

Научная статья

УДК 691.327.33

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-3/118-127>

Технические факторы обеспечения устойчивости пенобетонной смеси

Роман Сергеевич Федюк^{1,✉}, Андрей Иванович Савенков²¹ Дальневосточный федеральный университет,

Владивосток, Российская Федерация,

² Ангарский государственный технический университет,

Ангарск, Российская Федерация

✉ roman44@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается устойчивость трёхфазных пен и связь механизмов разрушения с особенностями пенной структуры. Необходимой технологической задачей в таком случае будет обеспечение в пенобетонной смеси гидростатического равновесия в каналах Плато – Гиббса. В технологии лёгких пенобетонов предложено немало методов стабилизации структуры – введение армирующих элементов, предварительная гидратация цемента, применение микронаполнителей и уменьшение дисперсности твёрдой фазы. Для обеспечения необходимой устойчивости смеси требуется комплекс управляющих воздействий и оптимального сочетания входных параметров, от которых зависит седиментационная устойчивость трёхфазной коллоидной системы пенобетонного раствора и качество конечного продукта.

Ключевые слова: пенобетон, стабилизация пен, трёхфазные системы, гидростатическое равновесие, седиментация, коалесценция

Для цитирования: Федюк Р.С., Савенков А.И. Технические факторы обеспечения устойчивости пенобетонной смеси // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 3(64). С. 118–127.

Original article

Technical factors for ensuring the stability of the foam concrete mix

Roman S. Fediuk^{1,✉}, Andrey I. Savenkov²¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation,² Angarsk State Technical University, Angarsk, Russian Federation

✉ roman44@yandex.ru

Abstract. This article examines the stability of three-phase foams and the relationship between the mechanisms of destruction and the features of the foam structure. In this case, the necessary technological task will be to ensure hydrostatic equilibrium in the Plateau – Gibbs channels in the foam concrete mixture. In the technology of lightweight foam concrete, many methods of structure stabilization have been proposed – the introduction of reinforcing elements, pre-hydration of cement, the use of micro-fillers and reduction of the dispersion of the solid phase. To ensure the necessary stability of the mixture, a set of control actions and an optimal combination of input parameters are required, on which the sedimentation stability of the technophase colloidal foam mortar system and the quality of the final product depend.

Keywords: foam concrete, foam stabilization, three-phase systems, hydrostatic equilibrium, sedimentation, coalescence

For citation: Fediuk R.S., Savenkov A.I. Technical factors for ensuring the stability of the foam concrete mix. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 3(64), pp. 118–127. (In Russ.).

Введение

В основе технологии пенобетонов естественного твердения лежит поризация цементно-песчаного раствора, технически осуществляемого его массопереносом на пенную сетку в пенобетоносмесителе [1]. Центральным звеном в технологической цепочке производства качественных пенобетонных изделий является обеспечение термодинамической устойчивости пеносмеси, поскольку от стабильности структуры зависят прочность, долговечность и эксплуатационные характеристики готовых изделий [2].

Формирование пористой структуры пенобетона определяется рядом взаимосвязанных процессов, начиная от стадии смешивания компонентов и заканчивая стадиями схватывания и твердения [3]. Хотя технология производства пенобетонов на первый взгляд кажется несложной [4–5], до сих пор подбор состава пенобетонных смесей с заданными свойствами остаётся технологической проблемой.

М. Ши с коллегами [6] изучали механические и энергопоглощающие характеристики пенобетона при различных испытаниях на квазистатическое сжатие. Й. Жанг с соавторами [7] готовили сульфоалюминатный цементный углекислотный пенобетон с целью применения для изоляции угольных шахт. Й. Сан [8] с коллегами применяли напыляемый 3D-печатный пенобетон для снятия концентрации напряжений. Р. Нандакришна [9] с соавторами повысили тепловой комфорт и долговечность пенобетонных блоков за счёт модификации поверхности. Африканские и американские учёные [10] разработали пенобетон с минеральными добавками, исследовав все параметры: от микроструктуры до физико-механических свойств, удобоукладываемости и долговечности. На следующем этапе этот интернациональный коллектив [11] изучил характеристики пенобетона, содержащего относительно низкотемпературную обожжённую глину, в качестве частичной замены портландцемента. Китайские исследователи [12] за проектировали и смоделировали теплоизоляцию пенобетона, модифицированного нано-SiO₂, а также вакуумные теплоизоляционные панели для утепления наружных стен зданий. Л.Н. Алексейко и А.В. Таскин [13, 14] эффективно утилизировали отходы теплоэлектроэнергетики для модифицирования строительных цементных композитов. Коллектив под руководством Н.А. Коноваловой [15, 16] для этой же цели применял природные пуццолановые материалы. Е.В. Левкина с коллегами [17–19] изучили возможности для развития малого бизнеса, в том числе и в сфере производства конструкционных и изоляционных пенобетонных блоков для малоэтажного строительства.

На производстве при малейших изменениях характеристик сырья специалистам приходится проводить множество трудоёмких экспериментов, чтобы определить состав, который позволит получить материал нужных характеристик [20]. Это свидетельствует о том, что накопленные знания пока не позволяют эффективно контролировать качество пенобетонов и нуждаются в дальнейшем развитии.

Цель данной статьи – анализ причин неустойчивости пеносмеси и предложения по обеспечению её устойчивости.

Результаты и дискуссия

После того как вяжущее вещество вступает в контакт с затворителем и вокруг частиц цемента начинают образовываться сольватные оболочки, в пенобетонной смеси запускается процесс физико-химического взаимодействия клинкерных минералов с водой. В процессе перемешивания происходит наложение внешнего механического воздействия на тепловую энергию, которая выделяется в ходе химических реакций. В формирующейся структуре возникает сложное и разнонаправленное движение энергии и массы. Это влияет как на толщину и прочность пенных плёнок, так и на скорость образования упруго-вязких связей между компонентами жидкой и твёрдой фазы [21].

Пена, как и любая грубодисперсная высококонцентрированная система, является неустойчивой. Эта неустойчивость объясняется наличием избытка поверхностной энергии, которая пропорциональна поверхности раздела между жидкостью и газом. Поэтому энергия та-

кой системы всегда уменьшается. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное значение свободной энергии, при котором система станет равновесной.

Очень важным технологическим условием при укладке монолитного пенобетона на начальной стадии твердения является агрегативная устойчивость пеносмеси. В начале процесса производства пенобетона смесь представляет собой систему из трёх взаимодействующих континуумов, которые взаимодействуют между собой: газообразного, жидкого и твёрдого [4, 5, 22, 23]. Если в смеси высокое водотвёрдое отношение, то смесь может быть неустойчивой и в процессе её приготовления возможно разделение на отдельные фазы. Это связано с наличием в смеси свободной жидкости (цементного молочка), которая играет важную роль в процессе производства. Под действием гравитационного синерезиса свободная жидкость стекает по случайным разветвлённым каналам, которые образуются в смеси [5]. Чем больше происходит истечение, тем быстрее смесь разделяется на фазы. Утрату стабильности смеси и разрушение структуры лёгкого пенобетона можно рассматривать как на уровне ячейка–перегородка, так и в масштабе всего массива. Изучение последнего аспекта позволило бы определить теоретическую скорость расслоения пенобетона и уточнить влияние на неё различных факторов.

После завершения перемешивания важнейшими внешними силами, действующими на пенобетонную смесь, становятся гравитационные. Компоненты дисперсной системы, цементный раствор и воздушные ячейки, по плотности различаются на два порядка, поэтому данная коллоидная система термодинамически находится в седиментационно неустойчивом, сложном напряжённом состоянии, что может вызвать разнонаправленное движение фаз. Раствор матрицы, состоящий из жидкости и частиц зернистой фазы, стремится к оседанию, в то время как элементы газовой фазы, напротив, стремятся к всплытию.

В первоначальный период после укладки необходимо предотвратить остаточное течение смеси (седиментацию), вызванное избыточной подвижностью. Истечение жидкости из пенобетонной смеси происходит по каналам Плато под воздействием сил тяжести и капиллярных сил всасывания. В межпоровых перегородках и вертикальных свободных полостях эти силы действуют одновременно. В горизонтальных свободных перегородках гравитационное влияние мало, и поэтому в них процессы утончения и разрушения происходят под воздействием только капиллярных сил, величина которых соответствует разности кривизны краевых и центрального участков межпорового пространства. В подвижных суспензиях минеральных веществ самопроизвольное оседание столба седиментации может происходить быстрее или медленнее. Всё зависит от агрегативной устойчивости системы, которая определяется подвижностью пеносмеси. Эта подвижность регулируется помимо содержания цемента в матрице, главным образом либо водотвёрдым отношением (В/Т), либо пластификацией смеси. Поскольку разрушение пены происходит в результате различных процессов: истечения жидкости, диффузии газа между пузырьками и разрыва индивидуальных плёнок внутри пены, то преобладание того или иного процесса зависит от многих факторов. Избыточно подвижные пены с относительно толстыми жидкими прослойками, в первую очередь, разрушаются в результате истечения раствора, которое далее приводит к быстрому утончению плёнок. Только после этого в них начинают преобладать диффузия газа и разрыв межпоровых перегородок.

В присутствии ультрадисперсного заполнителя возможна стабилизация дисперсных систем с помощью твёрдых частиц, которая обеспечивается несколькими факторами, такими как адсорбция частиц-стабилизаторов на поверхности раздела жидкость/газ и образование плотного межфазного слоя, капиллярные явления в плёнке пены, стабилизированной твёрдыми частицами, электростатическое или стерическое отталкивание между адсорбционными слоями, упругость и механическая прочность сетки-структуры, образуемой твёрдыми частицами в дисперсионной среде.

Скорость истечения зависит также от других факторов. Помимо вида ПАВ и его концентрации, большое влияние оказывает технология образования пены, влияние которой можно сформулировать как скорость формирования адсорбционного слоя. Синерезис жидкости – это синергетический процесс, связанный с её переходом через систему разветвляющихся

каналов. При нарушении гидростатического равновесия в отдельном канале он становится заполненным жидкостью и своей гравитационной составляющей приводит к заполнению и соседний канал. Постепенно формируется бесконечный кластер, и при его окончательном заполнении раствор начинает стекать на дно формы [2]. На время заполнения бесконечного кластера влияет высота столба пены: чем он больше, тем раньше наступает потеря устойчивости. Таким образом, начало стока жидкости – это точка перколяции, спонтанный процесс. С увеличением времени мощность перколяционного кластера становится больше, то есть образуются новые параллельные линии стока, и процесс синерезиса ускоряется. Истечение свободной жидкости по бесконечному кластеру приводит к утонению перемычек и образованию фронта коаласценции [24].

Гравитационные силы инициируют истечение жидкости через всю сеть каналов Плато, но оказывают незначительное влияние на переток жидкости из плёнок к этим каналам. Этот переток в основном обусловлен капиллярными силами и не зависит от ориентации перегородки. В зависимости от стабильности пены, истечение жидкости может происходить в результате выделения цементного раствора и отделения жидкости стенками лопнувших пузырьков. В стабильных пенах плёнки обычно разрываются только после того, как они достигнут определённой толщины в результате предварительного истечения жидкости. Объём жидкости, заключённый в тонких перегородках, очень мал, поэтому доля объёма жидкости, выделяющейся за счёт их разрушения, тоже очень мала. В нестабильных пенах разрушение перегородок может происходить до того, как они достигнут критической толщины (рис. 1).

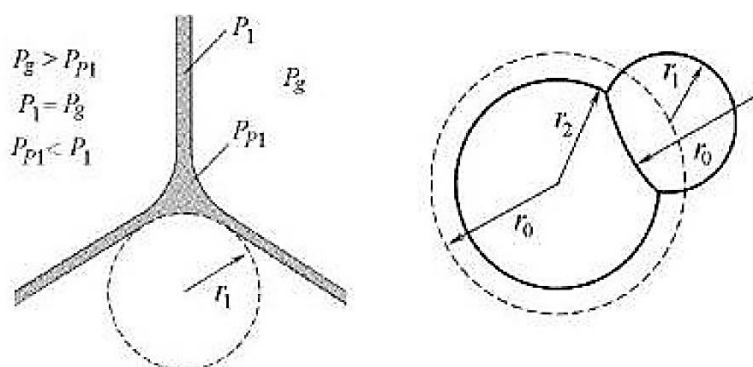


Рис. 1. Начальная стадия разрушения пенобетонной смеси:
Pp1 – давление в канале Плато; P1 – давление в ламелле; Pg – давление газа в пузырьках

Fig. 1. The initial stage of destruction of the foam concrete mixture:
Pp1 – pressure in the Plateau channel; P1 – pressure in the lamella;
Pg – gas pressure in the bubbles

Седиментация является чисто гидродинамическим явлением. Из всего объёма пены раствор, содержащийся в прослойках, стекает вниз, подпитывая нижележащие слои пены. Истечение прекращается, когда вся излишняя жидкая фаза будет удалена и адсорбционные сольватированные слои плёнок соединятся. При этом происходит утончение адсорбционных слоёв контактной зоны до состояния, когда плёнка становится термодинамически неустойчивой. На этой стадии истечение жидкости из пены не рассматривается с точки зрения гидродинамики, так как начинают проявляться существенные капиллярные явления. Под действием капиллярных сил, обусловленных различной кривизной отдельных участков плёнки пузырька, поверхностные слои плёнок при истечении подвергаются упругим деформациям: они могут растягиваться или сжиматься в соответствии с направлением действующих на них усилий. При растягивании плёнки молекулы поверхностно-активных веществ в поверхностном слое становятся менее плотно «упакованными». Это приводит к локальному увеличению поверхностного натяжения. Однако, благодаря эффекту Марангони, «ослабленный» участок не разрушается. Эти два взаимно противоположных процесса протекают одновременно в течение всего времени существования пенного массива в жидком состоянии. Истечение продолжается до тех

пор, пока перегородки не достигнут такой толщины, при которой они становятся настолько хрупкими, что могут разрываться даже при малых воздействиях, таких как вибрация, перепады температур, воздушные потоки, попадание частиц пыли и другие помехи [25].

Если система не достигла полного термодинамического равновесия, она находится в неравновесном состоянии, но стремится к равновесию. Это состояние характеризуется наличием градиентов параметров и потоков вещества и энергии. По классической термодинамике это происходит благодаря спонтанным изменениям внутри системы. Эти изменения – часть естественного процесса эволюции системы, которая проходит через последовательность самопроизвольных изменений. Один из ключевых выводов термодинамики заключается в том, что в закрытых системах конечное состояние – полное термодинамическое равновесие. Оно стабильно и характеризуется минимальным значением термодинамического потенциала Гиббса:

$$\Delta G=0; G=H-TS=(U+pV-TS)>0, \quad (1)$$

где: G – энергия Гиббса; H – энтальпия; T – температура; S – энтропия; U – внутренняя энергия; p – давление.

В зависимости от дополнительных внешних факторов, влияющих на систему, происходит минимизация термодинамических потенциалов Гиббса, Гельмгольца и других.

Самопроизвольная эволюция замкнутой системы к состоянию с минимальным термодинамическим потенциалом обусловлена вторым началом термодинамики. Оно требует, чтобы энтропия изолированной системы увеличивалась при протекании в ней необратимых процессов.

В случае дальнейшего разрушения структуры и продолжающегося выхода жидкой фазы, вблизи границы раздела фаз скорость потока жидкости равна нулю, а в центральной части канала Плато – Гиббса она максимальна.

Скорость выхода жидкости изменяется с течением времени: сначала она минимальна, затем достигает максимального значения и снова уменьшается. Небольшое количество раствора (единицы процентов от общего объёма жидкости, содержащейся в пене) удерживается в плёнках в течение длительного времени, иногда сохраняя структуру сформировавшегося массива. В результате этого процесса, если не произошло схватывание, смесь полностью расслаивается (рис. 2).

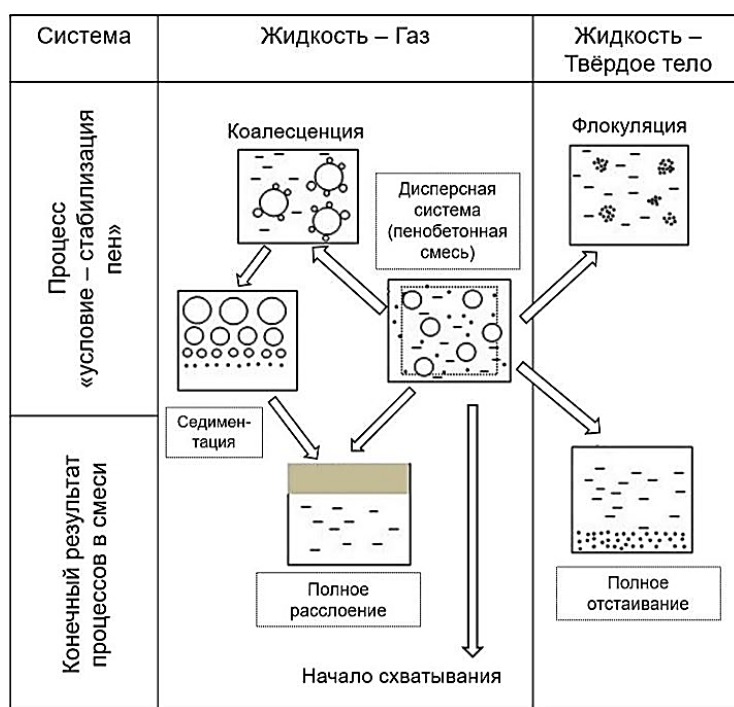


Рис. 2. Схема физических процессов в пенобетонной смеси. Начальный период

Fig. 2. Diagram of physical processes in a foam concrete mixture. The initial period

Системы с сильным коагуляционным взаимодействием, которые неустойчивы в агрегатном состоянии, склонны к оседанию. Чтобы технология работала правильно, время начала схватывания должно быть раньше, чем начнётся осадка и коалесценция.

Когда в пеносмеси высока доля цемента, скорость оседания дисперсных частиц тоже растёт. Если же добавлять больше цемента или увеличивать водоцементное отношение, система становится более неустойчивой в агрегатном состоянии. Это может привести к остаточному течению смеси в пенобетонном массиве и резкому ухудшению качества изделия.

Увеличение содержания ПАВ в пенообразующем растворе замедляет скорость истечения жидкости из пены на всех участках. Это связано с повышением структурно-механических свойств плёнок, увеличением объёма мицелл и усилением взаимодействия между адсорбционными слоями.

В процессе застывания пенобетонной смеси происходит постепенный переход от седиментационной устойчивости к агрегативной. При этом сольватные оболочки цементных частиц начинают сливаться, что приводит к образованию гелеобразной структуры пеноцементной системы. Очевидно, что степень коагуляции цементно-песчаного раствора зависит от соотношения цемента и заполнителя, а также от В/Т смеси [26].

В технологии производства пенобетона важно учитывать, что процессы, происходящие в смеси, можно разделить на две группы. С одной стороны, в свежееуложенной пенобетонной смеси, как и в любой термодинамически неустойчивой системе, при избыточной подвижности раствора возможно разрушение структуры пены – седиментация или течение цементного молочка по каналам Плато, которое особенно проявляется при высоких водотвёрдых отношениях. Оно сопровождается коалесценцией воздушных пузырьков, в крайнем случае приводящей к полному расслоению смеси. С другой стороны, в цементном растворе запускается процесс гидратации: формирование сольватных оболочек цементных зёрен, нуклеация новообразований из сольватных оболочек, образование кластеров из частиц, а срастание кластеров приводит к схватыванию всего пенобетонного массива (рис. 3). Важным технологическим условием качества продукции является сдерживание «первого» из этих процессов и ускорение «второго».

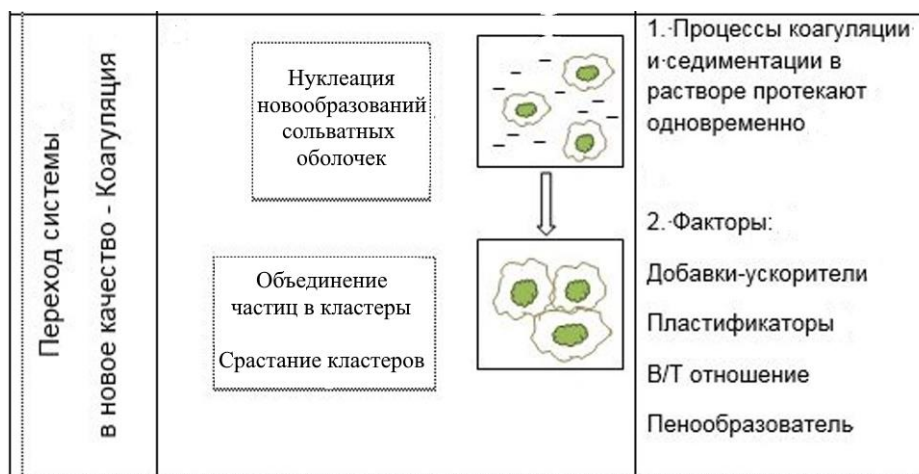


Рис. 3. Схема физических процессов в пенобетонной смеси. Схватывание

Fig. 3. Scheme of physical processes in a foam concrete mixture. Grasping

Процесс образования кристаллогидратов представляет собой комбинацию топохимических и гетерогенных реакций. В случае гидратации портландцемента эти реакции происходят одновременно. Поэтому скорость гидратации зависит от двух факторов:

- растворимости минералов, образующих клинкер (топохимический фактор);
- концентрации компонентов реакции и наличия центров кристаллизации (гетерогенные факторы).

В зависимости от того, какой из этих факторов ограничивает скорость реакции, она может протекать по-разному. Если минералы, образующие клинкер, плохо растворяются, то ско-

рость реакции определяется топохимическими факторами. Если же концентрация продуктов гидратации недостаточна, а центров кристаллизации мало, то скорость реакции контролируется гетерогенными факторами.

Характеристики и структура пенобетонных смесей в процессе их приготовления и отверждения позволяют отнести их к композитным суспензиям, в которых плотность дисперсных фаз различается более чем на два порядка, а твёрдая фаза претерпевает значительные изменения в степени дисперсности на протяжении всего периода существования вязких связей между частицами и кластерами. В процессе вовлечения воздуха при переносе материала матрицы на пенную сетку происходит частичное упрочнение связей между компонентами смеси, а затворитель перемещается из объёма раствора на поверхность раздела фаз газ–жидкость и физически связывается в пенных плёнках. Таким образом, скорость перехода пенобетонной смеси из вязко-пластичного в слабоупругое состояние зависит от соотношения воды и твёрдого вещества, минералогического состава цемента, наличия мелкодисперсного заполнителя, а также от типа и концентрации пенообразователя.

Заключение

Основываясь на вышеизложенном, можно выделить два способа улучшения стабильности пенных смесей. Первый метод базируется на способности поверхностно-активных веществ формировать в адсорбционном слое сложные ассоциативные комплексы за счёт электростатических, донорно-акцепторных (межмолекулярных) и стерических взаимодействий функциональных групп. Второй метод предполагает создание плотных и эластичных адсорбционных слоёв с высоким структурно-механическим барьером при добавлении небольшого количества высокомолекулярных природных или синтетических полимеров.

Итак, чтобы добиться стабильности коллоидной системы пенобетонного раствора на этапе седиментации и, соответственно, обеспечить высокое качество конечного продукта, необходимо использовать комплекс мер. Он включает в себя выбор оптимального сочетания технологических параметров на входе, таких как точное соотношение компонентов, соблюдение технологии производства и использование специальных добавок.

Говоря о технологии производства качественного пенобетона, стоит отметить такой важный фактор качества, как культура производства, а также субъективный фактор, касающийся опыта и квалификации техперсонала, поскольку потребительские свойства готового продукта из пенобетона весьма зависят от профессионализма работников, так как пенобетон очень чувствителен к неточностям в соблюдении технологии и рецептуры. В условиях стройплощадки довольно сложно постоянно контролировать качество цемента, пенообразователя и наполнителей. К сожалению, это является одной из причин ограниченного применения пенобетонной технологии на российских стройплощадках.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

R.C. Федюк – разработка концепции и сбор данных исследования; А.И. Савенков – анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

R.S. Fediuk – developed the concept and collected the study data; A.V. Savenkov – analysis and interpretation the results; preparation and editing of text. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ta X., Zhang Y., Wan Z., Li, J. Study on preparation method and carbon fixation performance of supercritical CO₂-foamed concrete // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 491. P. 142759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142759>.

2. Баженов Ю.М., Федюк Р.С., Лесовик В.С. Обзор современных высокоэффективных бетонов // Научно-технические технологии и инновации: Электронный сборник докладов Международной научно-практической конференции, посвящённой 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. С. 45–49.
3. Zhang G., He Y., Yang J., Ding Q., D. Sun, Wang X. Performance optimization of low-carbon phosphogypsum foam concrete: Influence mechanisms of different activators // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 112. P. 113688. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113688>.
4. Моргунов Л.В. Пенобетон. Монография. Ростов-на-Дону: изд-во РГСУ, 2012. 154 с.
5. Меркин А.П. Научные и практические основы улучшения структуры и свойств поризованных бетонов: дисс. ... д-ра техн. наук. М., 1973. 290 с.
6. Shi M., Yin G., Hao W., Zhang W., Zhang J., Wei P., Feng J., Qiang L., Zhang W., Zhu D. Mechanical and energy absorption characteristics of foamed concrete under different quasi-static compression tests // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. P. 105887. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105887>.
7. Zhang Y., Wu D., Qin S., Shi P., Deng R. Preparation of sulfoaluminate cementitious carbon dioxide foamed concrete: Application to coal mine insulation // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 490. P. 142449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142449>.
8. Sun Y., Wang H., Zhang Y., Liu X., Ma G. Spray-based 3D printed foam concrete: Stress concentration relieve utilization // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 485. P. 141871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141871>.
9. Nandakrishna R., Sathyan D., Athira R. Enhancing thermal comfort and durability of foam concrete infill blocks through surface modifications // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 27. P. 106096. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106096>.
10. Compaore A., N'Zy Kicoun Toure J.-Y., Primus Klenam D.E., Merenga A.S., Asumadu T.K., Obayemi J.D., Rahbar N., Migwi C., Soboyejo W.O. Foam concrete with mineral additives: from microstructure to mechanical/physical properties, workability and durability // *Open Ceramics*. 2025. Vol. 23. P. 100812. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2025.100812>.
11. Compaore A., N'Zy Kicoun Toure J.-Y., Primus Klenam D.E., Asumadu T.K., Obayemi J.D., Rahbar N., Migwi C., Merenga A.S., Soboyejo W.O. Performance of foam concrete containing relatively low temperature calcined clay as partial replacement of portland cement // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.137>.
12. Jia H., Feng X., Cui B., Liu Z. Design and thermal insulation simulation of nano-SiO₂ foam concrete and vacuum insulation panel system for building exterior wall insulation // *Energy*. 2025. Vol. 330. P. 136833. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136833>.
13. Алексейко Л.Н., Таскин А.В. О комплексной переработке золошлаковых отходов энергетики // *Экология и развитие общества. Труды IX Международной конференции. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ)*. 2005. С. 12–21.
14. Алексейко Л.Н., Таскин А.В., Черепанов А.А. Технологическая линия для переработки золошлаковых отходов – продуктов сжигания угольного топлива // Патент на изобретение RU 2489214 С1, 10.08.2013. Заявка № 2012123064/03 от 04.06.2012.
15. Панков П.П., Коновалова Н.А., Размахнин К.К., Бесполитов Д.В. Структурообразование композиционных материалов, модифицированных добавками природного цеолита и высокомолекулярных веществ // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2024. № 9 (789). С. 54–64.
16. Панков П.П., Коновалова Н.А., Размахнин К.К., Бесполитов Д.В. Органо-неорганические композиционные материалы на основе отходов горнорудных предприятий // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2025. № 2. С. 64–75.
17. Levkina E.V., Titova N.Y. The analysis of the financial condition of small business and the ways of its development in the Primorsky Territory // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, № 272 (3), art. 032185. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032185>.
18. Левкина Е.В., Лялина Ж.И., Локша А.В., Савостина С.Е. Финансовые аспекты обеспечения экономической безопасности: многоуровневый подход. Владивосток, 2022. 169 с.
19. Левкина Е.В., Лялина Ж.И., Курасова Е.А. Актуальность исследования экономической безопасности как экономической категории // *Экономическая безопасность*. 2022. Т. 5. № 1. С. 339–350.
20. Касумов Аяз Шахин Оглы. Пенобетон с повышенными эксплуатационными свойствами: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М., 2017. 25 с.

21. Костыленко К.И. Закономерности обеспечения структурной устойчивости пенобетонных смесей: Автореферат дисс. ... канд. техн. наук 05.23.05. Ростов-на-Дону, 2014.
22. Aveyard R. Liquid droplets and solid particles at surfactant solution interfaces // *Chem. Soc. Faraday Trans.* 1995. Vol. 91, № 17. P. 2681–2697.
23. Kruglyakov P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications. Amsterdam: Elsevier, 2000. 391 p.
24. Шевнина Т.Е. Фрактально-перколяционный механизм разрушения пены: Автореферат дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 02.00.04. Тюмень, 2004. 26 с.
25. Гленсдорф П., Пригожин И.Р. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
26. Вилкова Н.Г. Свойства пен и методы их исследования. Пенза, ПГУАС, 2013. 120 с.

REFERENCES

1. Ta X., Zhang Y., Wan Z., Li, J. Study on preparation method and carbon fixation performance of supercritical CO₂-foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 491, p. 142759. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142759>.
2. Bazhenov Yu.M., Fedyuk R.S., Lesovik V.S. Review of modern high-performance concretes. *Science-Intensive Technologies and Innovations*. Electronic collection of reports of the International scientific and practical conference dedicated to the 65th anniversary of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. P. 45–49.
3. Zhang G., He Y., Yang J., Ding Q., D. Sun, Wang X. Performance optimization of low-carbon phosphogypsum foam concrete: Influence mechanisms of different activators. *Journal of Building Engineering*, 2025, vol. 112, p. 113688. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113688>.
4. Morgun L.V. Foam concrete. Monograph. Rostov-on-Don: RSSU Publishing House, 2012. 154 p.
5. Merkin A.P. Scientific and practical foundations for improving the structure and properties of porous concrete: Doctor's degree thesis. M., 1973. 290 p.
6. Shi M., Yin G., Hao W., Zhang W., Zhang J., Wei P., Feng J., Qiang L., Zhang W., Zhu D. Mechanical and energy absorption characteristics of foamed concrete under different quasi-static compression tests. *Results in Engineering*, 2025, vol. 27, p. 105887. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105887>.
7. Zhang Y., Wu D., Qin S., Shi P., Deng R. Preparation of sulfoaluminate cementitious carbon dioxide foamed concrete: Application to coal mine insulation. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 490, p. 142449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142449>.
8. Sun Y., Wang H., Zhang Y., Liu X., Ma G. Spray-based 3D printed foam concrete: Stress concentration relieve utilization. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 485, p. 141871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141871>.
9. Nandakrishna R., Sathyan D., Athira R. Enhancing thermal comfort and durability of foam concrete infill blocks through surface modifications. *Results in Engineering*, 2025, vol. 27, p. 106096. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106096>.
10. Compaore A., N'Zy Kicoun Toure J.-Y., Primus Klenam D.E., Merenga A.S., Asumadu T.K., Obayemi J.D., Rahbar N., Migwi C., Soboyejo W.O. Foam concrete with mineral additives: from microstructure to mechanical/physical properties, workability and durability. *Open Ceramics*, 2025, vol. 23, p. 100812. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2025.100812>.
11. Compaore A., N'Zy Kicoun Toure J.-Y., Primus Klenam D.E., Asumadu T.K., Obayemi J.D., Rahbar N., Migwi C., Merenga A.S., Soboyejo W.O. Performance of foam concrete containing relatively low temperature calcined clay as partial replacement of portland cement. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.07.137>.
12. Jia H., Feng X., Cui B., Liu Z. Design and thermal insulation simulation of nano-SiO₂ foam concrete and vacuum insulation panel system for building exterior wall insulation. *Energy*, 2025, vol. 330, p. 136833. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136833>.
13. Alekseiko L.N., Taskin A.V. On the integrated processing of ash and slag waste from the energy sector. *Ecology and Development of Society*. Proceedings of the IX International Conference. International Academy of Sciences of Ecology, Human and Nature Safety (MANEB), 2005, pp. 12–21.
14. Alekseyko L.N., Taskin A.V., Cherepanov A.A. Technological line for processing ash and slag waste - coal fuel combustion products // Patent for invention RU 2489214 C1, 10.08.2013. Application No. 2012123064/03 dated 04.06.2012.

15. Pankov P.P., Konovalova N.A., Razmakhnin K.K., Bespolitov D.V. Structure formation of composite materials modified with additives of natural zeolite and high-molecular substances. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2024, no. 9 (789), pp. 54–64.
16. Pankov P.P., Konovalova N.A., Razmakhnin K.K., Bespolitov D.V. Organo-inorganic composite materials based on mining waste. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2025, no. 2, pp. 64–75.
17. Levkina E.V., Titova N.Y. The analysis of the financial condition of small business and the ways of its development in the Primorsky Territory. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, no. 272 (3), art. 032185. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032185>.
18. Levkina E.V., Lyalina Zh.I., Loksha A.V., Savostina S.E. Financial aspects of ensuring economic security: a multi-level approach. Vladivostok, 2022. 169 p.
19. Levkina E.V., Lyalina Zh.I., Kurasova E.A. Relevance of the study of economic security as an economic category. *Economic Security*, 2022, vol. 5, no. 1, pp. 339–350.
20. Kasumov Ayaz Shahin Ogly. Foam concrete with improved performance properties: Abstract of Ph. D. thesis. M., 2017. 25 p.
21. Kostylenko K.I. Regularities of ensuring structural stability of foam concrete mixtures: Abstract of Ph. D. thesis. Rostov-on-Don, 2014.
22. Aveyard R. Liquid droplets and solid particles at surfactant solution interfaces. *Chem. Soc. Faraday Trans.*, 1995, vol. 91, no. 17, pp. 2681–2697.
23. Kruglyakov P.M. Hydrophile-lipophile balance of surfactants and solid particles. Physicochemical aspects and applications. Amsterdam: Elsevier, 2000. 391 p.
24. Shevnina T.E. Fractal-percolation mechanism of foam destruction: Abstract of Ph. D. thesis. Tyumen: 2004. 26 p.
25. Glensdorf P., Prigogine I.R. Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations. M.: Mir, 1973. 280 p.
26. Vilkova N.G. Properties of foams and methods of their study. Penza, PSUAS, 2013. 120 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Федюк Роман Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация).

✉ roman44@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

Roman S. Fediuk, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Савенков Андрей Иванович – кандидат технических наук, доцент, Ангарский государственный технический университет (Ангарск, Российская Федерация).

✉ savenkov_andrey@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6711-1119>

Andrey I. Savenkov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Angarsk State Technical University (Angarsk, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 25.07.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 26.08.2025.

Принята к публикации / Accepted: 24.09.2025.