прочности керамзитового гравия на стадии его производства, использование керамзита фракции до 10 мм, фибровое армирование полипропиленовой фиброй. В заключении сделан вывод, что применение керамзитобетонных изделий, изготовленных из конструкционно-теплоизоляционных бетонов, позволяет улучшить показатели функциональной эффективности несущих строительных конструкций.

Ключевые слова: легкий бетон, керамзит, керамзитобетон, конструкционно-теплоизоляционный бетон, блок, кирпич, ограждающие конструкции.

Введение. В современном строительстве для изготовления ограждающих и несущих конструкций приоритетным направлением является разработка и практическое использование ресурсосберегающих, высококачественных, доступных строительных материалов, обладающих при этом пониженной себестоимостью.

В Беларуси повсеместно применяются монолитные и сборные железобетонные конструкции, однако железобетон как строительный материал имеет ряд недостатков. В числе основных недостатков можно назвать значительный собственный вес, высокую тепло- и звукопроводность, трещинообразование вследствие усадки и силовых воздействий. Альтернативным аналогом бетону нормального веса может быть керамзитобетон. В СССР массово изготавливались сборные железобетонные конструкции из керамзитобетона (например, плиты перекрытий и покрытий, стеновые панели, стропильные фермы) [1]. Связано это с тем, что конструкционно-теплоизоляционные легкие бетоны на керамзитовом заполнителе по сравнению с бетонами на плотных заполнителях имеют ряд преимуществ: низкий собственный

Ржевуцкая Валерия Андреевна, преподаватель каф. промышленного и гражданского строительства Белорусско-Российского университета (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пр. Мира, 43, 212000, г. Могилёв, Беларусь; e-mail: valeriarzhevuckaya@gmail.com

Москалькова Юлия Георгиевна, канд. техн. наук, доц., доц. каф. промышленного и гражданского строительства Белорусско-Российского университета (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пр. Мира, 43, 212000, г. Могилёв, Беларусь; e-mail: julia43@tut.by

вес, что обусловлено малой плотностью (1000–2000 кг/м³ согласно СП 5.03.01 [2]); хорошая тепло- и звукоизоляция. Следует отметить, что при подборе состава легких бетонов на пористых заполнителях в качестве мелкого заполнителя рекомендуется использовать плотный песок, желательно кварцевый или речной, в котором отсутствуют пылеватые частицы [3–5]. При использовании пористых мелких заполнителей (например, керамзитового песка) или беспесчаной бетонной смеси получить бетон с достаточно высокой прочностью не представляется возможным. В случае применения только пористых мелких заполнителей возможно изготовление ненесущих конструкций, например навесных панелей. Для получения конструкционных легких бетонов рекомендуется смешивать легкий пористый заполнитель с плотным [6] или использовать только плотный заполнитель. Например, в США рекомендуемая к применению в легких бетонах плотность мелкого заполнителя не должна быть менее 960 кг/м³, что больше рекомендуемой плотности крупного пористого заполнителя (от 720 кг/м³) [7].

На сегодняшний день указанные выше положительные качества керамзитобетонных конструкций могут быть получены при условии четкого соблюдения последовательности технологического процесса, применения современного оборудования и соответствия используемых материалов требованиям актуальных государственных стандартов. Выполненный аналитический обзор научных работ [3; 8–15] показал, что исследователи находят весьма перспективным направлением применение керамзитобетонов в производстве строительных ограждающих и несущих конструкций. Помимо этого, в современном строительстве используют достаточное количество различных вариантов конструктивных решений. При разработке отдельных элементов или конструктивной системы проектируемого здания широко применяется метод вариантного проектирования [12–15]. В результате из рассматриваемых выбирается такой вариант, который обеспечивает наилучшие технико-экономические показатели [1; 12–18].

В настоящее время в Беларуси действуют три предприятия по производству керамзитовых заполнителей:

- ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль»;
- ЗАО «Лидский керамзитовый завод»;
- Петриковский керамзитовый завод ОАО «Гомельский ДСК».

Таким образом, в Беларуси имеется достаточная производственная база для массового изготовления керамзитобетонных и керамзитожелезобетонных конструкций. В частности, на данный момент в нашей стране изготавливаются блоки для устройства стенового ограждения. Такие блоки имеют следующие достоинства: низкий удельный вес, безопасность и экологичность (при горении не выделяются токсичные вещества), низкая теплопроводность и высокая шумоизоляция (до 50 дБ) [12], невысокая стоимость. Следует отметить, что кладка наружных стен из керамзитобетонных блоков способствует сокращению продолжительности строительного цикла и удобству в процессе укладки по сравнению с кирпичной кладкой (в 1,5–2 раза), что подтверждено в работах [1; 11]. В [1] отмечено сокращение веса строительных конструкций и всего здания на 150 % по сравнению с конструкциями из бетона на плотных заполнителях и кирпича, что способствует значительной экономии, например, при устройстве фундаментов и позволяет повысить этажность застройки.

Однако кроме преимуществ керамзитобетонные блоки обладают рядом недостатков: не рекомендуется блоки разрезать или распиливать, так как изменение формы может привести к возникновению трещин; не рекомендуется использовать блоки в многоэтажном строительстве; образование «мостиков холода» на участках кладочного раствора [11] в случае, если блоки укладываются на раствор; не рекомендуется использование керамзитобетонных блоков в месте установки ворот (там устраивается кирпичная кладка).

Использование керамзитобетонных блоков марки М75 позволяет возводить здания до трех этажей [11]. В [12] рекомендовано использование автоклавного закаливания при производстве керамзитобетонных блоков, что позволяет повысить прочностные характеристики блоков на керамзитовом заполнителе до 25 %. В работе [11] предложены некоторые технологические приемы для нивелирования недостатков керамзитобетонных блоков. В частности, при строительстве здания выше двух этажей необходима закладка межэтажных армирующих поясов и устройство кладочной сетки через каждые 3–4 ряда блоков.

Проблема заключается в том, что в настоящее время в Беларуси керамзит используется в основном для изготовления ограждающих самонесущих конструкций или в качестве насыпного утеплителя, однако мировой опыт применения легких бетонов подтверждает возможности изготовления из керамзитобетона несущих конструкций, обладающих низкой теплопроводностью, хорошей звукоизоляцией, относительно небольшим собственным весом. Существуют различные варианты улучшения показателей функциональной эффективности керамзитобетона, которые позволят существенно расширить область его применения в нашей стране, в частности изготавливать из него несущие конструкции.

В настоящей работе объектом исследования является конструкция наружных ограждающих стен зданий из керамзитобетонных блоков, что рассмотрено в качестве примера эффективного использования конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона.

Предмет исследования – показатели функциональной эффективности несущих ограждающих конструкций из керамзитобетона.

Цель работы – обосновать эффективность проектирования несущих конструкций зданий из керамзитобетона, предложить пути повышения эксплуатационных качеств таких конструкций.

В соответствии со сформулированной целью задача исследования – расчетным путем подтвердить, что применение керамзитобетонных изделий, изготовленных из конструкционно-теплоизоляционного бетона, позволяет улучшить показатели функциональной эффективности несущих ограждающих конструкций. Для этого была решена конкретная инженерная задача: осуществлен выбор конструкции ограждающих стен склада на основании сравнительного анализа показателей функциональной эффективности. К рассмотрению представлены два варианта: традиционный – кладка стен из силикатного кирпича, альтернативный – кладка из керамзитобетонных блоков. Для решения поставленной задачи ключевым является анализ результатов вариантного проектирования наружных ограждающих конструкций склада, кладка которых выполнена из керамзитобетонных блоков и из силикатного кирпича.

Кроме того, необходимо провести экспериментальные исследования для изучения возможных способов повышения показателей функциональной эффективности керамзитобетона, изготовленного на основе белорусской сырьевой базы, и опытным путем установить основные факторы, влияющие на прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона.

Исходные данные для вариантного проектирования. Вариантное проектирование было выполнено в рамках разработки проектно-сметной документации по объекту «Строительство склада муки на участке по выпечке хлебобулочных изделий филиала “Заречье”».

В конструктивном отношении проектируемое здание бескаркасное, с продольными и поперечными несущими стенами. Общая устойчивость здания обеспечивается совместной работой продольных и поперечных стен, которые связаны дисками перекрытий и покрытий, выполненных из сборных железобетонных многопустотных плит с анкеровкой их между собой.

Исходные данные для вариантного проектирования приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1 – Характеристика проектируемого здания

Показатель	Характеристика
Район строительства	Гомельская область, Речицкий район
Тип здания	Склад
Тип конструкции	Наружные стены
Влажностный режим помещений здания	Нормальный
Класс сложности объекта	K5
Уровень ответственности здания	II
Степень огнестойкости здания	IV
Класс пожарной функциональной опасности здания	Ф 5.2

Таблица 2 – Варианты наружной стены

Характеристика	Варианты конструкции наружных стен	
	Вариант 1	Вариант 2
Материал наружной стены	Керамзитобетонные блоки	Силикатный кирпич
Толщина наружной стены	300 мм	380 мм
Плотность материала	660 кг/м³	1700 кг/м³

Расчет постоянного воздействия от наружной стены из керамзитобетонных блоков и кирпича силикатного. Сокращение веса строительных конструкций значительно влияет на экономический эффект и выбор варианта проектирования наружных ограждающих конструкций.

Значение постоянного воздействия G от собственного веса конструкций согласно выполненному расчету составляет:

- $G_1 = 1,94$ кПа от керамзитобетонных блоков;
- $G_2 = 6,34$ кПа от кирпичной кладки.

Расчетное значение постоянного воздействия G_d (частный коэффициент для постоянных воздействий $\gamma_G = 1,35$ принят согласно СН 2.01.01 «Основы проектирования строительных конструкций» [19]):

- $G_{d,1} = 2,62$ кПа от керамзитобетонных блоков;
- $G_{d,2} = 8,56$ кПа от кирпичной кладки.

В соответствии с полученными данными $G_{d,2}$ от кирпичной кладки превышает $G_{d,1}$ от керамзитобетонных блоков на 226,7 %, из чего следует, что наружная стена из керамзитобетонных блоков позволит также получить положительный экономический эффект при подборе фундаментных плит и блоков.

Теплотехнический расчет наружной стены из керамзитобетонных блоков и кирпичной кладки. Результат теплотехнического расчета является одним из ключевых показателей функциональной эффективности наружных стен, особенно значение сопротивления теплопередачи [15; 20], которое напрямую зависит от используемых материалов для наружных стен и теплоизоляционного материала [15; 21; 22]. Хотя повышение уровня теплоизоляционных свойств ограждающих конструкций приводит к уменьшению трансмиссионных потерь тепловой энергии [18], в [21] отмечено, что при увеличении толщины теплоизоляционного материала

теплопроводность будет уменьшаться, а стоимость теплоизоляции будет увеличиваться до тех пор, пока не превысит экономию, при которой эта дополнительная толщина не принесет никакой экономической выгоды. Поэтому при проектировании ограждающих конструкций следует стремиться к использованию эффективных стеновых материалов, а не только эффективных утеплителей.

Для рассматриваемого строительного объекта был выполнен теплотехнический расчет для двух предлагаемых вариантов конструкции наружной стены (таблица 2). Исходные данные для теплотехнического расчета приведены в таблице 3. Значение нормативного приведенного сопротивления теплопередаче $R_{т.норм}$ определено в соответствии с СН 2.04.02 «Здания и сооружения. Энергетическая эффективность» [23].

Таблица 3 – Исходные данные для теплотехнического расчета

Показатель	Характеристика
Расчетная температура наружного воздуха, t_n	$-32\text{ }^{\circ}\text{C}$
Расчетная температура внутреннего воздуха, t_v	$12\text{ }^{\circ}\text{C}$
Расчетная относительная влажность воздуха, ϕ_v	50 %
Нормативное приведенное сопротивление теплопередаче, $R_{т.норм}$	$2,0\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C/Вт}$
Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, α_e	$8,7\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$
Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, α_n	$23\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$

Расчетные коэффициенты теплопроводности материала конструкции λ (при условиях эксплуатации А) для теплотехнического расчета были приняты равными:

- $\lambda_1 = 0,16\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ для керамзитобетона;
- $\lambda_2 = 0,87\text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ для силикатного кирпича.

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции было рассчитано с применением справочных значений удельных потерь теплоты через теплотехническую неоднородность в соответствии с СП 2.04.01 «Строительная теплотехника» [23]. По результатам теплотехнического расчета наружной стены приведенное сопротивление теплопередаче R_{np} составляет:

- $R_{np1} = 2,03\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C/Вт}$ для керамзитобетонных блоков;
- $R_{np2} = 0,60\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C/Вт}$ для сплошной кирпичной кладки из силикатного кирпича.

В целях проверки точности приведенного выше расчета и наглядной демонстрации был выполнен расчет температурного поля фрагмента двух вариантов конструкции наружной стены с помощью программы Elcut (рисунки 1, 2).

В соответствии с результатами теплотехнического расчета нет необходимости в утеплении наружной стены из керамзитобетонных блоков, а для сплошной кирпичной кладки из силикатного кирпича необходимо утепление, при этом минимальная толщина утеплителя из минераловатных плит составляет 60 мм (расчет выполнен в соответствии с СП 2.04.01 [23]).

Таким образом, согласно анализу результатов теплотехнического расчета керамзитобетонные блоки способствуют улучшению энергетической эффективности конструкции.

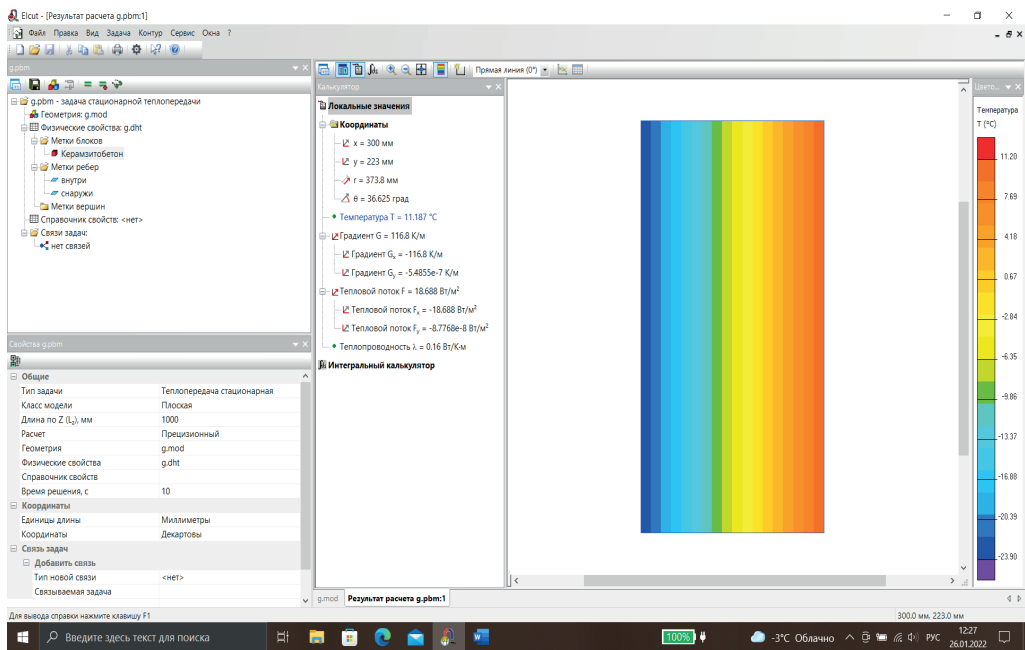


Рисунок 1 – Температурное поле в наружной стене из керамзитобетонных блоков (вариант 1)

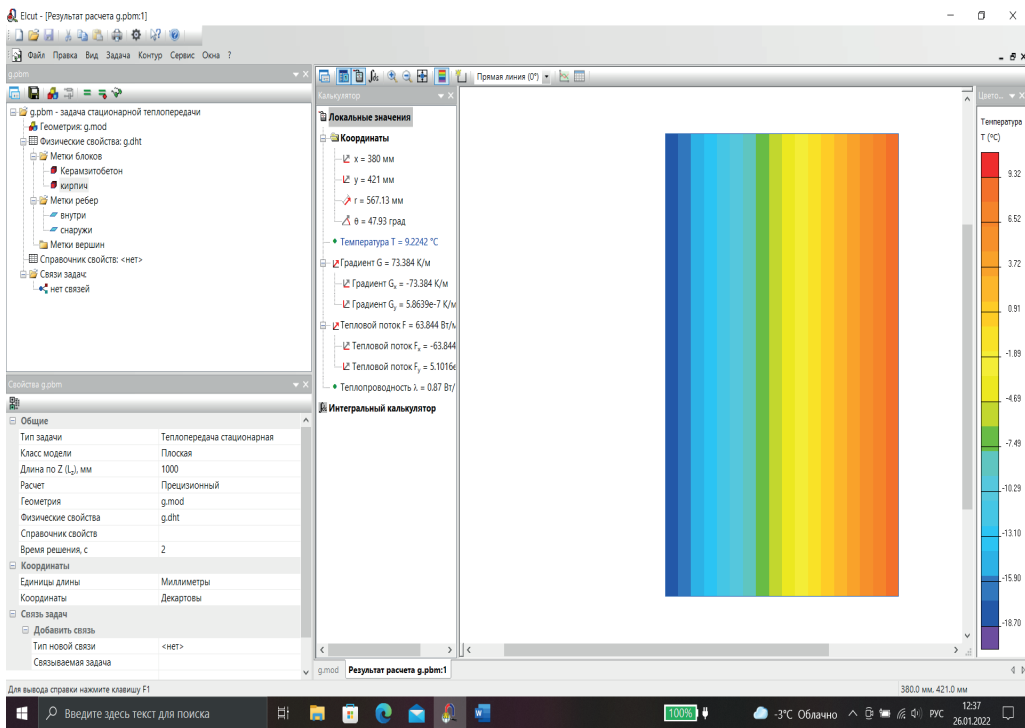


Рисунок 2 – Температурное поле в наружной стене из кирпичной кладки (вариант 2)

Сметный расчет по объекту строительства для конструкции кирпичной и керамзитобетонной наружных стен здания склада. Согласно данным сметного расчета по объекту строительства стоимость ограждающей конструкции на 1 м³ составляет (в ценах на июнь 2021 г.):

- 371,12 бел. руб. для керамзитобетонных блоков;
- 405,68 бел. руб. для кирпичной кладки.

Для сметных расчетов двух вариантов конструкции наружной стены были учтены следующие показатели: материальные ресурсы, выполняемые виды работ, перевозка материалов от ближайших заводов-изготовителей до проектируемого объекта, другие затраты, предусмотренные сметным расчетом.

Полученные затраты в соответствии с результатами сметного расчета для двух вариантов наружной стены склада приведены в таблице 4 и на рисунке 3.

Таблица 4 – Результаты сметного расчета для двух вариантов конструкции наружных стен

Наименование затрат	Величина затрат на 1 м³ стены для вариантов конструкции наружных стен, бел. руб.	
	Вариант 1	Вариант 2
	Кладка из керамзитобетонных блоков	Кладка из кирпича силикатного
Материалы	163,97	126,11
Выполняемые виды работ	42,36	78,75
Перевозка материалов	31,97	55,51
Другие затраты	132,82	145,31

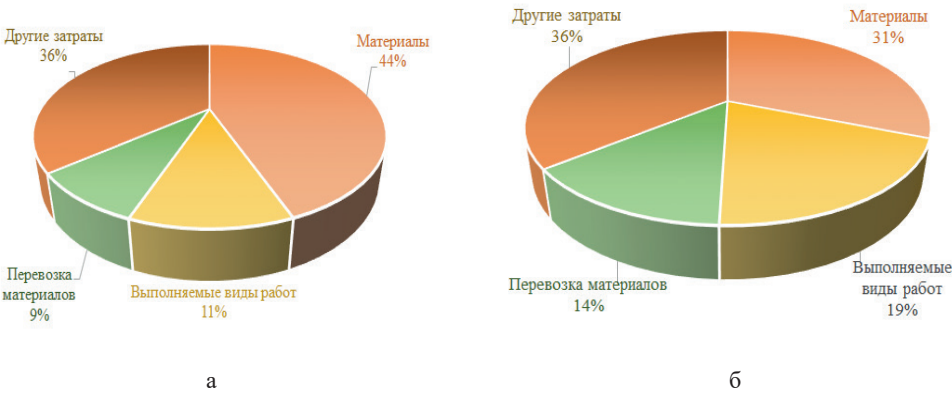


Рисунок 3 – Затраты на конструкцию наружных стен из керамзитобетонных блоков (а) и кирпичной кладки (б)

Таким образом, экономический эффект для конструкции наружной стены из керамзитобетонных блоков (по сравнению с кладкой из силикатного кирпича) на 1 м³ составляет не менее 34,56 бел. руб. в ценах 2021 г., что соответствует 9,3 %. Данный экономический эффект рассчитан только на возведение наружных стен и не учитывает уменьшение нагрузки на фундаменты здания и на грунтовое основание, что обуславливает получение дополнительного экономического эффекта при проектировании подземной части здания.

Предложения по повышению показателей функциональной эффективности керамзитобетона. На примере вариантного проектирования стен склада обоснована эффективность использования керамзитобетонных блоков, однако недостатки керамзитобетона ограничивают его широкое применение для изготовления ответственных конструкций. Существует ряд способов нивелирования недостатков керамзитобетона путем улучшения его прочностных и деформативных характеристик. В настоящем исследовании были рассмотрены следующие варианты.

1. *Использование керамзитового щебня.* Проведенные ранее исследования [24] демонстрируют, что прочность при сдавливании в цилиндре керамзитового щебня примерно в 4 раза превышает прочность в цилиндре керамзитового гравия. В результате при одинаковом составе керамзитобетонной смеси применение керамзитового щебня позволило получить конструкционный керамзитобетон более высокого класса (таблица 5). В испытаниях использовались портландцемент марки М500, речной песок с модулем крупности $M_k = 2,13$, керамзитовый гравий производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль», керамзитовый щебень производства Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК».

Таблица 5 – Характеристики опытных керамзитобетонных образцов [24]

Характеристики керамзита	Состав керамзитобетонной смеси	Фактически полученный класс керамзитобетона
Гравий керамзитовый фракции 5–10 мм и 10–20 мм	$Ц : П : Г = 1 : 1,84 : 0,79$ при $B/Ц = 0,46$	LC 16,2/20,6
Щебень керамзитовый фракции 5–10 мм	$Ц : П : Щ = 1 : 1,84 : 0,79$ при $B/Ц = 0,40$	LC 29,0/33,6
Примечание: в таблице использованы следующие условные обозначения: Ц – цемент; П – песок; Г – гравий; Щ – щебень; B/Ц – водоцементное отношение. Источник: [24].		

Анализ данных таблицы 5 свидетельствует об увеличении прочности на сжатие керамзитобетона в результате использования керамзитового щебня в качестве крупного заполнителя (зафиксировано повышение прочности свыше 60 %). Такое увеличение отчасти связано с формой частиц крупного заполнителя: угловатая форма щебня обеспечивает лучшее сцепление с цементным камнем по сравнению со сферической формой гравия. Однако основополагающим фактором, влияющим на прочность получаемого керамзитобетона, является прочность самого заполнителя.

В настоящее время в Республике Беларусь объем выпускаемого керамзитового гравия значительно превышает объем выпускаемого щебня. При этом для реализуемого в Беларуси гравия производитель заявляет гарантируемую прочность при сдавливании в цилиндре не менее 1 МПа. Однако при таком показателе прочности заполнителя получить бетон высокого класса не представляется возможным. В связи с этим перспективным представляется повышение прочности керамзитового гравия на этапе его производства (например, путем образования поверхностной оболочки из продуктов промышленности).

2. *Повышение прочности керамзитового гравия.* При использовании изготовленного по одинаковой технологии керамзитового гравия значения прочности в цилиндре зависят также от крупности зерен: с увеличением фракции прочность керамзитового гравия в цилиндре уменьшается, что было подтверждено экспериментально (таблица 6).

Таблица 6 – Прочность керамзитового гравия в цилиндре

Фракция керамзитового гравия, мм	Завод-изготовитель	Прочность керамзитового гравия в цилиндре, МПа
4–10	ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль»	1,076
5–10		1,038
10–16		0,924
10–20		0,909

Результаты испытания керамзитобетонных образцов-кубов с размерами 100 × 100 × 100 мм и 150 × 150 × 150 мм, изготовленных из керамзитобетона одинакового состава, но с использованием керамзитового гравия разных фракций, приведены в таблице 7. Согласно результатам испытаний с увеличением крупности заполнителя средняя кубиковая прочность на сжатие керамзитобетона снижается более чем на 30 %.

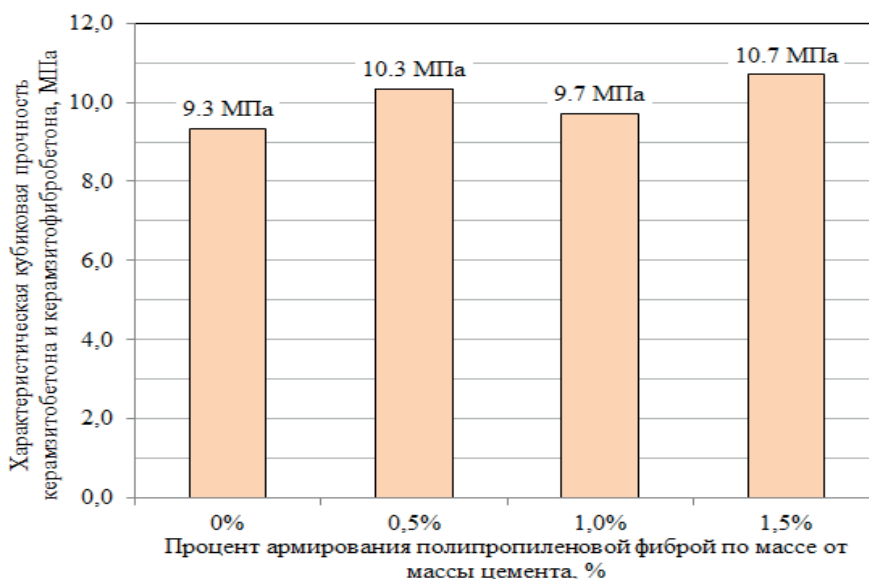
Таблица 7 – Результаты испытаний керамзитобетонных образцов-кубов

Фракция керамзитового гравия, мм	Состав керамзитобетонной смеси	Средняя кубиковая прочность на сжатие керамзитобетона, $f_{lc, cube, m}$, МПа	Стандартное отклонение, S, МПа	Коэффициент вариации, V, %
5–10	$\Pi : П : Г = 1 : 1,84 : 0,79$ при $B/\Pi = 0,52$	16,54	0,39	2,33
10–16	$\Pi : П : Г = 1 : 1,84 : 0,79$ при $B/\Pi = 0,52$	10,59	1,07	10,14

Таким образом, экспериментально установлено, что увеличение крупности зерна керамзита оказывает негативное влияние на прочность керамзитового гравия в цилиндре. То есть чем больше фракция гравия, тем ниже прочность получаемого на его основе керамзитобетона. В связи с этим для получения керамзитобетонов конструктивных классов рекомендуется использовать керамзитовый заполнитель фракции не более 10 мм.

3. Использование полипропиленовой фибры. Одним из наиболее распространенных способов улучшения деформативных свойств бетонов является дисперсное армирование различными волокнами. Для керамзитобетона перспективным представляется применение полипропиленовой фибры с длиной волокна не более 10–16 мм, т.е. соизмеримой по длине с максимальной крупностью заполнителя согласно рекомендациям [25]. Полипропиленовая фибра сегодня находит все более широкое применение в Беларуси, к тому же в нашей стране имеются достаточные производственные мощности для выпуска такой фибры.

В соответствии с результатами ранее проведенных исследований [26; 27] наличие полипропиленового волокна в керамзитобетонной смеси позволяет улучшить прочностные и деформативные характеристики керамзитобетона (возможно увеличение прочности до 15 % (рисунок 4), увеличение относительных продольных деформаций в пиковой точке диаграммы деформирования на 50 % и более).



Источник: [26].

Рисунок 4 – Изменение характеристической кубиковой прочности керамзитобетона в зависимости от содержания полипропиленовой фибры по массе от массы цемента

Заключение. Согласно полученным показателям функциональной эффективности наружных стен использование керамзитобетонных блоков способствует сокращению веса строительных конструкций в 3 раза, улучшению энергетической эффективности и получению положительного экономического эффекта по сравнению со стенами из силикатного кирпича. Расчетными методами обоснована эффективность использования керамзитобетонных блоков при устройстве наружных стен склада (экономический эффект от использования керамзитобетонных блоков составил 9,3 % на 1 м³ наружной стены). Таким образом, на примере конкретного строительного объекта подтверждена эффективность применения керамзитобетонных конструкций из конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона.

Предложены возможные пути повышения показателей функциональной эффективности керамзитобетона: применение керамзитового щебня в качестве крупного заполнителя, повышение прочности керамзитового гравия на стадии его производства, использование керамзита с максимальной крупностью зерен до 10 мм, дисперсное армирование полипропиленовой фиброй. Это позволит на основе белорусской сырьевой базы получать конструкционно-теплоизоляционные керамзитобетоны, пригодные для изготовления несущих керамзитожелезобетонных и керамзитоволокножелезобетонных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горин, В. М. Применение керамзитобетона в строительстве – путь к энерго- и ресурсоэффективности, безопасности зданий и сооружений / В. М. Горин // Строительные материалы. – 2010. – № 8. – С. 8–10.
2. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020 : утв. М-вом архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь 16.09.2022 : введ. 16.11.2020 (с отменой СНБ 5.03.01-02, СНиП 2.03.01-84). – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 245 с.
3. Domagala, L. Effect of lightweight aggregate impregnation on selected concrete properties / L. Domagala, A. Podolska // Materials. – 2022. – Vol. 198, No. 15. – 18 p. doi: 10.3390/ma15010198.
4. Thienel, K.-C. Application of lightweight concrete / K.-C. Thienel // Structural lightweight aggregate concrete: Workshop proceeding from a Nordic Workshop, Trondheim, Norway, February 20th, 2019 / Nordic Concrete Federation ; Eds.: T. Kanstand, J. A. Øverli, J. Živkovic. – Trondheim, 2019. – P. 6–9.
5. Chandra, S. Lightweight aggregate concrete. Science, Technology, and Applications / S. Chandra, L. Berntsson. – Norwich, New York, USA : Noyes Publications (William Andrew Publishing), 2002. – 407 p.

6. Dawood, E. Th. Rational mix design of lightweight concrete for optimum strength // E. Th. Dawood, M. Ramli // 2nd International Conference on Built Environment in Developing Countries (ICBEDC), Penang, Malaysia, Dec. 3–4, 2008 / School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia ; Eds.: A. S. Hassan [et al.]. – 2008. – P. 515–526.
7. Castrodale, R. W. Behavior and design of structural LWC in USA / R. W. Castrodale // Structural lightweight aggregate concrete: Workshop proceeding from a Nordic Workshop, Trondheim, Norway, February 20th, 2019 / Nordic Concrete Federation ; Eds.: T. Kanstand, J. A. Øverli, J. Zivkovic. – Trondheim, 2019. – P. 10–15.
8. Agrawal, Y. A comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction / Y. Agrawal [et al.] // Construction Materials. – 2021. – Vol. 1. – P. 39–62. doi: 10.3390/constrmater1010003.
9. Вытчиков, Ю. С. Оценка теплозащитных характеристик колодцевых кладок с применением беспесчаного керамзитобетона / Ю. С. Вытчиков [и др.] // Градостроительство и архитектура. – 2019. – Т. 9, ч. 1. – С. 15–19. doi: 10.17673/Vestnik.2019.01.3.
10. Баженов, Ю. М. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности / Ю. М. Баженов [и др.]. – М. : АСВ, 2008. – 320 с.
11. Крамаренко, А. В. Приемы и технологии нивелирования недостатков керамзитобетонных блоков / А. В. Крамаренко, М. Н. Путилова, К. В. Никитина // Перспективы науки. – 2018. – № 10. – С. 34–36.
12. Крамаренко, А. В. Сравнительный анализ теплотехнических характеристик керамзитобетонных блоков со строительными изделиями аналогичного назначения / А. В. Крамаренко, Н. М. Калинин, Я. А. Миронова // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 4. – С. 318–320.
13. Vilcekova, S. Comparison of environmental and energy performance of exterior walls // S. Vilcekova [et al.] // Energy Procedia. – 2015 – Vol. 78. – P. 231–236. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.617.
14. Maia De Souza, D. Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls / D. Maia De Souza [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 105. – P. 1–33. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.069.
15. Prateep Na Talang, R. Comparing environmental burdens, economic costs and thermal resistance of different materials for exterior building walls / R. Prateep Na Talang, S. Sirivithayapakorn // Journal of Cleaner Production. – 2018. – Vol. 197, part 1. – P. 1508–1520. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.255.
16. Ерофеев, Е. Н. Теплотехнические испытания кладок из различных строительных материалов / Е. Н. Ерофеев // Новые технологии в теплоснабжении и строительстве : сб. работ / УлГТУ ; М. М. Замалева (гл. ред.). – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 44–46.
17. Ерышев, М. С. Принцип сравнительного анализа технико-экономических показателей ограждающих конструкций здания / М. С. Ерышев // Международная научно-техническая конференция молодых ученых, Белгород, 25–27 мая 2020 г. / Белгород. технол. ун-т им. В. Г. Шутова. – Белгород : БГТУ им. В. Г. Шутова, 2020. – С. 2054–2059.
18. Еремкин, А. И. Техничко-экономическое обоснование утепления конструкции наружной стены / А. И. Еремкин, И. К. Пономарёв, К. А. Петрова // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – № 2. – С. 112–118.
19. Основы проектирования строительных конструкций : СН 2.01.01-2019 : утв. и введ. М-вом архитектуры и строительства Респ. Беларусь 08.09.2020 (с отменой ТКП EN 1990-2011 (02250)). – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 90 с.
20. Chirattananon, S. Thermal performance and cost effectiveness of wall insulation under Thai climate / S. Chirattananon, V. D. Hien, P. Tummur // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 45. – P. 82–90. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.025.
21. Aditya, L. A review on insulation materials for energy conservation in buildings / L. Aditya [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 73. – P. 1352–1365. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.034.
22. Charoenkit, S. Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction : a review / S. Charoenkit, S. Yiemwattana // Building and Environment. – 2016. – Vol. 105. – P. 82–94. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.05.031.
23. Строительная теплотехника : СП 2.04.01-2020 : утв. 18.11.2020 : введ. 20.01.2021 (с отменой ТКП 45-2.04-43-2006 (02250)). – Минск : Минстройархитектуры, 2020. – 78 с.
24. Semenyuk, S. D. Calculation method for the formation of microcracks taking into account the density of clayite concrete / S. D. Semenyuk, Yu. G. Maskalkova // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2019. – Vol. 41, No. 1. – P. 59–67. doi: 10.25987/VSTU.2018.41.1.006.
25. Белоусов, И. В. Применение фибробетона в железобетонных конструкциях / И. В. Белоусов [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 4. – С. 1–16.
26. Maskalkova, Y. G. The effective reinforcement ratio of expanded clay concrete by polypropylene fiber / Y. G. Maskalkova, V. A. Rzhnevskaya // Construction of Unique Buildings and Structures. – 2020. – Vol. 93, No. 8. – 11 p. doi: 10.18720/CUBS.93.3.
27. Maskalkova, Yu. G. Compressive strength of expanded clay fiber-reinforced concrete / Yu. G. Maskalkova, V. A. Rzhnevskaya // AlfaBuild. – 2021. – Vol. 19, No. 4. – 9 p. doi: 10.34910/ALF.19.4.

“Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science”

Vol. 12, No. 2, 2022, pp. 78–90

doi.org/10.52275/2223-5396-2022-12-2-78-90

© Yanka Kupala State University of Grodno, 2022

Analysis of the functional efficiency of enclosing structures made of expanded clay concrete

V. A. Rzhevutskaya ¹, Yu. G. Moskalkova ²

¹ Belarusian-Russian University (Belarus)

Mira Ave, 43, 212000, Mogilev, Belarus; e-mail: valeriarzhevuckaya@gmail.com

² Belarusian-Russian University (Belarus)

Mira Ave, 43, 212000, Mogilev, Belarus; e-mail: julia43@tut.by

Abstract. The introduction discusses the main advantages and disadvantages of the use of structural and structural insulated lightweight concrete in the manufacture of load-bearing structures of buildings based on an analytical review of the work of various researchers. It is demonstrated that in the Republic of Belarus there is a sufficient production base for the mass production of expanded clay and expanded clay concrete products. For the special case of designing load-bearing walls made of expanded clay concrete blocks considered in the article, the features of their design are given (for example, reinforced concrete belt, reinforcement of masonry with grids). In the main part, on the example of the design of load-bearing external walls of a warehouse building, the achieved economic effect is demonstrated by the calculation method based on variant design. The results of the practical calculation performed within the framework of the variant design of the enclosing load-bearing walls of the building are presented. Two options are considered: the traditional solution is a masonry of silicate bricks with a thickness of 380 mm, an alternative option is a masonry of expanded clay concrete blocks with a thickness of 300 mm. It is established that the economic effect of the use of expanded clay concrete blocks is 9.3 % per 1 cubic meter. walls compared to the masonry of silicate bricks without taking into account the positive effect in the selection of foundation blocks and slabs, which is achieved as a result of reducing the own weight of the walls. The ways to improve the physical and mechanical characteristics of expanded clay concrete are proposed: the use of expanded clay gravel as a coarse aggregate, increase the strength of expanded clay gravel at the stage of its production, the use of expanded clay fraction up to 10 mm, and fiber reinforcement by polypropylene fiber. In conclusion, it is stated that the use of expanded clay concrete products made of structural and heat-insulating concrete can improve the indicators of the functional efficiency of building structures.

Keywords: lightweight concrete, expanded clay aggregate, expanded clay aggregate concrete, structural insulated concrete, block, brick, load-bearing wall.

References

1. Gorin V. M. The use of expanded clay concrete in construction is the way to energy and resource efficiency, safety of buildings and structures [*Primenenie keramzitobetona v stroitel'stve put'k energo- i resursoeffektivnosti, bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy*]. *Building materials*, 2010, No. 8, pp. 8-10.
2. Concrete and reinforced concrete structures : SP 5.03.01-2020. [*Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii*]. Minsk, 2020, 245 p.
3. Domagała L., Podolska A. Effect of lightweight aggregate impregnation on selected concrete. *Materials*, 2022, vol. 198, No. 15, 18 p. doi: 10.3390/ma15010198.
4. Thienel K.-C. Application of lightweight concrete. *Nordic mini-seminar: Structural lightweight aggregate concrete*, Trondheim, Norway, February 20th. Nordic Concrete Federation ; Eds.: T. Kanstand, J. A. Øverli, J. Zivkovic. Trondheim, 2019, pp. 6-9.
5. Chandra S., Berntsson L. Lightweight aggregate concrete. Science, Technology, and Applications. Norwich, New York, USA, 2002, 407 p.
6. Dawood E. Th., Ramli M. Rational mix design of lightweight concrete for optimum strength. *2nd International Conference on Built Environment in Developing Countries (ICBEDC)*. School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia ; Eds.: A. S. Hassan [et al.]2018, pp. 515-526.
7. Castrodale R. W. Behavior and design of structural LWC in USA. *Nordic mini-seminar: Structural lightweight aggregate concrete*, Trondheim, Norway, February 20th. Nordic Concrete Federation ; Eds.: T. Kanstand, J. A. Øverli, J. Zivkovic. Trondheim, pp. 10-15.

8. Agrawal Y. A. [et al.] Comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction. *Construction Materials*, 2021, No. 1, pp. 39-62. doi: 10.3390/constrmater1010003.
9. Vytchikov Yu. S. [et al.] Assessment of heat-protective characteristics of well masonry with the use of sandless expanded clay concrete. *Urban planning and architecture*, 2019, vol. 9, part 1, pp. 15-19. doi: 10.17673/Vestnik.2019.01.3.
10. Bazhenov Yu. M. [et al.]. Enclosing structures using concretes of low thermal conductivity [*Ograzhdaiushchie konstruksii s ispol'zovaniem betonov nizkoi teploprovodnosti*]. Moscow, 2008, 320 p.
11. Kramarenko A. V., Putilova M. N., Nikitina K. V. Analysis of modern methods of improving the physical properties of cement-containing materials [*Priemy i tekhnologii nivelirovaniia nedostatkov keramzitobetonnykh blokov*]. *Prospects of science*, 2018, No. 10, pp. 34-36.
12. Kramarenko A. V., Kalinchenko N. M., Mironova Ya. A. Comparative analysis of heating engineering descriptions at ceramic-concrete blocks with building walls with analogical purposes [*Sravnitel'nyi analiz teplotekhnicheskikh kharakteristik keramzitobetonnykh blokov so stroitel'nyimi izdeliiami analogichnogo naznacheniia*]. *Innovation and investment*, 2018, No. 4, pp. 318-320.
13. Vilcekova S. [et al.] Comparison of environmental and energy performance of exterior walls. *Energy Proceedings*, 2015, vol. 78, pp. 231-236. doi: 10.1016/J.egypro.2015.11.617.
14. Maia De Souza D. [et al.] Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 105, pp. 1-33. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.069.
15. Prateep Na Talang R., Sirivithayapakorn S. Comparing environmental burdens, economic costs and thermal resistance of different materials for exterior building walls. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 197, part 1, pp. 1508-1520. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.255.
16. Erofeev E. N. Heat engineering tests of masonry from various building materials [*Teplotekhnicheskie ispytaniia kladok iz razlichnykh stroitel'nykh materialov*]. *New technologies in heat supply and construction*, 2021, pp. 44-46.
17. Yeryshev M. S. The principle of comparative analysis of technical and economic indicators of building enclosing structures [*Printsip sravnitel'nogo analiza tekhnikoekonomicheskikh pokazatelei ograzhdaiushchikh konstruksii zdaniia*]. International Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Belgorod, May 25-27, 2020 [*Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia molodykh uchenykh, Belgorod, 25-27 maia 2020 g.*]. Belgorod, 2020, pp. 2054-2059.
18. Eremkin A. I., Ponomarev I. K., Petrova K. A. Feasibility study of insulation of the external wall structure [*Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie utepleniia konstruksii naruzhnoi steny*]. *Education and science in the modern world. Innovation*, 2021, No. 2, pp. 112-118.
19. Basis of structural design : SN 2.01.01-2019. [*Osnovy proektirovaniia stroitel'nykh konstruksii*]. Minsk, 2020, 90 p.
20. Chirarattananon S., Hien V. D., Tummup P. Thermal performance and cost effectiveness of wall insulation under Thai climate. *Energy and Buildings*, 2012, vol. 45, pp. 82-90. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.10.025.
21. Aditya L. [et al.]. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 73, pp. 1352-1365. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.034.
22. Charoenkit S., Yiemwattana S. Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction. *Building and Environment*, 2016, vol. 105, pp. 82-94. doi: 10.1016/j.buildenv.2016.05.031.
23. Building heating engineering : SP 2.04.01-2020. [*Stroitel'naia teplotekhnika*]. Minsk, 2020, 78 p.
24. Semenjuk S. D., Moskalkova Yu. G. Calculation method for the formation of microcracks taking into account the density of claydite concrete. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2019, vol. 41, No. 1, pp. 59-67. doi: 10.25987/VSTU.2018.41.1.006.
25. Belousov I. V. [et al.] The use of fiber-reinforced concrete in reinforced concrete structures [*Primeneniye fibrobetona v zhelezobetonnykh konstruksiyakh*]. Engineering journal of Don, 2017, No. 4, pp. 1-16.
26. Maskalkova Y. G., Rzhevutskaya V. A. The effective reinforcement ratio of expanded clay concrete by polypropylene fiber. *Construction of Unique Buildings and Structures*, 2020, vol. 93, No. 8, p. 11. doi: 10.18720/CUBS.93.3.
27. Maskalkova Y. G., Rzhevutskaya V. A. Compressive strength of expanded clay fiber-reinforced concrete. *AlfaBuild*, 2021, vol. 19, No. 4, 9 p. doi: 10.34910/ALF.19.4.

