

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-17-29

Петров А.А., \*Попов А.Л., Фёдоров А.В.

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

\*E-mail: surrukin@gmail.com

## ЛЕГКИЙ БЕТОН НА ПОРИСТОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ И КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛИТА

**Аннотация.** В статье рассмотрена и экспериментально подтверждена возможность использования пористого заполнителя и композиционного вяжущего ТМЦ-85 для улучшения физико-механических характеристик легкого бетона. Методом матричного двухфакторного планирования осуществлен подбор предварительных составов пеноцеолитбетона (ПЦБ). Получены соответствующие уравнения регрессии, по которым построены соответствующие номограммы. Установлено, что увеличение массового содержания золошлаковых отходов в составе композиционного вяжущего приводит к повышению В/Ц. Прочность ПЦБ возрастает при уменьшении массового содержания золошлака. Достижение оптимальных прочностных характеристик достигается при увеличении концентрации пористого заполнителя и понижении В/Ц, что может объясняться тем, что пористые агрегаты заполнителя прочнее пористой матрицы бетона. Пик прочности достигается при увеличении концентрации заполнителя и увеличении плотности матрицы. На основе проведенных экспериментальных исследований, а также полученных физико-механических свойств предварительных составов ПЦБ, осуществлен подбор оптимального состава ПЦБ с ТМЦ-85. Установлена и предложена модель оптимального структуроформирования лёгкого бетона на пористом заполнителе. Определена технология получения легкого бетона на пористом заполнителе и предложен состав конструкционно-теплоизоляционного бетона с маркой по средней плотности D900 с обеспечением эксплуатационных свойств: класс бетона B5, морозостойкость F100, теплопроводность в сухом состоянии составило  $\lambda = 0,27$  (Вт/м·°C), что удовлетворяет требованиям к конструкционно-теплоизоляционным легким бетонам.

**Ключевые слова:** легкий бетон, композиционное вяжущее, цеолит, пористый заполнитель, золошлак.

**Введение.** Производство легкобетонных изделий занимает значительную часть рынка строительных материалов в России. Использование легких бетонов способствует снижению массы зданий, улучшает теплоизоляционные и звукоизоляционные показатели, уменьшает затраты на транспортировку и монтаж, а также снижает общую стоимость строительства [1].

В Республике Саха (Якутия) действует стратегия социально-экономического развития до 2032 года с определением целевого видения до 2050 года, утвержденная Правительством Республики с 2019 года, согласно которой имеется план развития мероприятий по созданию производств высококачественных ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов, изделий и конструкций. Для Западной Якутии, в частности Сунтарского улуса, ставится задача по разработке карьеров по добыче цеолита, выпуску пористых заполнителей для строительных нужд сроком до 2032 года. Исходя из этого проявляется интерес в использовании пористых заполнителей для получения новых энергоэффективных строительных материалов на основе местной минеральной сырьевой базы.

Проблема экономии энергоресурсов в условиях устоявшейся тенденции роста тарифов на

энергоносители, а также ужесточений нормативных требований к тепловой оболочке зданий [2], предопределяет к строительным материалам высокие показатели энергоэффективности с оптимальной себестоимостью [3], а также обуславливает расширение номенклатуры технологически и экономически эффективных разновидностей вяжущих, обеспечивающих получение высококачественной продукции [4]. В Якутии активно развивается производство пористого заполнителя на основе цеолита Хонгуриинского месторождения (пеноцеолит). Пеноцеолит, как пористый заполнитель, имеет ряд ключевых преимуществ, такие как низкий коэффициент теплопроводности [5] высокая морозостойкость [6], что делает его идеальным для использования в суровых климатических условиях. Однако его применение в качестве заполнителя для получения легких бетонов с высокими теплотехническими и прочностными показателями остается малоизученным. Учитывая значительный объем золошлаковых отходов, образующийся в результате работы твердотопливных котельных Якутии, представляется целесообразным исследовать возможность их применения в качестве сырья для производства легкого бетона, что позволит решить проблему утилизации отходов и повысить теплотехнические харак-

теристики материала. Согласно данным Территориального органа ФСГС по Республике Саха (Якутия) действует 567 твердотопливных котельных, работающих на каменных и бурых углях. За длительный отопительный сезон вырабатывается колоссальное количество золошлаковых отходов, которые можно использовать для изготовления строительных материалов.

Перспективой решения данной проблемы являются легкие бетоны на пористом заполнителе и композиционном вяжущем с использованием местного природного цеолита с добавлением золошлаковых отходов, которые могут оказать положительное влияние на теплотехнические [7–11], технологические [12–16], экологические [17] и прочностные свойства материала [18].

Целью работы является разработка оптимального способа получения конструкционно-теплоизоляционного морозостойкого легкого бетона с высокими физико-механическими показателями с использованием пористого заполнителя местного производства, композиционного вяжущего на основе цеолита месторождения Хонгунуру и золошлаковыми отходами.

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи:

1. Оптимизация пористости легкого бетона на основе анализа влияния объемной концентрации заполнителя и массовой доли золошлака на прочность легкого бетона путем проведения матричного двухфакторного планирования эксперимента;

2. Определение состава и технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе на основе композиционного вяжущего для получения требуемых эксплуатационных свойств.

3. Определение модели оптимального структуроформирования лёгкого бетона на пористом заполнителе;

**Методология.** В работе для получения пеноцеолитбетона (ПЦБ) на пористом заполнителе на основе композиционного вяжущего использовался портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Якутцемент» (табл. 1). В качестве мелкого плотного заполнителя использовался песок речной из поймы р. Лена, соответствующий по всем характеристикам группе «очень мелкий» согласно ГОСТ 8736. В качестве крупного заполнителя использовался пористый заполнитель на основе природного цеолита, изготовленный ООО «Сунтарцеолит». Характеристики крупного заполнителя приведены в таблице 2.

Также применены модифицирующие добавки:

- природный цеолит, производимый предприятием по добыче и обогащению природного

цеолита – ООО «Сунтарцеолит» (табл. 2), в измельченном виде до удельной поверхности 500 м<sup>2</sup>/г обладающий активностью по отношению к СаО (76,6 мг/г).

- отсев золошлаковых отходов производственного цеха ООО «Якутский котловой завод» с фракцией не более 1,0 мм, основными компонентами которого являются оксиды кальция, кремния и алюминия (табл. 3).

- для доведения бетона до требуемой плотности применялся пена с плотностью 70 г/л, получаемой на протеиновом пенообразователе FoamCem с концентрацией 2%.



Рис. 1. Лабораторный пеногенератор с пенопатроном и компрессором

Замешивание смесей осуществлялось на лабораторном смесителе ЛБ-АБ-10 и гравитационном бетоносмесителе СБР132А.

Основные физико-механические характеристики ПЦБ определялись методами испытаний, описанных и регламентируемых межгосударственным стандартом на легкие бетоны ГОСТ 25820-2021.

Для подбора состава бетона в соответствии с ГОСТ 27006-86 (использование данной версии стандарта обусловлено областью применения к конструкционным легким бетонам) на первоначальном этапе проведена оптимизация пористости ПЦБ на основе анализа прочности на сжатие. Для этого было проведено матричное двухфакторное планирование эксперимента, в качестве варьируемых параметров в соответствии с необходимой плотностью и прочностью ПЦБ выбраны объемная концентрация пористого заполнителя для оптимизации макропористости и массовое содержание золошлака для оптимизации микропористости [19]. Результаты описывали через уравнение регрессии (1) с коэффициентом корреляции не менее 0,8.

$$f = y_0 + a \cdot x + b \cdot y + c \cdot x^2 + d \cdot y^2 \quad (1)$$

а



б



Рис. 2. Смесители принудительного действия:  
а – ЛБ-АБ-10; б – СБР132А

Таблица 1  
Свойства портландцемента марки ЦЕМ I  
42,5Н (ОАО «Якутцемент»)

Показатель	Значение
Нормальная плотность, %	25
Остаток на сите 008, %	7,0
Равномерность изменения объема, мм	0,11
Сроки схватывания: – начало, час-мин – окончание, час-мин	2–35 3–55
Средняя активность цемента в возрасте 28 суток, МПа	40,95

Таблица 2  
Характеристика пористого заполнителя  
(ООО «Сунтарцеолит»)

Показатель	Значение
Размер зерен, мм	5–20
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	245
Средняя плотность	502
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	2020
Пористость, %	87,8
Водопоглощение, % мас.	22,8
Прочность на сдавливание, МПа	0,83

Таблица 3  
Химический состав золошлаковых отходов (ООО «Якутский котловой завод»)

Содержание оксидов, %													
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO <sub>2</sub>
35,04	0,69	14,96	3,63	1,71	0,02	3,61	20,83	2,57	0,13	0,71	0	0,03	6,22

Процесс изготовления ПЦБ включает предварительную сушку пористых заполнителей, последовательное дозирование и перемешивание компонентов до однородной массы. Перед введением пористого заполнителя и пены определялась подвижность смеси с помощью вискозиметра Суттарда, целевым значением расплыва являлось 18 см. Для достижения марочной прочности в течение 28 суток образцы после расплывания помещают в камеру с нормальными условиями твердения: с температурой (20±2) °С и относительной влажностью воздуха (95±5) %.

Испытание образцов ПЦБ было выполнено в соответствии со стандартными методиками, с использованием аттестованных приборов и лабораторных установок Инженерно-технического института СВФУ имени М.К. Аммосова. Статистическая обработка экспериментальных данных

была осуществлена при помощи специализированной программы для анализа и визуализации данных.

**Основная часть.** Исходя из характеристик пористого заполнителя (табл. 2) для получения ПЦБ класса В5 необходимо закладывать плотность не менее D900 [20]. Состав легкого бетона на пористом заполнителе на основе композиционного вяжущего выбран для плотности D900. В работе портландцемент заменен композиционным вяжущим ТМЦ-85. В ранних работах показана эффективность природного цеолита как компонента композиционного вяжущего [21, 22].

Для подбора состава бетона в соответствии с ГОСТ 27006-86 на первоначальном этапе проведена оптимизация пористости легкого бетона на основе анализа прочности на сжатие. Для этого было проведено матричное двухфакторное планирование эксперимента, в качестве варьируемых параметров, в соответствии с необходимой

плотностью и прочностью легкого бетона, выбраны объемная концентрация пористого заполнителя для оптимизации макропористости и массовое содержание золошлака для оптимизации микропористости (таблица 4). Выбранное соотношение плотности и прочности представляет

собой целевой компромисс, основывающийся на необходимости обеспечения долговечности материала при сохранении его теплотехнических показателей, учитывая особенности климата Якутии.

Таблица 4

## Условие планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Объемная концентрация пористого заполнителя (ЦЗ)	x	0,53	0,56	0,59	0,03
Массовое содержание золошлака (ЗШ) от вяжущего, %	y	7	14	21	7

Таблица 5

## Матрица планирования

№ точки плана	Факторы	
	x	y
1	+1	+1
2	+1	0
3	+1	-1
4	0	+1
5	0	0
6	0	-1
7	-1	+1
8	-1	0
9	-1	-1

Таблица 6

Составы ПЦБ D900 на 1 м<sup>3</sup>

№ п/п	Пористый заполнитель, кг	ТМЦ-85, кг	Пена, л	Золошлак, кг	Пластификатор, %
1	266	550	60	83	2,7
2			71	55	
3			82	28	
4	252		104	83	
5			115	55	
6			126	28	
7	238		148	83	
8			159	55	
9			170	28	

В лабораторных условиях было приготовлено 9 составов, при каждом значении варьируемых факторов испытывалось по три образца для исключения получения случайных результатов. В соответствии с планом эксперимента, увеличение номера состава сопровождалось уменьшением количества либо пористого заполнителя, либо золошлака, что приводило бы к постоянному повышению плотности. Однако, для сопоставления влияния различных компонентов на прочность бетона требовалось достижение одинаковой плотности всех образцов. Поэтому для корректировки плотности бетона до необходи-

мого значения и формирования пористой структуры также предусматривалось добавление пеноагента в состав легкого бетона. Так, в составах от №1 до №9, где снижалось содержание пористого заполнителя, увеличивали количество добавляемой пены.

Важной частью технологии получения легкого бетона на пористом заполнителе является способ замешивания компонентов и вид бетономесителя. Неудовлетворительными оказались смеси, получаемые с помощью лабораторного смесителя ЛС-АБ-10 с плавающими лопастями. Визуально отмечено, что при перемешивании

смеси пенообразователь не образует изолированные пузырьки, наблюдается эффект «гашения» пены, что приводит к вынужденному повышению В/Ц.

Далее приготовление и перемешивание смеси производилось в бетоносмесителе гравитационного типа и согласно способам, предложенным в источниках под авторством Давидюка А.Н., Сопегина Г.В. и Семейных Н.С. [23, 24]. Подготовка пены производилась с использованием переносного лабораторного пеногенератора, с камерой смешения объемом 40 литров, с пенопатроном и компрессором для подачи сжатого воздуха в дозировке 2% от массы воды. Способ №1 получения ПЦБ подразумевает перемешивание компонентов в следующей последовательности: пеноцеолит вымачивается в 2/3 объема воды затворения в течение 5 минут, далее перемешивается с приготовленной смесью из сухих компонентов (рис. 3). В образовавшуюся смесь вводилась оставшаяся часть 1/3 воды, далее пена. При формовании образцов произошло оседание раствора в нижнюю часть формы (рис. 4). Согласно более классическому способу № 2 необходимо изначально получение растворной смеси с последующей добавкой пористого заполнителя и пены. При этом, согласно наблюдениям, введение пены должно происходить после введения

пористого заполнителя, так как если вводить пористый компонент в пенобетонную смесь, также будет происходить «гашения» пены. Далее в работе приготовление образцов ПЦБ производилось по способу №2.

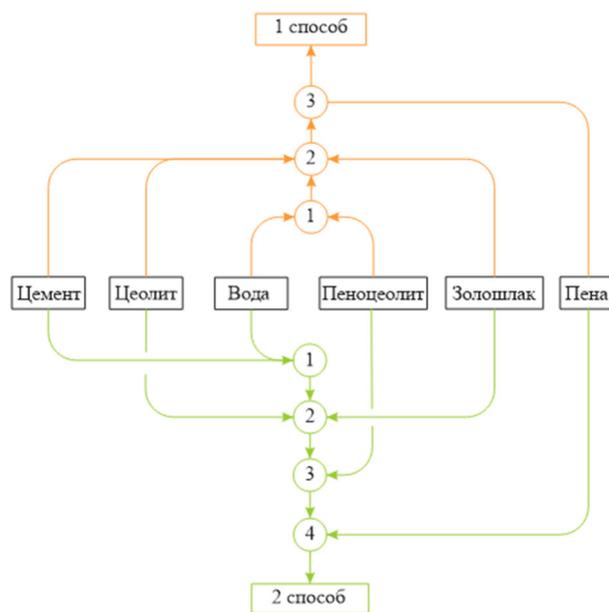


Рис. 3. Способы получения пеноцеолитбетона

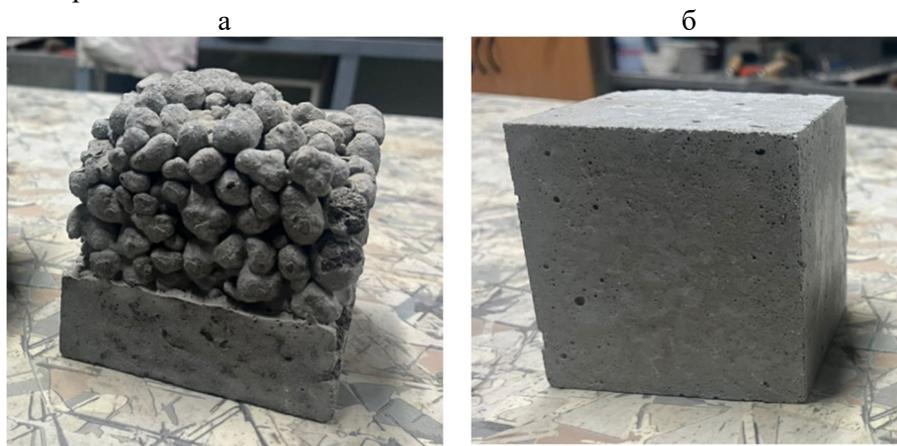


Рис. 4. Лабораторные образцы ПЦБ-бетона размером 100x100x100 мм: а – способ №1; б – способ №2

На основе данных составов были замешаны серии из трех образцов легкого бетона, физико-механические свойства составов, выдержанных в естественных условиях твердения, приведены в таблице 7.

На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии зависимостей:

В/Ц отношения от объемной концентрации пористого заполнителя и массового содержания золошлака (коэффициент корреляции  $R^2=0,9$ ):

$$f = -38,1011 + 131,9129 \cdot ЦЗ + 14,8378 \cdot ЗШ - 106,2566 \cdot ЦЗ^2 - 14,3324 \cdot ЗШ^2 \quad (2)$$

Прочности от объемной концентрации пористого заполнителя и массового содержания золошлака (коэффициент корреляции  $R^2=0,8$ ):

$$f = -14,6161 + 63,1398 \cdot ЦЗ + 0,1087 \cdot ЗШ - 48,1898 \cdot ЦЗ^2 - 0,0063 \cdot ЗШ^2 \quad (3)$$

Прочности от объемной концентрации пористого заполнителя и В/Ц (коэффициент корреляции  $R^2=0,82$ ):

$$f = -6,1225 + 23,3947 \cdot ЦЗ + 0,005 \cdot ЗШ - 20,4027 \cdot ЦЗ^2 + 0,0003 \cdot ЗШ^2 \tag{4}$$

Таблица 7

**Физико-механические свойства составов ПЦБ D900**

№ п/п	Объемная концентрация пористого заполнителя	Массовое содержание золошлака от вяжущего, %	Ц/В	В/Ц	Коэффициент конструктивного качества	Прочность на сжатие, МПа
1	0,60	21	1,17	0,85	5,46	4,92
2	0,59	14	1,54	0,65	6,94	6,25
3	0,61	7	1,73	0,58	7,50	6,75
4	0,56	21	1,25	0,80	5,93	5,34
5	0,56	14	1,38	0,72	6,57	5,91
6	0,57	7	1,53	0,65	6,62	5,95
7	0,53	21	1,40	0,71	5,61	5,05
8	0,52	14	1,48	0,68	5,94	5,35
9	0,52	7	1,73	0,58	6,13	5,52

По полученным уравнениям регрессии построены номограммы зависимостей В/Ц и прочности при сжатии в соотношении с массовым со-

держанием золошлака от композиционного вяжущего и объемной концентрации пористого заполнителя (рис. 5, рис. 6).

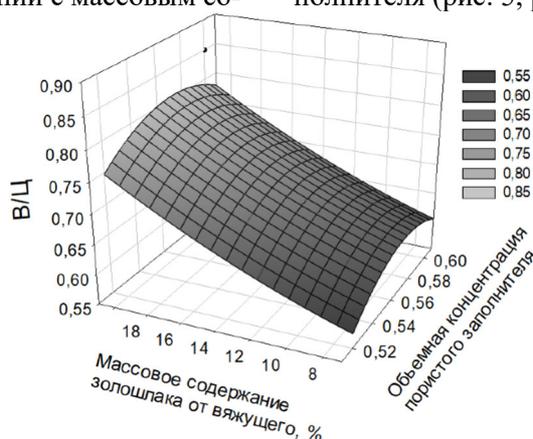


Рис. 5. Зависимость В/Ц от объемной концентрации пористого заполнителя и массового содержания золошлака от вяжущего

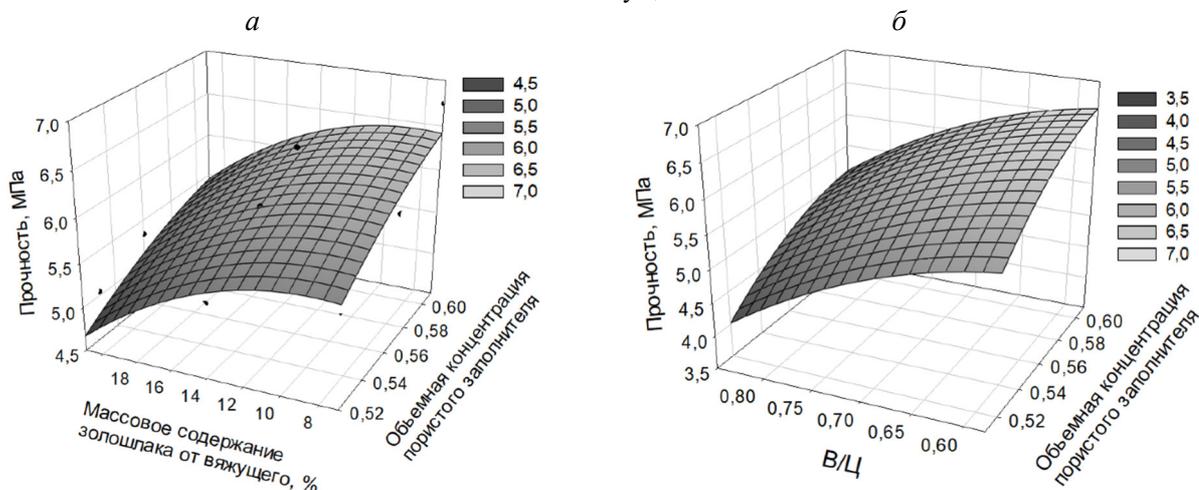


Рис. 6. Зависимости предела прочности при сжатии легкого бетона от объемной концентрации пористого заполнителя, а также:  
а – от массового содержания золошлака от вяжущего; б – от В/Ц

В ходе проведения эксперимента установлено (рис. 6), что увеличение массового содержания золошлаковых отходов в составе композиционного вяжущего приводит к повышению В/Ц. Это может быть объяснено тем, что золошлаковые отходы имеют частицы несгоревшего топлива, которые способны в значительной степени поглощать воду [25]. В следствии этого также прочность ПЦБ возрастает при уменьшении массового содержания золошлака. Достижение оптимальных прочностных характеристик достигается при увеличении концентрации пористого заполнителя и понижении В/Ц, что может объясняться тем, что пористые агрегаты заполнителя прочнее пористой матрицы бетона. При этом пик прочности достигается при увеличении концентрации заполнителя и увеличении плотности матрицы.

Таким образом, можно предложить модель оптимального структуроформирования лёгкого бетона на пористом заполнителе (рис. 7). Низкая концентрация пористого заполнителя в лёгком бетоне приводит к тому, что для достижения целевой плотности снижается плотность и повышается пористость матрицы, в следствии чего снижается прочность. При высокой плотности и низкой пористости матрицы создается не плотная структура с крупными структурными порами, что также снижает прочность легкого бетона. Таким образом, для достижения максимальной прочности легкого бетона необходимо закладывать высокую концентрацию пористого заполнителя для обеспечения оптимальной пористости и прочности матрицы легкого бетона.

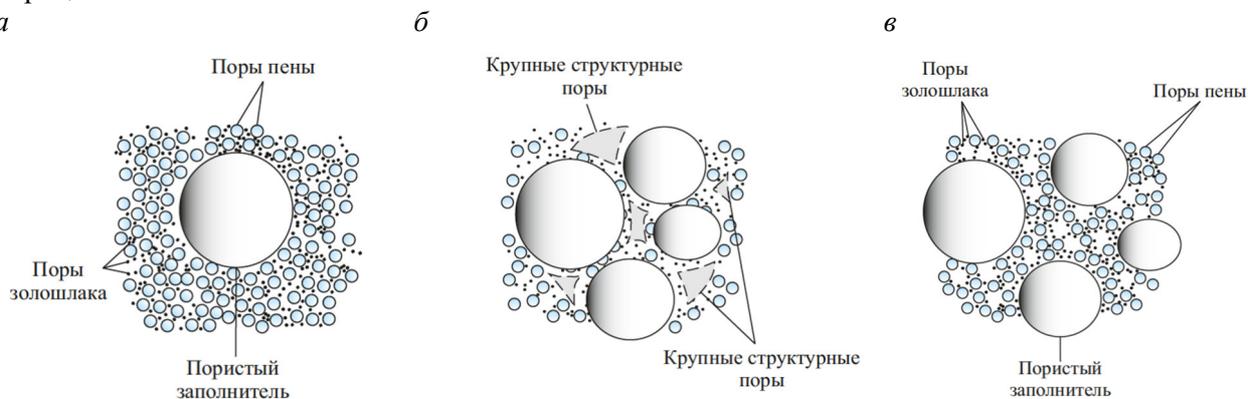


Рис. 7. Модель структуроформирования легкого бетона на пористом заполнителе:  
 а – высокопористая матрица с низкой концентрацией заполнителя;  
 б – низкопористая матрица с высокой концентрацией заполнителя;  
 в – оптимальная пористость матрицы с высокой концентрацией заполнителя

Далее проведен подбор состава бетона по ГОСТ 27006-86 где за варьируемый параметр взято Ц/В отношение. Данные по зависимости Ц/В от прочности взяты из предыдущих испытаний (рис. 8). Предварительные составы, для достижения класса прочности В5, плотности D900

и подвижности ПЗ приведены в таблице 8. При этом для достижения необходимой плотности (веса и объёма) дополнительно дозировались молотый цеолит и пена.

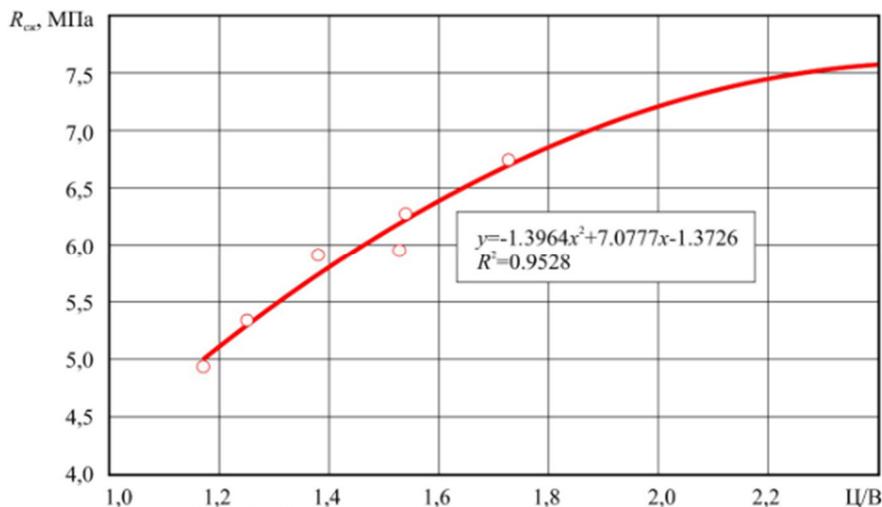


Рис. 8. Зависимость предела прочности при сжатии от цементно-водного отношения

Таблица 8

## Составы конструкционно-теплоизоляционного ПЦБ с ТМЦ-85

Номер состава	Маркировка	Ц/В	Вода, кг	ТМЦ-85, кг	Пористый заполнитель, кг	Цеолит, кг	Золошлаковые отходы, кг	Пена, л	Плотность смеси, кг/м <sup>3</sup>
1	B7,5 F100 ПЗ D900	2,1	200	420	265	73	30	70	983
2		2,4		480		27	34	50	997
3		1,8		360		120	26	110	970

Результаты по зависимости прочности легкого бетона от Ц/В также подтверждают предложенную модель оптимального структурообразования легкого бетона на пористом заполнителе (табл. 9, рис. 9) Существует оптимальное Ц/В,

при котором достигается оптимальная плотность и пористость матрицы легкого бетона, при увеличении Ц/В повышается плотность цементного теста, что приводит по всей видимости к неэффективному распределению пористости.

Таблица 9

## Физико-механические свойства составов конструкционно-теплоизоляционных ПЦБ

Номер состава	Маркировка	Средняя плотность бетона (кг/м <sup>3</sup> )	Средняя прочность на сжатие на 28 сутки твердения (МПа)
1	B7,5 F100 ПЗ D900	903	6,54
2		896	5,6
3		883	6,32

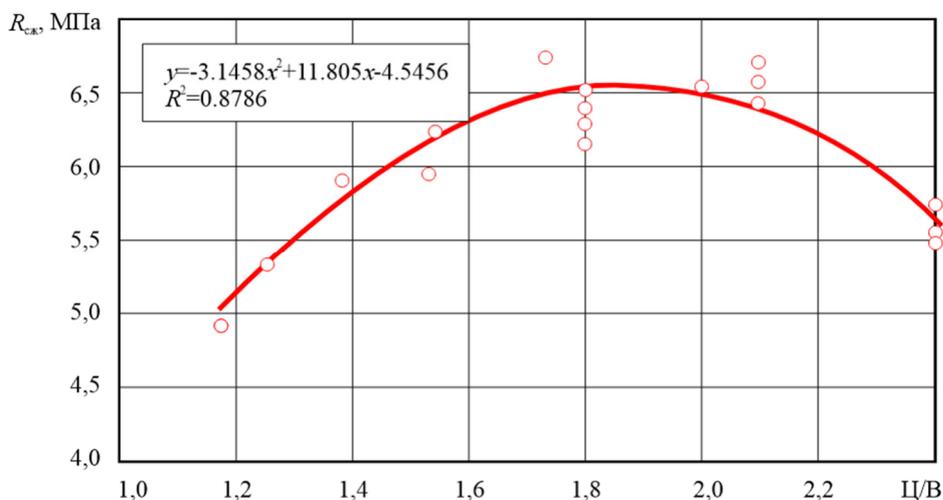


Рис. 9. Зависимость предела прочности при сжатии от цементно-водного отношения опытных образцов ПЦБ с ТМЦ-85

В заключении определен оптимальный состав согласно зависимости и получены технические характеристики в соответствии с ГОСТ 25820-2021 «Бетоны легкие. Технические условия» (табл. 10). Для наглядности состав с ТМЦ-85 был сравнен с составом на портландцементе.

**Выводы.** Таким образом, установлен оптимальный способ получения конструкционно-теплоизоляционного морозостойкого легкого бетона с высокими физико-механическими показателями

с использованием пористого заполнителя местного производства и композиционного вяжущего на основе цеолита месторождения Хонгуруу.

На основе экспериментальных данных получены уравнения регрессии и построены номограммы зависимости прочности на сжатие. Установлена и предложена модель оптимального структуроформирования лёгкого бетона на пористом заполнителе, согласно которой для достижения максимальной прочности легкого бетона необходимо закладывать высокую концентрацию

цию пористого заполнителя для обеспечения оптимальной пористости и прочности матрицы легкого бетона. При этом оптимальная пористость и

прочность матрицы легкого бетона достигается при оптимальном Ц/В.

Таблица 10

### Оптимальный состав конструкционно-теплоизоляционного ПЩБ

Маркировка		B5 D900 ПЗ F100	
Состав, на 1 м <sup>3</sup>	Ц/В	2	
	Вода, кг	200	
	Цемент, кг	400	–
	ТМЦ-85, кг	–	400
	Цеолит, кг	88	88
	Зола, кг	32	32
	Пористый заполнитель, кг	265	
Пена, л	83		
Свойства	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	892	861
	Марка по плотности	D900	
	Предел прочности при сжатии, МПа	5,9	6,49
	Класс прочности	B5	
	Марка по морозостойкости	F75	F100
	Теплопроводность, Вт/(м °С)	0,32	0,27

Определена технология получения легкого бетона на пористом заполнителе, согласно которой замешивания компонентов легкого бетонной смеси должно начинаться с получения сначала растворной части, затем последовательного введения пористого заполнителя и пены. При этом перемешивание обеспечивается бетоносмесителем гравитационного типа.

Предложен состав конструкционно-теплоизоляционного бетона с маркой по средней плотности D900 с обеспечением эксплуатационных свойств: класс бетона B5, морозостойкость F100, теплопроводность в сухом состоянии  $\lambda = 0,27$  (Вт/м·°С), что удовлетворяет требованиям к конструкционно-теплоизоляционным легким бетонам. Применение данного материала в строительстве Якутии остается оправданным благодаря прочностно-плотностному балансу. Развитие производства легкого бетона на пористом заполнителе на основе природного цеолита Якутии позволит сократить транспортно-логистические издержки при строительстве, укрепить региональную экономику, повысить долговечность зданий и снизить энергозатраты на эксплуатацию, а также открыть новые возможности для повышения их эффективности и расширения областей применения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ризаев Б.Ш., Мамадалиев А.Т., Мухитдинов М.Б. Анализ эффективности использования пористых заполнителей для лёгких бетонов // Экономика и социум. 2022. № 2-1(93). С. 461–467.

2. Корнилов Т.А., Посельский Ф.Ф., Потравный И.М., Попов А.Л., Макаров А.И. Проблемы обеспечения населения Российской Арктики комфортным жильем на примере Республики Саха (Якутия) // ЭКО. 2023. № 12(594). С. 130–149. DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2023-12-130-149.

3. Чередниченко Т.Ф., Тамбовцев А.М., Чеснокова В.Д., Журбенко М.Д. Технологические и экономические аспекты развития индустрии легких бетонов конструкционного назначения // Инженерный вестник Дона. 2021. № 9(81). С. 1–7.

4. Шаталова С.В., Чернышева Н.В., Глаголев Е.С., Лесниченко Е.Н., Дребезгова М.Ю. Эффективный ячеистый бетон на композиционном гипсовом вяжущем // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 10. С. 11–18. DOI: 10.34031/article\_5db331a5c52049.41127542.

5. 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

6. Местников А.Е., Павлов Д.Г. Возможности производства гранулированного пеностеклянного материала в условиях Якутии // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. №. 1-8. С. 32.

7. Сопегин Г.В., Салова П.В. Анализ сырьевых материалов при подборе состава легких бетонов на пористых заполнителях // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2024. Т. 1. С. 143–147.

8. Ткач Е.В., Рахимов А.М. Пеностеклокристаллический пористый заполнитель на основе

техногенных отходов для легких бетонов // Строительство и реконструкция. 2022. № 6(104). С. 140–148. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-140-148.

9. Крылов С.А. Легкие бетоны на пористых заполнителях // Аллея науки. 2018. Т. 2, № 1(17). С. 199–201.

10. Дмитриев Н.С., Наруть В.В. Использование крупного заполнителя для повышения эффективности бетонов // Дни студенческой науки : Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры, Москва, 04–07 марта 2019 года. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2019. С. 1099–1101.

11. Mahmmud L.M.R., Dulaimi A., Bernardo L.F.A., Andrade J.M.d.A. Characteristics of Lightweight Concrete Fabricated with Different Types of Strengthened Lightweight Aggregates // Journal of Composites Science 2024. Vol. 8. 144. DOI: 10.3390/jcs8040144

12. Алфимова Н.И., Калатоzi В.В., Карацупа С.В., Вишнеvская Я.Ю., Шейченко М.С. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 85–89.

13. Стешенко А.Б., Кудряков А.И., Иноземцев А.С., Иноземцев С.С. Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон для индивидуального монолитного жилищного строительства // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16, № 4. С. 320-328. DOI:10.15828/2075-8545-2024-16-4-320-328.

14. Нецвет Д.Д., Нелюбова В.В., Строкова В.В. Композиционное вяжущее с минеральными добавками для неавтоклавных пенобетонов // Вестник БГТУ. В.Г. Шухова. 2019. № 4. С. 122–131. DOI: 10.34031/article\_5cb1e65d077f65.54773394.

15. Махортов Д.С., Загороднюк Л.Х., Насонова В.В., Сумской Д.А. Композиционное вяжущее с использованием алюмосиликатных наполнителей и органических добавок биологического происхождения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 6. С. 8–18. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-6-8-18.

16. Славчева Г.С., Буймарова Т.К. Физико-климатическая стойкость пенобетонов на основе техногенного сырья // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2020. № 2(43). С. 124-131. DOI:10.24866/2227-6858/2020-2-13

17. Жаканов А.Н. Природные пористые заполнители легкого бетона // Наука и техника Казахстана. Павлодар: Научный журнал Торайгыров Университета, 2023. С. 155-162. DOI: 10.48081/LRRE9213

18. Строчкий В.Н., Савин В.И., Полетаев В.В. Прочностные характеристики легкого бетона на гранулированной пеностеклокерамике // Бетон и железобетон. 2023. № 2(616). С. 14-30. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-2(616)-14-30.

19. Местников А.Е., Федоров В.И. Математическое планирование в проектировании состава легкого бетона // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11-1. С. 82–87. DOI: 10.17513/snt.37770.

20. Matveeva O., Baishev N., Makarov A., Popov A., Pavlyukova I., Grigoriev N. Enhancing lightweight concrete strength through modified zeolite-alkaline porous aggregate: composition optimization and structural application // Magazine of Civil Engineering. 2024. No. 1. DOI:10.34910/MCE.125.7.

21. Патент № 2803754 С1 Российская Федерация, МПК С04В 7/13, С04В 28/04, С04В 22/00. Вяжущее для производства легкого бетона / А.Л. Попов, А.В. Федоров; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Северо-Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова". № 2023105155; заявл. 07.03.2023 : опубл. 19.09.2023, Бюл. №26. 6 с.

22. Popov A., Yadrikhinsky V, Mestnikov A. Peculiarities of hydration and frost resistance of cement with natural zeolite additive // Magazine of Civil Engineering. 2023. No. 1(117). DOI: 10.34910/MCE.117.11.

23. Худякова Л.И., Залуцкий А.В., Палеев П.Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // XXI век. Техносферная безопасность. 2019. Т. 4, № 3(15). С. 375–391. DOI:10.21285/2500-1582-2019-3-375-391.

24. Давидюк А.Н. Конструкционно-теплоизоляционные бетоны на стекловидных пористых заполнителях для эффективных ограждающих конструкций // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 4(12). С. 72–80.

25. Сопегин Г.В., Семейных Н.С. Подбор состава конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе гранулированного пеностекла с применением аппарата математического планирования эксперимента // Инженерный вестник Дона. 2019. № 4(55).

## Информация об авторах

**Петров Айгал Афанасьевич**, магистрант кафедры «Прикладная механика и строительное материаловедение». Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

**Попов Александр Леонидович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Прикладная механика и строительное материаловедение». E-mail: [surrukin@gmail.com](mailto:surrukin@gmail.com). Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

**Фёдоров Артём Владимирович**, старший преподаватель кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция». E-mail: [crawltrick@gmail.com](mailto:crawltrick@gmail.com). Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. Россия, 677000, Якутск, ул. Кулаковского, д. 50.

Поступила 28.10.2024 г.

© Петров А.А., Попов А.Л., Фёдоров А.В., 2025

**Petrov A.A., \*Popov A.L., Fedorov A.V.**

North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov

\*E-mail: [surrukin@gmail.com](mailto:surrukin@gmail.com)

## LIGHTWEIGHT CONCRETE ON A POROUS AGGREGATE AND A COMPOSITE BINDER USING NATURAL ZEOLITE

**Abstract.** The article considers and experimentally confirms the possibility of using a porous aggregate and a composite binder FGC-85 to improve the physical and mechanical characteristics of lightweight concrete. The selection of preliminary compositions of foam zeolite concrete (FZC) was carried out by the method of matrix two-factor planning. The corresponding regression equations are obtained, according to which the corresponding nomograms are constructed. It has been established that an increase in the mass content of ash and slag waste in the composition of a composite binder leads to an increase in W/C. The strength of the FZC increases with a decrease in the mass content of ash slag. Optimal strength characteristics are achieved with an increase in the concentration of porous aggregate and a decrease in W/C, which may be explained by the fact that porous aggregates of aggregate are stronger than the porous matrix of concrete. The peak strength is achieved with an increase in the filler concentration and an increase in the density of the matrix. Based on the conducted experimental studies, as well as the obtained physico-mechanical properties of the preliminary compositions of FZC, the selection of the optimal composition of FZC with FGC-85 was carried out. A model of optimal structuring of lightweight concrete on a porous aggregate has been established and proposed. The technology for producing lightweight concrete on a porous aggregate is determined and the composition of structural and thermal insulation concrete with an average density grade of D900 is proposed, ensuring operational properties: concrete class B5, frost resistance F100, thermal conductivity in dry condition was  $\lambda = 0.27$  (W/m·°C), which meets the requirements for structural and thermal insulation lightweight concretes.

**Keywords:** lightweight concrete, composite binder, zeolite, porous aggregate, ash slag

### REFERENCES

1. Rizaev B.Sh., Mamadaliev A.T. Mukhitdinov, M. B. Analysis of the effectiveness of using porous aggregates for light concretes [Analiz e'ffektivnosti ispol'zovaniya poristy'kh zapolnitelej dlya lyogkikh betonov]. Y'konomika i socizium. 2022. No. 2-1(93). Pp. 461–467. (rus)
2. Kornilov T.A., Poselsky F.F., Potravny I.M., Popov A.L., Makarov A.I. Problems of providing the population of the Russian Arctic with a comfortable housing on the example of the Republic of Sakha (Yakutia) [Problemy obespecheniya naseleniya Rossijskoj Arktiki komfortnym zhil'em na primere Respubliki Saha (Yakutiya)]. ECO. 2023. No. 12(594). Pp. 130–149. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2023-12-130-149. (rus)
3. Cherednichenko T.F., Tambovtsev A.M., Chesnokova V.D., Zhurbenko M.D. Technological and economic aspects of the development of the light concrete industry for structural purposes [Tekhnologicheskie i ekonomicheskie aspekty razvitiya industrii legkih betonov konstrukcionnogo naznacheniya]. Engineering Journal of Don. 2021. No. 9(81). Pp. 1–7. (rus)
4. Shatalova S.V., Chernysheva N.V., Glagolev E.S., Lesnichenko E.N., Drebezgova M.Yu. Effective cellular concrete on a composite gypsum binder [Effektivnyj yacheistyj beton na kompozicionnom gipsovom vyazhushchem]. Bulletin of BSTU named

after V.G. Shukhov. 2019. No. 10. Pp. 11–18. DOI: 10.34031/article\_5db331a5c52049.41127542. (rus)

5. Mestnikov A.E., Semenov S.S., Vasilyeva D.V. Rational use of mineral resources of Yakutia in the technology of building materials [Racziional'noe ispol'zovanie mineral'no-syr'evy'kh resursov Yakutii v tekhnologii stroitel'ny'kh materialov]. Fundamental'ny'e issledovaniya. 2017. No. 12-1. Pp. 80–84. (rus)

6. Mestnikov A.E., Pavlov D.G. Possibilities of production of granular foam glass material in Yakutia [Vozmozhnosti proizvodstva granulirovannogo penosteklyannogo materiala v usloviyakh Yakutii]. Sovremennyye tendenczii razvitiya nauki i tekhnologii. 2016. No. 1-8. Pp. 32. (rus)

7. Sopegin G.V., Salova P.V. Analysis of raw materials in the selection of the composition of light concretes on porous aggregates [Analiz syr'evykh materialov pri podbore sostava legkih betonov na poristykh zapolnitelyah]. Sovremennyye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika. 2024. Vol. 1. Pp. 143–147. (rus)

8. Tkach E.V., Rakhimov A.M. Foam-glass-crystalline porous filler based on man-made waste for light concretes [Penosteklokristallicheskiy poristyj zapolnitel' na osnove tekhnogennykh othodov dlya legkih betonov]. Building and reconstruction. 2022. No. 6(104). Pp. 140–148. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-140-148. (rus)

9. Krylov S.A. Lightweight concretes on porous aggregates [Legkie betony na poristykh zapolnitelyah]. Alleya nauki. 2018. Vol. 2, No. 1(17). Pp. 199–201. (rus)

10. Dmitriev N.S., Narut V.V. The use of a large aggregate to increase the efficiency of concrete [Ispol'zovanie krupnogo zapolnitelya dlya povysheniya effektivnosti betonov]. Days of Student Science. Collection of reports of a scientific and technical conference based on the results of research work by students of the Institute of Construction and Architecture, Moscow, 04-07 March 2019. – Moscow: Moscow State University of Civil Engineering. 2019. Pp. 1099–1101. (rus)

11. Mahmmod L.M.R., Dulaimi A., Bernardo L.F.A., Andrade J.M.d.A. Characteristics of Lightweight Concrete Fabricated with Different Types of Strengthened Lightweight Aggregates. Journal of Composites Science 2024. Vol. 8. 144. DOI: 10.3390/jcs8040144

12. Alfimova N.I., Kalatozi V.V., Karatsupa S.V., Vishnevskaya Y.Y., Sheichenko M.S. Mechanical activation as a way to increase the efficiency of using raw materials of different genesis in building materials science [Mekhanoaktivatsiya kak sposob povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya syr'ya

razlichnogo genezisa v stroitel'nom materialovedenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 6. Pp. 85–89. (rus)

13. Steshenko A.B., Khudyakov A.I., Inozemtsev A.S., Inozemtsev S.S. Structural and thermal insulation foam concrete for individual monolithic housing construction [Konstrukcionno-teploizolyacionnyj penobeton dlya individual'nogo monolitnogo zhilishhnogo stroitel'stva]. Nanotechnologies in Construction: A Scientific Internet-Journal. 2024. Vol. 16. No. 4. Pp. 320–328. DOI:10.15828/2075-8545-2024-16-4-320-328. (rus)

14. Netsvet D.D., Nelyubova V.V., Strokova V.V. Composite binders with mineral additives for non-autoclaved foam concrete [Kompozicionnye vyazhushchie s mineral'nymi dobavkami dlya neavtoklavnykh penobetonov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 4. Pp. 122–131. DOI:10.34031/article\_5cb1e65d077f65.54773394. (rus)

15. Makhortov D.S., Zagorodnyuk L.H., Nasonova V.V., Sumskey D.A. Composite binder using aluminosilicate fillers and organic additives of biological origin [Kompozicionnoe vyazhushchee s ispol'zovaniem alyumosilikatnykh napolnitelej i organicheskikh dobavok biologicheskogo proiskhozhdeniya]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 6. Pp. 8–18. DOI:10.34031/2071-7318-2024-9-6-8-18. (rus)

16. Slavcheva G.S., Buimarova T.K. Physical and climatic resistance of foam concrete based on man-made raw materials [Fiziko-klimaticheskaya stojkost' penobetonov na osnove tekhnogennogo syr'ya]. FEFU: School of Engineering Bulletin. 2020. No. 2(43). Pp. 124–131. DOI:10.24866/2227-6858/2020-2-13 (rus)

17. Zhakanov A.N. Natural porous aggregates of light concrete [Prirodnye poristye zapolniteli legkogo betona]. Science and Technology of Kazakhstan. Pavlodar: Scientific Journal of Toraigyrov University. 2023. Pp. 155–162. DOI: 10.48081/LRRE9213 (rus)

18. Strotsky V.N., Savin V.I., Poletaev V.V. Strength characteristics of lightweight concrete on granular foam ceramic [Prochnostnyye harakteristiki legkogo betona na granulirovannoj penosteklokeramike]. Beton i Zhelezobeton. 2023. No. 2(616). Pp. 14–30. DOI: 10.37538/0005-9889-2023-2(616)-14-30. (rus)

19. Mestnikov A.E., Fedorov V.I. Mathematical planning in the design of lightweight concrete composition [Matematicheskoe planirovanie v proektirovanii sostava legkogo betona]. Modern high technologies. 2019. No. 11-1. Pp. 82–87. DOI: 10.17513/snt.37770. (rus)

20. Matveeva O., Baishev N., Makarov A., Popov A., Pavlyukova I., Grigoriev N. Enhancing lightweight concrete strength through modified zeolite-alkaline porous aggregate: composition optimization and structural application. *Magazine of Civil Engineering*. 2024. No. 1. DOI:10.34910/MCE.125.7.

21. Popov A.L., Fedorov A.V. Binder for the production of lightweight concrete. Patent RF. № 2023105155, 2023

22. Popov A., Yadrikhinsky V., Mestnikov A. Peculiarities of hydration and frost resistance of cement with natural zeolite additive. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. No. 1(117). DOI: 10.34910/MCE.117.11.

23. Khudyakova L.I., Zalutsky A.V., Paleev P.L. The use of ash and slag waste from thermal power plants [Ispol'zovanie zoloshlakovykh othodov teplovykh elektrostancij]. *Technosphere Safety*. XXI Century. 2019. Vol. 4. No. 3(15). Pp. 375–391. DOI:10.21285/2500-1582-2019-3-375-391. (rus)

24. Davidyuk A.N. Structural and thermal insulation concretes on vitreous porous aggregates for effective enclosing structures [Konstrukcionno-teploizolyacionnye betony na steklovidnykh poristykh zapolnitelyah dlya effektivnykh ograzhdayushchih konstrukcij]. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering*. Construction and Architecture. 2008. No. 4(12). Pp. 72–80. (rus)

25. Sapegin G.V., Semey N.S. Selection of the composition of structural and thermal insulation concrete based on granular foam glass using the apparatus of mathematical planning of the experiment [Podbor sostava konstrukcionno-teploizolyacionnogo betona na osnove granulirovannogo penostekla s primeneniem apparata matematicheskogo planirovaniya eksperimenta]. *Engineering journal of Don*. 2019. No. 4(55). (rus)

#### *Information about the authors*

**Petrov, Aital A.** Master student of the Department of Applied Mechanics and Building Materials Science. Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov. 50 Kulakovskiy str., Yakutsk, 677000, Russia.

**Popov, Alexander L.** PhD, Assistant Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Building Materials Science. E-mail: surrukin@gmail.com. Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov. 50 Kulakovskiy str., Yakutsk, 677000, Russia.

**Fedorov, Artem V.** Senior lecturer at the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation. E-mail: crawltrick@gmail.com. Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov. 50 Kulakovskiy str., Yakutsk, 677000, Russia.

*Received 28.10.2024*

#### **Для цитирования:**

Петров А.А., Попов А.Л., Фёдоров А.В. Легкий бетон на пористом заполнителе и композиционном вяжущем с использованием природного цеолита // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 17–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-17-29

#### **For citation:**

Petrov A.A., Popov A.L., Fedorov A.V. Lightweight concrete on a porous aggregate and a composite binder using natural zeolite. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2025. No. 3. Pp. 17–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-17-29