

Статья поступила в редакцию: 09.09.2026

Статья принята к публикации: 15.09.2026

Статья опубликована: 28.09.2026

УДК 691.32+666.97

DOI: 10.32743/UniTech.2026.150.9.23017

## **Анализ растекаемости, средняя плотность и прочностные свойства пенобетона**

**Сатторов Зафар Мурадович**

проф. кафедры

Строительство и инженерия окружающей среды, Ташкентский архитектурно-  
строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: mr.s.zafar@mail.ru

**Отажонов Олмосбек Аскарали угли**

ст. преп

Ферганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

E-mail: olmosbekotajonov@gmail.com

**Умирдинов Ихтиёржон Олимжон угли**

исследователь, Ферганский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Фергана

E-mail: umirdinov93i@gmail.com

**Мадраймов Нийетбай Амангелдиевич**

докторант кафедры

Строительство и инженерия окружающей среды, Ташкентский архитектурно-  
строительный университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: madraymovniko@gmail.com

**Библиографическое описание:** Анализ растекаемости, средняя плотность и прочностные свойства пенобетона // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Сатторов З.М. [и др.]. 2026. 9(150). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23017>

## Analysis of flowability, average density and strength properties of foam concrete

**Sattorov Zafar Muradovich**

*professor of the department Construction and environmental engineering Tashkent University of  
Architecture and Civil Engineering  
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

**Otajonov Olmosbek Askarali ugli**

*senior Lecturer  
Fergana State Technical University  
Republic of Uzbekistan, Fergana*

**Ikhtiyorjon Olimjon Ugli Umirdinov**

*Researcher  
Fergana State Technical University  
Republic of Uzbekistan, Fergana*

**Madraymov Niyetbay Amangeldievich**

*Doctoral student of the department Construction and environmental engineering Tashkent  
University of Architecture and Construction  
Republic of Uzbekistan, Tashkent*

### Аннотация

В данной статье представлен обзор современных научных исследований, посвящённых свойствам, технологии производства и областям применения пенобетона как одного из наиболее перспективных видов ячеистых бетонов. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов, обеспечивающих снижение массы конструкций при сохранении требуемых эксплуатационных характеристик. На основе анализа отечественных и зарубежных публикаций рассмотрены особенности формирования пористой структуры пенобетона, его классификация по плотности и условиям твердения, а также основные физико-механические свойства материала. Особое внимание уделено реологическим характеристикам пенобетонных смесей, включая консистенцию, растекаемость и устойчивость. Установлено, что важную роль в обеспечении стабильности структуры играют состав смеси, водоцементное отношение, тип пенообразователя и применение минеральных и химических добавок. Показано, что пенобетон обладает низкой плотностью, высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами, огнестойкостью и достаточной прочностью, что позволяет эффективно использовать его в строительстве жилых, общественных и промышленных объектов. Рассмотрено влияние золы-уноса, микрокремнезёма, суперпластификаторов и армирующих волокон на эксплуатационные характеристики материала. Установлено, что применение модифицирующих добавок способствует повышению прочности, снижению усадки, улучшению структуры порового пространства и уменьшению водопоглощения. Результаты анализа подтверждают, что пенобетон является перспективным строительным материалом, обеспечивающим рациональное использование местного сырья и промышленных отходов. Дальнейшее совершенствование состава и технологии производства пенобетона позволит повысить его долговечность, энергоэффективность и конкурентоспособность в современном строительстве.

## Abstract

This article presents a comprehensive review of modern scientific studies devoted to the properties, production technology, and application areas of foam concrete as one of the most promising types of cellular concrete. The relevance of the research is associated with the growing demand for energy-efficient and environmentally sustainable construction materials capable of reducing the weight of structures while maintaining the required mechanical and operational performance. Based on an analysis of international and domestic publications, the paper examines the formation of the porous structure of foam concrete, its classification according to density and curing conditions, and its main physical and mechanical characteristics. Particular attention is paid to the rheological properties of foam concrete mixtures, including consistency, flowability, and stability. The review demonstrates that the composition of the mixture, water-to-cement ratio, type of foaming agent, and the use of mineral and chemical admixtures significantly influence the stability and quality of the material.

The study shows that foam concrete possesses several important advantages, including low density, excellent thermal and acoustic insulation properties, fire resistance, and sufficient compressive strength. These characteristics make it suitable for use in residential, public, and industrial construction. The effects of fly ash, silica fume, superplasticizers, and reinforcing fibers on the performance of foam concrete are also discussed. It was found that the incorporation of modifying additives improves strength, reduces drying shrinkage, enhances pore structure, and decreases water absorption. The results of the analysis confirm that foam concrete is a highly promising construction material that enables the efficient utilization of local raw materials and industrial by-products. Further improvements in its composition and production technology will contribute to the development of durable, energy-efficient, and environmentally friendly building materials for modern construction.

**Ключевые слова:** глобальный климат, пенобетон, пеностеклобетон, цемент, дисперсия, высокопористый материал, пористость, водопоглощение, целлюлоза, сурфактант, поверхностная активность.

**Keywords:** global climate, foamed concrete, foam glass concrete, cement, dispersion, highly porous material, porosity, water absorption, cellulose, surfactant, surface activity.

## Введение

Современные исследования в области строительных материалов направлены на разработку более эффективных и энергоэкономичных решений, среди которых особое место занимает пенобетон.

В зависимости от способа формирования пористой структуры ячеистые бетоны подразделяются на две основные группы: газобетон и пенобетон [9]. Пенобетон представляет собой разновидность ячеистого бетона, структура которого формируется за счёт введения в цементную композицию специальных пенообразующих веществ. В результате образуются устойчивые воздушные поры, обеспечивающие снижение плотности материала до значений от 300 до 1800 кг/м<sup>3</sup> [1]. К основным преимуществам пенобетона относятся низкий расход

заполнителей, высокая текучесть смеси, значительная пористость, хорошие теплоизоляционные свойства, огнестойкость, малый удельный вес, способность эффективно поглощать воздушный шум и достаточная прочность при сжатии.

По условиям твердения ячеистые бетоны подразделяются на автоклавные и неавтоклавные. Автоклавная технология предусматривает обработку материала при повышенном давлении и температуре, что обеспечивает формирование специфических эксплуатационных характеристик. Кроме того, пенобетон классифицируется по средней плотности [2]. Материалы плотностью 300–600 кг/м<sup>3</sup> используются преимущественно в качестве теплоизоляции и для заполнения пустот. Пенобетоны плотностью 600–1200 кг/м<sup>3</sup> применяются для изготовления несущих строительных элементов: стеновых блоков, наружных панелей, перегородок и различных тепло- и звукоизоляционных изделий. Более плотные разновидности пенобетона (1200–1600 кг/м<sup>3</sup>) могут использоваться при изготовлении отдельных несущих конструкций [2, 15].

Согласно исследованиям, проведённым Джалалом и соавторами [13], пенобетон обладает достаточной прочностью для заполнения полостей и пустот различной глубины и протяжённости в условиях индустриального строительства без необходимости вибрационного уплотнения. Материал обеспечивает высокую скорость выполнения работ, практически не подвержен осадке после укладки, обладает эффективными теплоизоляционными свойствами [17], высокой морозостойкостью и хорошей огнестойкостью. В настоящее время пенобетон широко применяется при устройстве тепло- и звукоизоляции полов, теплоизоляции плоских и скатных кровель, заполнении подземных полостей, производстве строительных блоков и стеновых панелей, возведении малоэтажных монолитных зданий, строительстве дорожных оснований, усилении опор мостов и стабилизации грунтов [3, 4, 12, 18]. Несмотря на многочисленные преимущества, распространённость пенобетона в мировой строительной практике остаётся сравнительно невысокой. По имеющимся данным, его доля применения составляет около 5,6 % в Северной Америке, 5,6 % в Австралии, 33,3 % в странах Европы и 5,6 % в Африке. Подобная ситуация свидетельствует о том, что потенциал данного материала ещё не реализован в полной мере. Основными причинами являются недостаточная информированность специалистов о его возможностях, ограниченное доверие к материалу и отсутствие необходимых технологических решений для его широкомасштабного внедрения [18].

### Материалы и методы

*Свойства пенобетона.* Реологические характеристики пенобетонной смеси оцениваются по показателям консистенции и устойчивости. Для их определения применяются стандартные методы испытаний с использованием конуса Марша, расплавленного конуса и различных типов вискозиметров. Согласно результатам исследований, пенобетонные смеси с временем истечения менее 20 секунд и показателем расплава в пределах 40–60 % относятся к смесям нормальной консистенции [14].

Введение пены в цементную систему приводит к заметному снижению текучести смеси. Это объясняется увеличением внутренних связей между компонентами и уменьшением удельного веса материала. Использование суперпластификаторов, напротив, способствует повышению подвижности и улучшению технологичности смеси [10].

Установлено, что увеличение водоцементного отношения положительно влияет на консистенцию пенобетона. Однако чрезмерное содержание воды вызывает расслоение смеси и ухудшает её однородность. Исследования свежеприготовленного пенобетона, в котором часть цемента заменялась молотым гранулированным доменным шлаком, а мелкий заполнитель — золой-уносом, показали, что сверхтонкий доменный шлак практически не влияет на удобоукладываемость смеси. В то же время введение золы-уноса приводит к её загущению вследствие увеличения количества мелкодисперсных частиц и возрастания потребности в воде [8]. Одним из факторов, определяющих консистенцию смеси, является плотность заполнителя. Использование заполнителей с пониженной плотностью уменьшает подвижность смеси, однако данный эффект может быть частично компенсирован введением золы-уноса [9].

*Устойчивость пенобетонной смеси.* Устойчивой считается такая пенобетонная смесь, фактическая плотность которой соответствует проектной плотности, а также отсутствуют признаки водоотделения и сегрегации компонентов. Оценка устойчивости осуществляется с использованием поликарбонатных цилиндров глубиной 500 мм и внутренним диаметром 75 мм, стенки которых покрываются полиэтиленовой плёнкой. В течение 24 часов фиксируется изменение высоты образца. Исследования показали, что при плотности пенобетона выше 400 кг/м<sup>3</sup> применение 100 % портландцемента обеспечивает получение устойчивой смеси. Для составов плотностью менее 400 кг/м<sup>3</sup> повышение устойчивости достигается заменой 5–10 % массы цемента кальций-сульфоалюминатным компонентом [5]. Существенное влияние на устойчивость оказывает консистенция базового раствора, в который вводится пена. При показателе распада около 45 % смесь считается оптимально сбалансированной и устойчивой. Добавление золы-уноса требует увеличения отношения «вода – твёрдая фаза» для сохранения стабильности структуры. Введение суперпластификаторов позволяет снизить водоцементное отношение ниже 0,3 и повысить устойчивость смеси примерно на 43 % [5].

Даже небольшие концентрации пенообразователей оказывают положительное влияние на стабильность пенобетонной системы. Адгезионные силы между твёрдыми частицами и воздушными пузырьками повышают жёсткость структуры. Однако в процессе перемешивания возможно разрушение части воздушных пор, что отрицательно сказывается на устойчивости смеси. Данный эффект уменьшается при увеличении отношения воды к твёрдым компонентам [16].

Для оценки устойчивости пенобетона исследователями предложены различные методы, среди которых наиболее распространены:

1. сравнение фактической плотности свежеприготовленного пенобетона с расчётной плотностью;
2. анализ различий между расчётным и фактическим водоцементным отношением с допустимым отклонением около 2 %.

Исследования Jones и соавторов [5] показали, что пенобетоны плотностью менее 500 кг/м<sup>3</sup> более склонны к потере устойчивости. Подъёмная сила воздушных пузырьков прямо пропорциональна их размеру и возрастает при снижении плотности смеси. Если эта сила превышает сопротивление цементной матрицы, пузырьки начинают вытеснять твёрдые частицы и перемещаться к поверхности, что приводит к нарушению структуры материала.

Увеличение размеров пузырьков и уменьшение объёма твёрдой фазы вызывают истончение перегородок между порами. В результате внутреннее давление из более мелких пузырьков передаётся крупным, что способствует их дальнейшему росту и изменению поровой структуры материала. Было установлено, что устойчивые низкоплотные пенобетоны можно получить путём частичной замены портландцемента кальций-сульфоалюминатными компонентами.

Согласно исследованиям Cong и Bing [11], введение микрокремнезёма способствует формированию более равномерной и закрытой поровой структуры, что положительно отражается на теплоизоляционных свойствах и прочности материала. Добавление гашёной извести приводит к увеличению плотности и прочности пенобетона, однако несколько снижает устойчивость пены.

Qiao и соавторы [5] исследовали возможность применения поверхностно-активных веществ типа Gemini в качестве эффективных пенообразователей для бетона. По сравнению с традиционными ПАВ они обеспечивают более высокую устойчивость пены, улучшенное вовлечение воздуха и повышенную поверхностную активность. Наилучшие результаты были получены при использовании Gemini-сурфактантов, модифицированных сульфатными, фосфатными и сульфонатными группами.

Влияние различных поверхностно-активных веществ на свойства пенобетонных смесей также было изучено Samson [6]. В исследовании были рассмотрены такие пенообразователи, как цетилтриметиламмоний бромид, AER Sika, цетримид, Microair, Neopor и Hostapur OSB (натриевая соль альфа-олефинсульфата). Результаты показали, что наиболее эффективным оказался Hostapur OSB, за которым следуют цетилтриметиламмоний бромид и цетримид. Именно эти добавки обеспечили оптимальное сочетание прочности при сжатии, плотности и коэффициента теплопроводности пенобетона.

Siva и соавторы [7] разработали экологически безопасный пенообразователь для цементных композитов на основе плодов мыльного ореха (*Sapindus mukorossi*). Перикарпий этого растения был предложен в качестве альтернативы синтетическим пенообразующим веществам. Проведённые испытания показали, что полученная пена соответствует действующим требованиям по своим характеристикам. Более того, раствор, приготовленный из предварительно замоченного и нагретого до 80 °С сырья, продемонстрировал лучшие показатели по сравнению с пеной, полученной без термической обработки.

**Таблица 1.**

**Показатели устойчивости, расплава и прочности исследованных пенобетонных смесей [4]**

| Названия смесей | Стабильность | Растекаемость, мм | Средняя плотность, | Прочность на сжатие образца через 14 дней, МПа |
|-----------------|--------------|-------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| ILT-P2,36 -0,46 | 1            | 180               | 1295               | 2,98                                           |
| ILT-P2,36 -0,48 | 1,03         | 217               | 1345               | 3,83                                           |
| ILT-P2,36 -0,50 | 1,04         | 249               | 1350               | 4,06                                           |
| ILT-P2,36 -0,52 | 0,97         | 272               | 1259               | 3,31                                           |
| ILT-P2,36 -0,54 | 0,99         | 326               | 1297               | 3,05                                           |
| ILT-P1,18-0,48  | 1,02         | 174               | 1330               | 3,67                                           |

| Названия смесей | Стабильность | Растекаемость, мм | Средняя плотность, | Прочность на сжатие образца через 14 дней, МПа |
|-----------------|--------------|-------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| ILT-PI,18 -0,50 | 1,03         | 199               | 1342               | 3,94                                           |
| ILT-P1,18-0,52  | 1,04         | 224               | 1349               | 3,98                                           |
| ILT-P1,18-0,54  | 0,97         | 238               | 1259               | 3,31                                           |
| ILT-P1,18-0,56  | 0,99         | 267               | 1287               | 2,97                                           |
| ILT-P0,90 -0,50 | 0,99         | 208               | 1295               | 3,77                                           |
| ILT-P0,90 -0,52 | 1,02         | 214               | 1330               | 3,89                                           |
| ILT-P0,90 -0,54 | 1,01         | 225               | 1305               | 4,39                                           |
| ILT-P0,90 -0,56 | 1,03         | 232               | 1345               | 3,65                                           |
| ILT-P0,90 -0,58 | 0,99         | 270               | 1290               | 3,19                                           |
| ILT-P0,60 -0,52 | 1,03         | 194               | 1339               | 4,27                                           |
| ILT-P0,60 -0,54 | 1,04         | 203               | 1352               | 4,42                                           |
| ILT-P0,60 -0,56 | 1,02         | 210               | 1318               | 4,52                                           |
| ILT-P0,60 -0,58 | 1,03         | 224               | 1348               | 4,51                                           |
| ILT-P0,60 -0,60 | 1,03         | 245               | 1308               | 4,38                                           |

*Примечание: ILT-P — название экспериментального образца; 2,36 — размер частиц наполнителя; 0,46 — доля наполнителя в смеси.*

Установлено, что применение нанокремнезёма совместно с амфотерными поверхностно-активными веществами бетаинового типа и органическим стабилизатором на основе гидроксипропилметилцеллюлозы способствует увеличению срока существования пены и формированию более мелких и равномерных пор. Добавление гидроксипропилметилцеллюлозы практически не изменяет размеры пор, однако приводит к увеличению толщины плёнки, окружающей пузырьки воздуха. Введение нанокремнезёма, напротив, постепенно уменьшает размеры пузырьков.

Механизм стабилизации пены объясняется взаимодействием между компонентами системы. Между гидрофобными группами поверхностно-активного вещества и гидроксипропилметилцеллюлозы действуют силы Ван-дер-Ваальса, тогда как между гидрофильными группами ПАВ и частицами нанокремнезёма возникают кулоновские силы притяжения. Совместное действие этих факторов обеспечивает устойчивость воздушно-пористой структуры [6]. Вместе с тем введение стабилизированной пены приводит к снижению способности пор к дальнейшему диспергированию [7].

*Растекаемость пенобетонной смеси.* Подвижность и растекаемость пенобетона обычно оцениваются визуально или с использованием вискозиметра Суттарда. Традиционные методы определения удобоукладываемости не всегда подходят для смесей с низкой плотностью. В связи с этим Brewer [16] предложил использовать метод расплава для лёгких бетонов. Согласно данной методике, образец помещается в цилиндр длиной 150 мм и диаметром 75 мм, открытый с обеих сторон. После поднятия цилиндра измеряют диаметры расплава смеси в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вычисляют их среднее значение. Оптимальный показатель расплава должен составлять около 5 мм. Для пенобетонов на основе цементно-песчаного раствора рекомендуемая величина расплава находится в пределах 85–125 мм, тогда как для смесей с добавлением золы-уноса этот показатель может

достигать 115–140 мм. Увеличение объёма пены сопровождается повышением вязкости смеси, вследствие чего для сохранения требуемой подвижности необходимо дополнительное количество воды. Отмечается также, что использование дроблёного карьерного песка обеспечивает лучшую удобоукладываемость при меньшем расходе воды по сравнению со смесями, содержащими золошлаковые материалы [10].

*Физические свойства пенобетона.* К основным физическим характеристикам, определяющим эксплуатационные свойства пенобетона, относятся усадка при высыхании, структура воздушных пор, водопоглощение и водопроницаемость.

*Усадка при высыхании.* Из-за отсутствия крупного заполнителя пенобетон характеризуется значительно большей усадкой по сравнению с тяжёлым бетоном. По данным исследований, величина усадки может быть примерно в десять раз выше, чем у традиционных бетонных материалов [9]. Эффективным способом снижения усадочных деформаций является введение армирующих волокон. Волокна удерживают часть влаги внутри структуры материала и замедляют её испарение, что способствует уменьшению усадки. При этом степень снижения усадочных деформаций напрямую зависит от содержания волокон в смеси: чем выше их количество, тем меньше величина усадки [7].

Сравнительные исследования пенобетонов, армированных полипропиленовыми, стеклянными, стальными, конопляными и пальмовыми волокнами, показали, что наилучшие результаты обеспечивают стеклянные и полипропиленовые волокна благодаря их высокой способности удерживать влагу. Использование стальных волокон оказалось менее эффективным вследствие их гидрофильной природы и значительной собственной массы [11].

*Водопоглощение и проницаемость.* Способность пенобетона поглощать воду тесно связана с объёмом и структурой порового пространства. Увеличение количества пор приводит к ускорению проникновения воды внутрь материала. Особенно интенсивное водопоглощение наблюдается при наличии сообщающихся поровых каналов. На данный показатель влияет не только объём пор, но и количество цементного теста в структуре материала. С увеличением содержания вяжущей пасты водопоглощение также возрастает [6]. Исследования показали, что основной объём воды поглощается пенобетоном в течение первых шести часов после контакта с влагой. При этом значения водопоглощения, определённые через 6 и 48 часов, практически не отличаются друг от друга. Для снижения водопоглощения применяются гидрофобизирующие добавки, такие как стеарат кальция, триметилсиланолат калия и полимеры на основе силоксанов. Увеличение содержания таких добавок уменьшает силы сцепления между поверхностью пор и молекулами воды, что способствует снижению влажностного насыщения материала и повышению коэффициента сохранения прочности [3]. Nambiar и соавторы [12] установили, что капиллярное водопоглощение определяется не только количеством пор, но и степенью их взаимосвязи. При преобладании открытых сообщающихся пор наблюдается интенсивное проникновение воды, тогда как наличие большого количества замкнутых пор существенно ограничивает этот процесс. Кроме того, было отмечено, что увеличение доли золы-уноса при замене песка способствует росту водопоглощения при одинаковом объёме пены.

## Результаты и обсуждение

Вид и количество золы оказывают значительно меньшее влияние на данный показатель. Установлено, что объём воды, поглощаемой пенобетоном, примерно в два раза превышает аналогичный показатель для традиционного бетона. При этом смеси, содержащие золу-унос, обладают меньшей водопроницаемостью по сравнению с составами, изготовленными с использованием пылевидной топливной золы [18]. Применение заполнителей с низкой пористостью может приводить к образованию межфазных пустот и микротрещин, что способствует увеличению проницаемости материала. Использование предварительно высушенных заполнителей позволяет частично поглощать воду затворения, снижая фактическое водоцементное отношение и улучшая долговечность бетона. Для низкоплотных пенобетонов хорошая морозостойкость была достигнута при условии, что начальное водопоглощение не превышало 16 % [7].

## Заключение

Одной из актуальных задач современного строительства является снижение массы строительных конструкций при одновременном повышении их энергоэффективности. В ходе данного исследования был выполнен анализ научных публикаций, посвящённых составу, технологии получения, физико-механическим свойствам и особенностям применения пенобетона. Проведённый обзор показал, что пенобетон относится к числу наиболее перспективных материалов для современного строительства. Результаты анализа показали, что пенобетон обладает рядом важных преимуществ, таких как низкая плотность, высокие теплоизоляционные свойства, огнестойкость и технологичность производства. Благодаря этим качествам материал может эффективно использоваться при возведении жилых, общественных и промышленных зданий. Вместе с тем для пенобетона характерны повышенная усадка и сравнительно высокое водопоглощение, что требует применения армирующих волокон, гидрофобизирующих и модифицирующих добавок. Пенобетон является перспективным строительным материалом, обеспечивающим рациональное использование местного сырья и промышленных отходов. Дальнейшие исследования, направленные на совершенствование его структуры и свойств, будут способствовать созданию долговечных, энергоэффективных и экологически безопасных строительных материалов нового поколения.

## Список литературы

1. Akhund M.A., Khoso A.R., Pathan A.A., Memon U., Siddiqui F.H. Influence of biomass aggregate on strength of foam concrete // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2017. – Т. 8.
2. Ali Hamad J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete // International Journal of Materials Science and Engineering. – 2014. – Т. 2, № 2. – P. 152–157.
3. Balamurugan G., Chockalingam K., Chidambaram M., Aravindh Kumar M., Balasundaram M. Experimental study on light weight foam concrete bricks // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2017. – P. 677–686.

4. Gambhir M.L., Jamwal N. Building Materials, Products, Properties & Systems. – New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2011.
5. Hadipramana J., Samad A.A. A., Zaidi A.M. A., Mohammad N., Riza F.V. Effect of uncontrolled burning rice husk ash in foamed concrete // Advanced Materials Research. – 2017. – Т. 626. – P. 769–775. – DOI: 10.4028/.
6. Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P., Nguyen T., Kashani A. van Deventer J.S. J. Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: the impact of mix design // Materials & Design. – 2017. – Т. 130. – P. 381–391.
7. Ikponmwosa E., Fapohunda C., Kolajo O., Eyo O. Structural behaviour of bamboo-reinforced foamed concrete slab containing polyvinyl wastes (PW) as partial replacement of fine aggregate // Journal of King Saud University – Engineering Sciences. – 2017. – Т. 29. – P. 348–355. – DOI: 10.1016/j.jksues.2015.06.005.
8. Kearsley E.P., Wainwright P.J. The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete // Cement and Concrete Research. – 2001. – Т. 31, № 1. – P. 105–112.
9. Lim S.K., Tan C.S., Zhao X., Ling T.C. Strength and toughness of lightweight foamed concrete with different sand grading // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2014. – Т. 19. – P. 2191–2197. – DOI: 10.1007/s12205-014-0097-y.
10. Lim S.K., Tan C.S., Li B., Ling T.C., Hossain M.U., Poon C.S. Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete // Construction and Building Materials. – 2017. – Т. 151. – P. 441–448.
11. Ramamurthy K., Nambiar E.K. K., Ranjani G.I. S. A classification of studies on properties of foam concrete // Cement and Concrete Composites. – 2009. – Т. 31. – P. 388–396. – DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006.
12. Richard T., Dobogai J., Gerhardt T., Young W. Cellular concrete – a potential load-bearing insulation for cryogenic applications // IEEE Transactions on Magnetics. – 1975. – Т. 11, № 2. – P. 500–503.
13. Saman M., Sharipudin S.S., Ridzuan A.R. M. Performance of foamed concrete with waste paper sludge ash (WPSA) and fine recycled concrete aggregate (FRCA) contents // International Sustainable Civil Engineering Journal. – 2012. – Т. 1. – P. 19–27.
14. Valore R.C. Cellular concrete part 1 composition and methods of production // ACI Journal. – 1954. – Т. 50. – P. 773–796.
15. Yuvaraj S., Karthik S., Naveen N., Ridhu Pharan S.S., Sargunam P., Sethunarayanan S., Vyshnav C. Experimental research on foam concrete with partial replacement of sand by m-sand // IJATES. – 2015. – Т. 3.
16. Zhao X., Lim S.K., Tan C.S., Li B., Ling T.C., Huang R., Wang Q. Properties of foamed mortar prepared with granulated blast-furnace slag // Materials. – 2015. – Т. 8, № 2. – P. 462–473. – DOI: 10.3390/ma8020462.

## References

1. Adipramana J., Samad A.A.A., Zaidi A.M.A., Mohammad N., Riza F.W.J. [Hadipramana, A.A.A. Samad, A.M.A. Zaidi, N. Mohammad, F.V. Riza, Effect of uncontrolled burning rice husk ash in foamed concrete, *Adv. Mater. Res.* 626 (2012) 769–775] // *Adv. Mater. Res.* – 2012. – Vol. 626. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.626.769. (In Russ.)
2. Амран Ю.Х.М., Фарзадния Н., Али А.А.А.У.Н.М. [Amran, N. Farzadnia, A.A.A. Ali, Properties and applications of foamed concrete; a review, *Constr. Build. Mater.* 101 (2015) 990–1005] / // *Constr. Build. Mater.* – 2015. – Vol. 101. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112 – URL: <https://doi> (дата обращения: 19.09.2026). (In Russ.)
3. Dzhalal M., Tanvir A., Dzhagdish K., Akhmed F.M. [Jalal, A. Tanveer, K. Jagdeesh, F. Ahmed, Foam concrete, *Int. J. Civ. Eng. Res.* 8 (2017) 2278–3652] // *Int. J. Civ. Eng. Res.* – 2017. – Vol. 8 – URL: <http://www.ripublication.com> (дата обращения: 19.09.2026). (In Russ.)
4. Лим С.К., Тан К.С., Чжао К., Линг Т.К.С.К. [Lim, C.S. Tan, X. Zhao, T.C. Ling, Strength and toughness of lightweight foamed concrete with different sand grading, *KSCE J. Civ. Eng.* 19 (2014) 2191–2197] // *KSCE Journal of Civil Engineering.* – 2014. – Vol. 19. – DOI: 10.1007/s12205-014-0097-у. (In Russ.)
5. Саман М., Шарипудин С.С., Ридзуан А.Р.М.М. [Saman, S.S. Sharipudin, A.R.M. Ridzuan, Performance of foamed concrete with waste paper sludge ash (WPSA) and fine recycled concrete aggregate (FRCA) contents, *Int. Sustain. Civ. Eng. J.* 1 (2012) 19–27] // *Int. Sustain. Civ. Eng. J.* – 2012. – Vol. 1. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.626.376 – URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 19.09.2026). (In Russ.)
6. A. Hajimohammadi, T. Ngo, P. Mendis, T. Nguyen, A. Kashani, Deventer., Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: the impact of mix design, *Mater. Des.* 130 (2017) 381–391.
7. E.P. Kearsley, P.J. Wainwright, The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, *Cem. Concr. Res.* 31 (1) (2001) 105–112. 796 A. Raj et al. / *Construction and Building Materials* 221 (2019) 787–799.
8. G. Balamurugan, K. Chockalingam, M. Chidambaram, M. Aravindha Kumar, M. Balasundaram, Experimental study on light weight foam concrete bricks, *Int. Res. J. Eng. Technol.* (2017) 677–686. [www.irjet.net](http://www.irjet.net).
9. Gambhir M.L., Jamval N.M.L. Gambhir, NehaJamval, *Building Materials, Products, Properties & Systems*, Tata Mcgraw hill education private limited. – New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2011.
10. Ikponmwosa E., Fapohunda C., Kolajo O., Eyo O.E. Ikponmwosa, C. Fapohunda, O. Kolajo, O. Eyo, Structural behaviour of bamboo-reinforced foamed concrete slab containing polyvinyl wastes (PW) as partial replacement of fine aggregate, *J. King Saud Univ. – Eng. Sci.* 29 (2017) 348–355 // *J. King Saud Univ.* – 2017. – Vol. 29. – DOI: 10.1016/j.jksues.2015.06.005.
11. J. Ali, Hamad, Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete, *Int. J. Mater. Sci. Eng.* 2 (2) (2014) 152–157.

12. Lim S.K., Tan C.S., Li B., Ling T.C., Hossain M.U., Poon C.S.S.K. Lim, C.S. Tan, B. Li, T.C. Ling, M.U. Hossain, C.S. Poon, Utilizing high volumes quarry wastes in the production of lightweight foamed concrete, *Constr. Build. Mater.* 151 (2017) 441–448, [j.conbuildmat.2017.06.091](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.091) // *Constr. Build. Mater.* – 2017. – Vol. 151. – DOI: 10.1016/.
13. M.A. Akhund, A.R. Khoso, A.A. Pathan, U. Memon, F.H. Siddiqui, Influence of biomass aggregate on strength of foam concrete, *Int. J. Civ. Eng. Technol.* 8 (2017).
14. R.C. Valore, Cellular concrete part 1 composition and methods of production, *ACI J.* 50 (1954) 773–796.
15. Ramamurthy K., Nambiar E.K.K., Ranjani G.I.S.K. Ramamurthy, E.K.K. Nambiar, G.I.S. Ranjani, Cement and concrete composites A classification of studies on properties of foam concrete, *Cem. Concr. Compos.* 31 (2009) 388–396, [cemconcomp.2009.04.006](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006) // *Cement and Concrete Composites.* – 2009. – Vol. 31. – DOI: 10.1016/j.
16. S. Yuvaraj, S. Karthik, N. Naveen, S.S. RidhuPharan, P. Sargunam, S. Sethunarayanan, C. Vyshnav, Experimental research on foam concrete with partial replacement of sand by msand, *IJATES* 3 (2015).
17. T. Richard, J. Dobogai, T. Gerhardt, W. Young, Cellular concrete-a potential load-bearing insulation for cryogenic applications, *IEEE Trans. Magn.* 11 (2) (1975) 500–503.
18. Zhao X., Lim S.K., Tan C.S., Li B., Ling T.C., Huang R., Wang Q.X. Zhao, S.K. Lim, C.S. Tan, B. Li, T.C. Ling, R. Huang, Q. Wang, Properties of foamed mortar prepared with granulated blast-furnace slag, *Materials (Basel)* 8 (2015) 462–473 // *Materials (Basel).* – 2015. – Vol. 8, No. 2. – DOI: 10.3390/ma8020462.