



Review Article

Received: September 9, 2023

Accepted: October 10, 2023

Published: October 27, 2023

ISSN 2304-6295

Constructions with the use of monolithic foam concrete in fixed formwork

Rybakov, Vladimir Alexandrovich¹ Druzhinina, Svetlana Nikolaevna^{1*} Usanova, Kseniia Yurievna¹

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation; druzhinina.sn@edu.spbstu.ru (D.S.N.); fishermanoff@mail.ru (R.V.A.); plml@mail.ru (U.K.Y.)
Correspondence:* email druzhinina.sn@edu.spbstu.ru; contact phone [+79522296331](tel:+79522296331)

Keywords:

Foam concrete; Monolithic foam concrete; Fixed formwork; Foam concrete structures; Lightweight steel concrete structures (LSCS)

Abstract:

The object of research is constructions with the use of monolithic foam concrete in fixed formwork. The work aims to systematize knowledge about existing structures with foam concrete in fixed formwork, their application areas, advantages, and disadvantages. **Method.** A review of 90 scientific articles on this topic was carried out. Fifteen types of structures with foam concrete were identified and analyzed. **Results.** The article describes the characteristics of such a material as foam concrete, as well as its classification. A review of structures with the use of foam concrete in fixed formwork was carried out, and six main areas of application of the material were identified: wall structures, floor structures, roof structures, flooring structures, road pavement, thermal insulation of pipelines, and the advantages and disadvantages of the listed structures were identified.

1 Introduction

Актуальными задачами строительства являются упрощение строительных процессов, улучшение качества строительства, снижение стоимости, повышение уровня безопасности конструкций для жизни человека и окружающей среды [1]–[3].

Одним из самых популярных строительных материалов является бетон. С каждым годом ученые и инженеры изобретают все больше новых видов бетона и конструкций с их применением, в которых бетон может выполнять разные функции.

Для того, чтобы придать изделиям из бетона нужную форму используется опалубка. Опалубка представляет собой конструкцию или форму, используемую в бетонном строительстве для поддержки бетона до тех пор, пока он не затвердеет и не приобретет достаточную прочность, чтобы выдерживать собственный вес и любые дополнительные нагрузки. Она может быть съемной и несъемной.

Несъемная опалубка является типом опалубки, который используется в монолитном строительстве и остается на месте после заливки и отверждения бетона. В отличие от традиционной опалубки, которая снимается после затвердевания бетона, стационарная опалубка предназначена для того, чтобы оставаться на месте как постоянная часть конструкции [4]–[6].

Несъемная опалубка может быть изготовлена из различных материалов, включая сборный бетон, сталь, алюминий или пластик. Обычно она спроектирована таким образом, чтобы быть легкой, прочной и простой в монтаже, и часто используется в ситуациях, когда бетонная конструкция будет подвергаться воздействию высокого уровня влажности, химических веществ или других суровых условий окружающей среды.

Одним из главных преимуществ стационарной опалубки является то, что она может сократить время и затраты на строительство за счет устранения необходимости в отдельном демонтаже опалубки и отделке поверхности. Это также может повысить общую долговечность и структурную целостность бетона, обеспечивая непрерывную, бесшовную поверхность, которая менее подвержена растрескиванию, протеканию или другим формам повреждений. Многочисленные инновационные исследования, упомянутые ниже, показали, что несъемная опалубка может помочь сократить количество отходов и расход материалов, одновременно добавляя функциональности строительным компонентам.

Существует множество видов бетона различного назначения. По своей структуре они делятся на плотные, поризованные, крупнопористые и ячеистые.

Пенобетон является видом ячеистого бетона с пористой структурой, получаемой в результате введения в бетонную смесь органического [7], [8] или синтетического пенообразователя [9]. Пористую структуру материал приобретает за счет равномерного распределения пузырьков воздуха по всей массе бетона. Пенобетон можно считать относительно однородным по сравнению с обычным бетоном, поскольку он не содержит крупнозернистой фазы заполнителя [10]–[14].

Целью данной работы является систематизация знаний о существующих конструкциях с пенобетоном в несъемной опалубке, областях их применения, достоинствах и недостатках.

2 General information about foam concrete

По назначению пенобетон разделяют на теплоизоляционный с плотностью до 500 кг/м³, конструкционно-теплоизоляционный с плотностью от 500 кг/м³ до 900 кг/м³ и конструкционный с плотностью свыше 1000 кг/м³ [15]. Кроме этого, данный материал разделяют на автоклавный – твердеющий в естественных условиях и неавтоклавный – твердеющий в условиях тепловой обработки при атмосферном давлении [16]. На рисунке 1 изображены основные области применения пенобетона [17], [18].

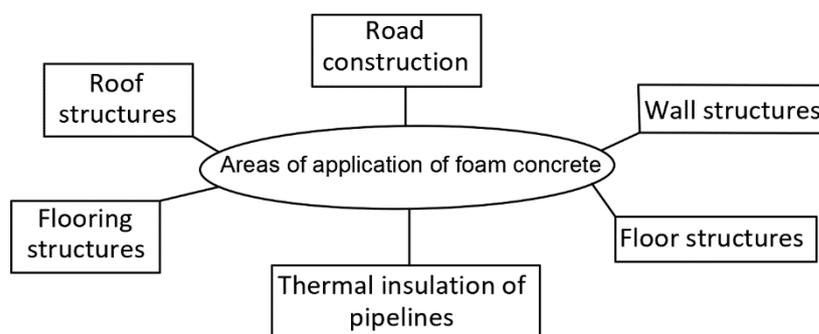


Рис. 1 Области применения пенобетона
Fig.1 Areas of application of foam concrete

Теплоизоляционный пенобетон используют в конструкциях крыш, чердачных перекрытий, технических помещений и пр. как альтернативу традиционным теплоизоляционным материалам [19]–[21]. Основными положительными характеристиками теплоизоляционного пенобетона являются замкнутая пористость и низкий коэффициент теплопроводности от 0.07 до 0.2 Вт/(м·°C) [22], [23]. При добавлении базальтового и стекловолокна, волластонита и диоксида кремния коэффициент теплопроводности варьируется в пределах 0.069–0.097 Вт/(м·°C) [24], а при добавлении микросфер перлита коэффициент теплопроводности пенобетона снижается до 0.062 Вт/(м·°C) [25].

Пенобетон не обладает недостатками основных традиционных теплоизоляционных материалов. Например, волокнистые утеплители из-за высокого водопоглощения быстро разрушаются и теряют хорошие теплотехнические характеристики [26], [27]. Пенополистирол и другие вспененные теплоизоляционные материалы устойчивы к влаге, плесени, грибкам и бактериям, но выделяют отравляющие вещества при горении [28], [29]. Кривальцевич Т.В. и Гурова Е.В. в [30] провели сравнение технических свойств и основных характеристик



теплоизоляционных материалов различной структуры, рассмотрели преимущества и недостатки теплоизоляционного пенобетона неавтоклавного твердения.

Ш. Г. Джамалов, К. А. Оцоков в [31] исследовали обеспечение заданного сопротивления теплопередачи распространенных стеновых материалов. В результате теплотехнического расчета многослойной стены показано, что наиболее эффективным в отношении теплозащиты является пенобетон. Установлено, что для получения пенобетонных смесей с низкой плотностью необходимо увеличивать длительность перемешивания пенобетонной смеси.

Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон используют преимущественно в качестве стенового материала, т.к. он обладает хорошими теплотехническими характеристиками и достаточной прочностью [32], [33], [34], [35].

Несущая способность стеновых элементов из конструкционно-теплоизоляционного пенобетона напрямую зависит от структуры бетона. Использование различных минеральных и органических модификаторов в пенобетонной смеси влияет на размер, форму и равномерность распределения пор в материале.

В работе [36] установлено, что стабилизатором ячеистой структуры бетона может выступать волокнистый целлюлозный наполнитель. Введение 1.4% этого материала от общей массы компонентов смеси увеличивает прочность пенобетона плотностью 500–530 кг/м³ на 2.9–3.15 МПа.

В работах [37], [38] в качестве стабилизатора структуры бетона использован кремнезоль, применение которого улучшило поровую структуру пенобетона, повысило устойчивость пены и позволило использовать добавки-ускорители, активирующие гидратационные процессы в пенобетоне.

Исследование [39] показало, что введение термомодифицированной торфяной добавки в пенобетонную смесь в количестве 6% от массы цемента повысило прочность пенобетона на 35–43%, снизило значения коэффициента теплопроводности на 14% и водопоглощение на 23–32%.

Исследованы и другие добавки для улучшения структуры и эксплуатационных свойств пенобетона, такие как зола-уноса [40], метакаолин [41], [42], измельченная резина [43], [44], микрокремнезем [45] и доменный шлак.

Конструкционный пенобетон в сравнении с тяжелыми бетонами имеет меньшую плотность и лучшие теплотехнические характеристики конструкций на его основе. Конструкционный пенобетон подходит для возведения монолитных несущих и самонесущих конструкций зданий.

В работе [46] проведена технико-экономическая оценка применения пенобетонных конструкций для возведения монолитных конструкций на примере малоэтажного здания в Воронеже. Сравнение с конструкциями из газосиликатов и сборного железобетона показало сокращение затрат на применение машин и механизмов на 30–50%, снижение массы конструкции на 20–60% и расхода материалов на 20–40%. Более подробно изучил пенобетон для монолитного строительства И.Г. Селезнёв в своей диссертации [47], а для сборного строительства - В.И. Удачкин в своей диссертации [48].

В работе [49] авторы экспериментально исследовали пенобетон плотностью 1200 кг/м³ с армирующими добавками для возведения несущих изгибаемых конструкций малоэтажных зданий. Подобран оптимальный состав бетона, содержащий армирующую добавку в виде полиамидного фиброволокна длиной 12 мм в количестве 2–3 кг/м³.

В работе [50] исследована взаимосвязь параметров структуры пенобетона с прочностью сцепления в системе «пенобетон–арматура». Установлено, что прирост прочности сцепления при увеличении средней плотности пенобетона в диапазоне 1200–1600 кг/м³ составил 20–65%. Наибольшую прочность сцепления с пенобетоном показала стеклокомпозитная арматура, со значением прочности сцепления на 20–45% выше, чем для базальтокомпозитной и стальной арматуры.

Несмотря на широкую сферу применения различных видов пенобетона и их перечисленные достоинства известным недостатком этого материала является повышенная усадка, в 4–10 раз больше, чем у обычного бетона, что в свою очередь приводит к снижению трещиностойкости [51], [52]. Усадка ухудшает пористую структуру пенобетона и как следствие снижается прочность и увеличивается теплопроводность пенобетона [53].

Исследования, посвященные усадке пенобетона, показывают возможность ее снижения включением в сырьевую смесь различных добавок. Использование алюмосиликатных микросфер из золошлаковых отходов в диапазоне 5–10% от массы цемента снижает пластическую усадку пенобетона в среднем на 40% [54]. При введении в состав пенобетонной смеси хризотил-

Druzhinina, S.; Rybakov, V.; Usanova, K.

Constructions with the use of monolithic foam concrete in fixed formwork;

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; 109 Article No 10915. doi: 10.4123/CUBS.109.15

асбестовых волокон в количестве 2% от массы цемента и глиоксала кристаллического в количестве 0.01% от массы цемента пластическая усадка снижается до 29 и 40%, а усадка при высыхании – до 44 и 50% соответственно [55]. В работе [56] показано, что 1% добавки волластонита с удельной поверхностью 90 м²/кг уменьшает усадку при высыхании на 34% и пластическую усадку на 21%, а дисперсная добавка диоксида с удельной поверхностью 116 м²/кг на 23% и 16%, соответственно.

3 Wall structures

Как уже ранее отмечалось, пенобетон имеет множество преимуществ, которые делают его популярным материалом для использования в конструкциях стен. Его можно использовать для создания стен как в малоэтажном строительстве, так и в высотных зданиях. Конструкции стен из пенобетона могут иметь различные конфигурации, что позволяет создавать не только простые формы, но и более интересные с точки зрения архитектуры [57]–[60].

3.1 Lightweight steel-concrete structures

Одними из наиболее популярных конструкций стен с применением пенобетона являются легкие сталебетонные конструкции (ЛСБК) [61]–[66]. Это тип сталебетонных конструкций, в которых заполняющим материалом является пенобетон марки D100...D1000, а несъемной опалубкой могут являться различные материалы, в том числе фиброцементные панели и гипсокартон. В качестве профильной стали используются легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) или горячекатанные профили. В ЛСБК, как и в других сталебетонных и сталежелезобетонных конструкциях, все расчетные усилия, которые возникают при воздействии на конструкцию, передаются как стальным элементам, так и пенобетону.

Легкие сталебетонные конструкции могут быть возведены непосредственно на стройплощадке или привезены в виде панелей, заранее изготовленных на заводе.

3.1.1 Light steel-concrete internal partition

Конструкция представляет собой металлический каркас, обшитый гипсокартоном, с заполнением пенобетоном марки D200-D600 (200–600 кг/м³), различной толщины.

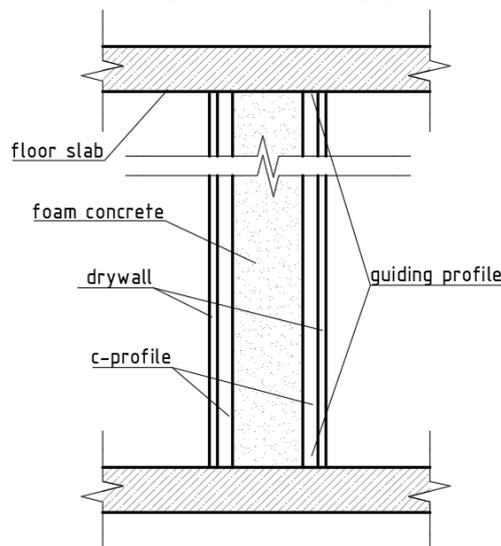


Рис. 2 Конструкция внутренней перегородки
Fig.2 Construction of an internal partition

Панель перегородки может иметь проем. В этом случае между вертикальными направляющими в месте проема крепится горизонтальный профиль, а у нижнего П-профиля в месте проема обрезают полки.

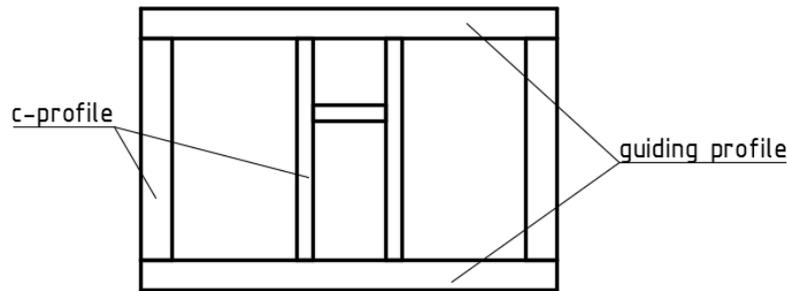


Рис. 3 Конструкция внутренней перегородки с проемом
Fig.3 Construction of an internal partition with an opening

3.1.2 Exterior wall with brick cladding

Существует вариант конструкции, схожий с предыдущей, но уже для наружной стены. В данном случае внешняя часть стены выкладывается из лицевого кирпича либо иного облицовочного материала и после этого внутреннее пространство стены заливается пенобетоном.

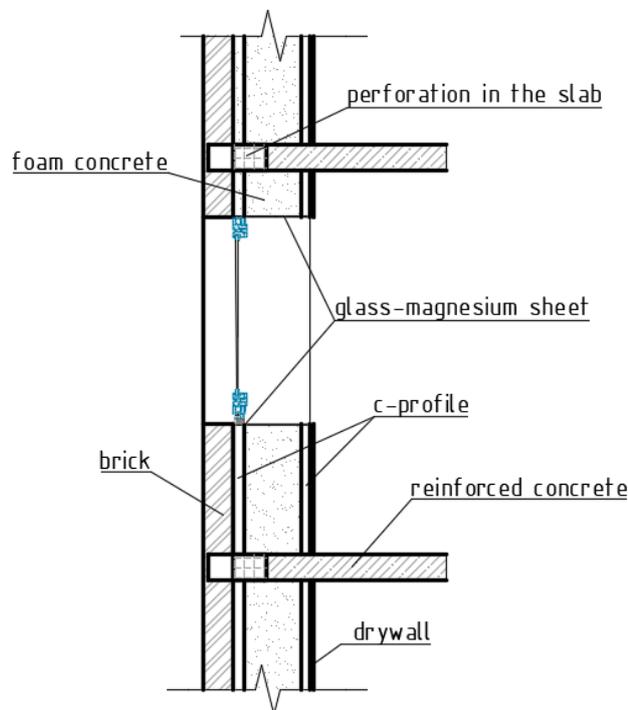


Рис. 4 Конструкция наружной стены с кирпичной облицовкой
Fig.4 Exterior wall construction with brick cladding

Помимо типовых решений ЛСБК могут использоваться для реализации более сложных архитектурных решений. На рис 5. представлен фрагмент фасада здания с усиленным каркасом, построенного в г. Сочи, Российская Федерация.

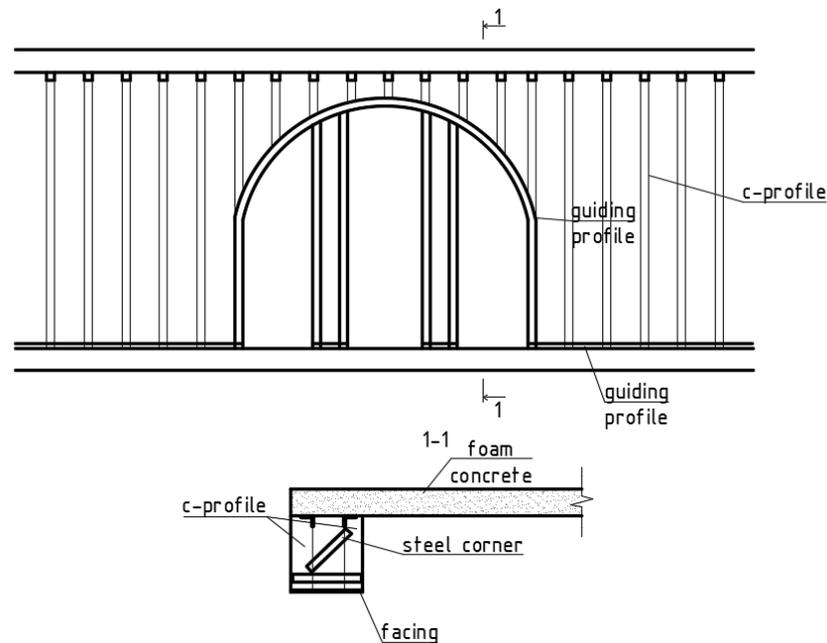


Рис. 5 Конструкция усиленной стены из заливного пенобетона
Fig.5 Reinforced foam concrete wall construction

3.1.3 Capital repair of the walls of the building

ЛСБК являются хорошим решением при выполнении капитальных ремонтов стен зданий, когда есть необходимость в замене утеплителя. Конструкция аналогична предыдущим, но в качестве несущей выступает существующая несущая стена здания, а старый утеплитель заменяют пенобетоном.

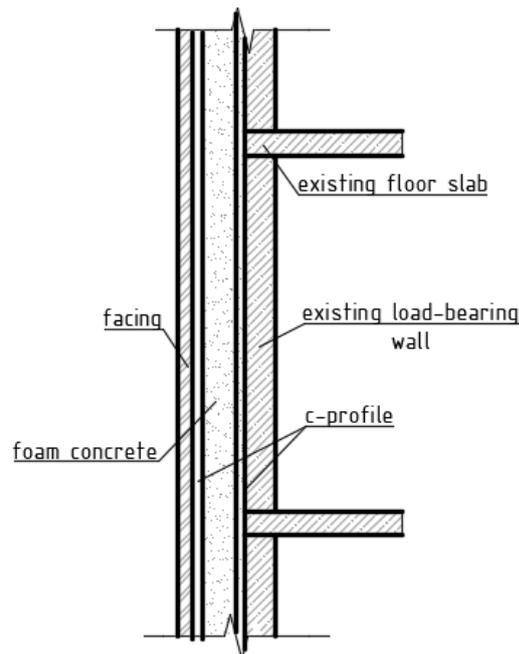


Рис. 6 Капитальный ремонт стен здания
Fig.6 Capital repair of the walls of the building

3.1.4 Facade system made of foam concrete and profiled metal sheet

В работе [67] представлена фасадная система с теплоизоляционным пенобетоном (300кг/м^3). Несъемной опалубкой выступает металлический профилированный лист. Автор допускает возможность применения конструкции в любых климатических и сейсмических условиях.

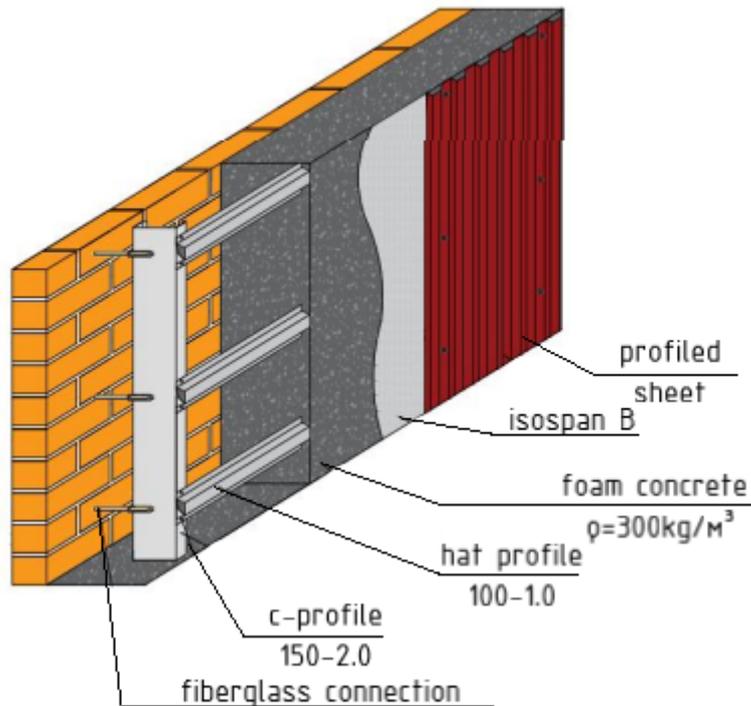


Рис. 7 Навесная фасадная система с применением пенобетона [46]
 Fig.7 Hinged facade system with the use of foam concrete [46]

3.2 Wall construction using monolithic foam concrete

Данная конструкция представляет собой несущую железобетонную стену с теплоизоляционным бетоном и кирпичной облицовкой.

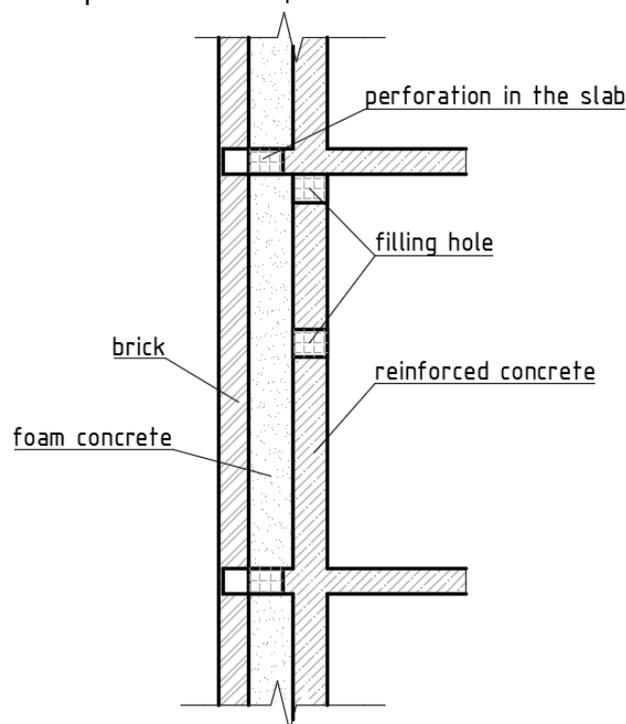


Рис. 8 Конструкция стены с применением монолитного пенобетона
 Fig.8 Wall construction using monolithic foam concrete

3.3 Wall with a wooden frame and foam concrete insulation

В работе [68] автором была описана конструкция деревянного каркаса с утеплением пенобетоном. В целом, технология схожа с вариантом применения стальных тонкостенных

профилей в качестве несущего каркаса ЛСБК. И.А. Лундышевым были выявлены сильные стороны как первого, так и второго варианта конструкции. Преимуществом деревянного каркаса является меньшая стоимость каркаса. Сильные стороны каркаса из ЛСТК - в большей технологичности и постоянным геометрическим размерам без необходимости проверять входную влажность доски.

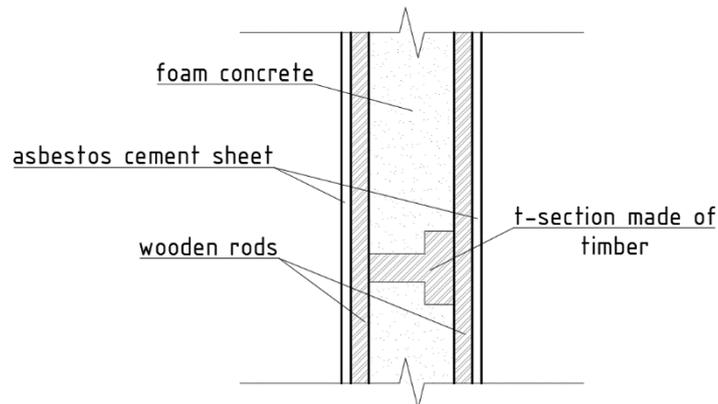


Рис. 9 Вертикальное сечение стены здания с деревянным каркасом и утеплением пенобетоном

Fig.9 Vertical section of the building wall with a wooden frame and foam concrete insulation

3.4 Construction of a brick wall with heat-insulating foam concrete

В данной конструкции пенобетон является теплоизоляционным материалом, а его несъемной опалубкой выступают кирпичная кладка с одной стороны и гипсокартон с другой. Используется преимущественно при строительстве многоэтажных зданий. Существует несколько способов возведения такой конструкции:

Первый вариант - пенобетон заливается через технологические отверстия в перекрытиях между кирпичными стенками, смонтированными на перекрытиях.

Второй вариант - стена возводится от фундамента на некотором расстоянии от перекрытия и связывается с плитами межэтажных перекрытий арматурой. Вторая стена возводится по краю перекрытия, а в образующийся простенок заливается монолитный пенобетон.

Третий вариант - пенобетон заливается между внутренней и внешней кирпичными стенами, которые выложены от фундамента вплотную к плитам перекрытия.

В этих вариантах строительства используется пенобетон с плотностью от 250 до 400 кг/м³ [69].

Также допускается вариант конструкции с кладкой из силикатного кирпича. В работе [70] выполнен теплотехнический расчет различных вариантов ограждающей конструкции с применением монолитного пенобетона в качестве утеплителя, подобран наиболее полезный диапазон плотностей бетона с точки зрения энергосбережения (от 100 до 300 кг/м³). Расчеты показали, что использование пенобетона с определенной плотностью имеет преимущества благодаря низкой теплопроводности материала. Это позволяет уменьшить толщину конструкции и, соответственно, снизить затраты на ее прогрев.

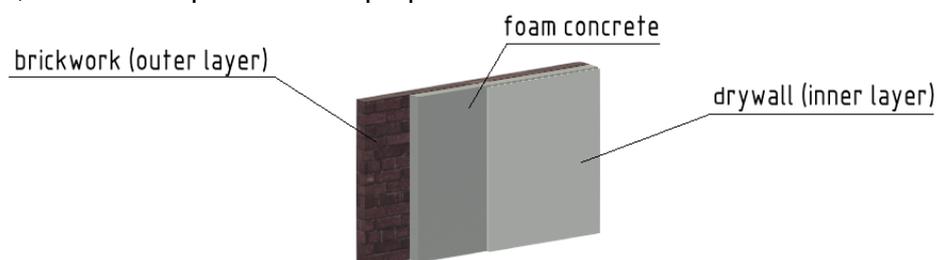


Рис. 10 Конструкция кирпичной стены с теплоизоляционным пенобетоном

Fig.10 Construction of a brick wall with heat-insulating foam concrete

Автором не показана схема соединения элементов конструкции между собой. Данный вариант конструкции может использоваться для исправления ошибок проектировщиков на этапе строительства при неправильном подборе теплоизоляции.

4 Floor structures

В отличие от конструкций стен, в которых больше используются теплоизоляционные свойства пенобетона, в конструкциях перекрытий он часто выступает и в качестве конструктивного материала. Например, может играть роль жесткого диска легкого сталебетонного перекрытия (ЛСБК)[71], [72].

4.1 Structural foam concrete floor structure

Перекрытие с жестким диском из конструкционного пенобетона представляет собой каркас из тонкостенных балок перекрытия, заполненный двумя слоями пенобетона. Теплоизоляционный слой пенобетона ($200\text{--}300\text{ кг/м}^3$) заливается до низа верхнего пояса балки, затем устраивается слой из конструктивного пенобетона ($900\text{--}1000\text{ кг/м}^3$), армированный стальной сеткой. Несъемной опалубкой в данном случае выступают водостойкие плиты, которые подшиваются к нижнему поясу балок. Во избежание деформации опалубки заливка бетона выполняется в 2 этапа. Конструкция используется при строительстве как частных домов, так и для коммерческих зданий [73].

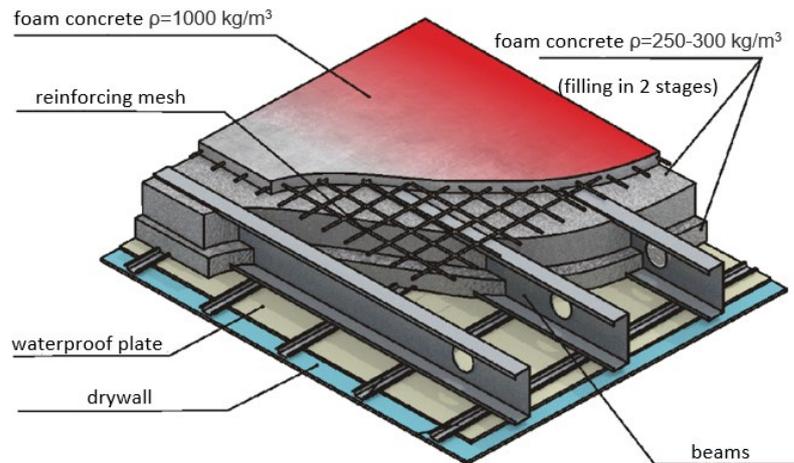


Рис. 11 Конструкция перекрытия с жестким диском из конструкционного пенобетона [73]
Fig.11 Structural foam concrete floor structure

Также в качестве несущих элементов могут выступать фермы перекрытия толщиной $150\text{--}800\text{ мм}$ из оцинкованных профилей [69].

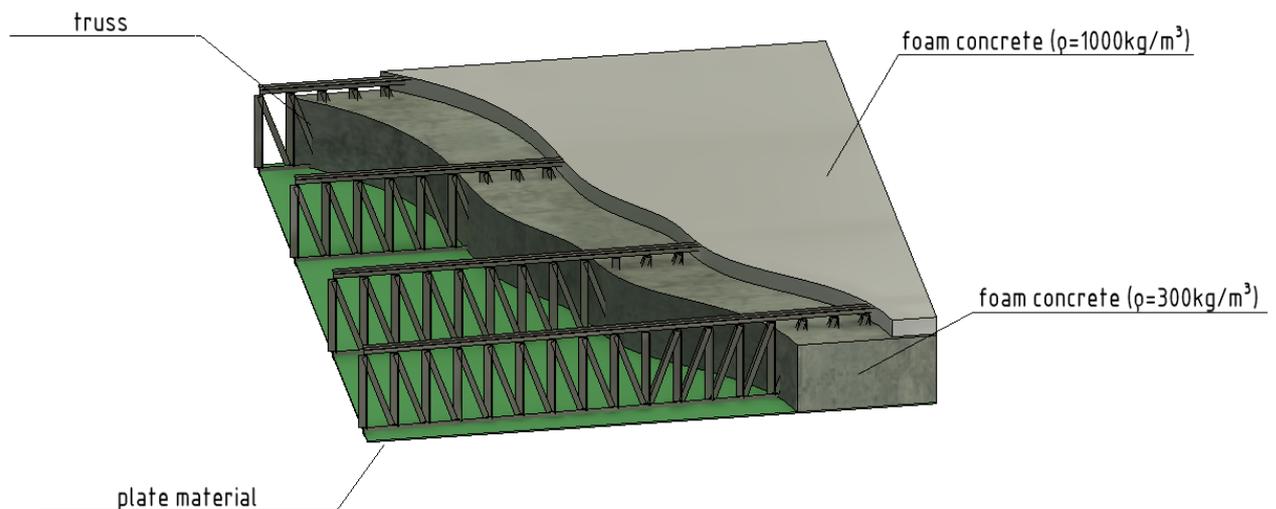


Рис. 12 Перекрытие с фермами
Fig.12 Floor with trusses

4.2 Floor with profiled sheet

Существует вариант конструкции схожий с предыдущим, отличие заключается в использовании профилированного листа в качестве конструктивного элемента. В данном случае

заливается только менее плотный слой пенобетона, применяются только его теплоизоляционные свойства. Перекрытия такого типа могут использоваться в качестве основания для плоской кровли [73]

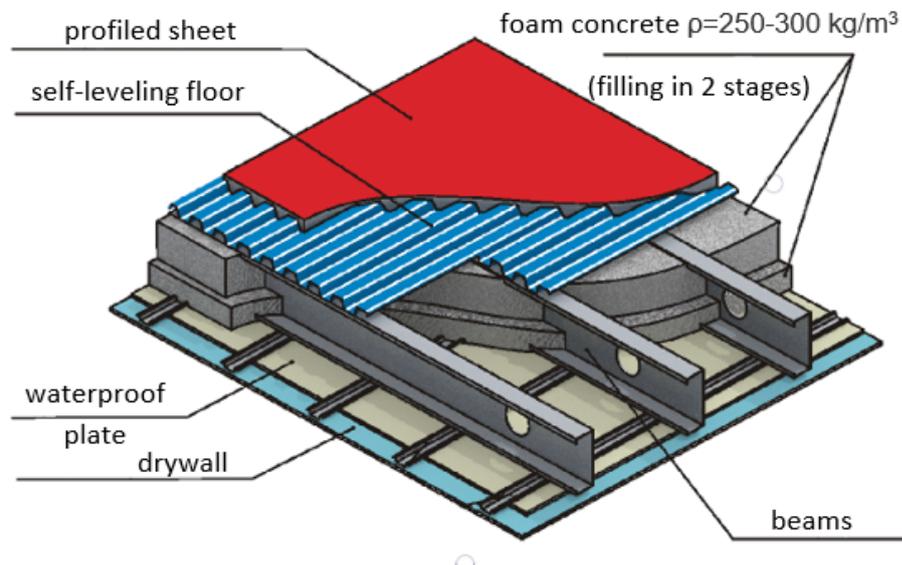


Рис. 13 Конструкция перекрытия с жестким диском из профилированного листа [73]
Fig.13 Floor with profiled sheet [73]

4.3 Floor with load-bearing profiled sheet

В работе [74] Вербцкий И. О. оценил возможность применения профилированного листа в качестве несущего элемента конструкции и предложил вариант конструкции монолитного перекрытия из пенобетона. Здесь присутствуют слои из неплотного (300 кг/м^3) и конструкционного (900 кг/м^3) пенобетона. Неконструкционный слой выполняет огне- и шумозащитные функции. Несъемной опалубкой являются гипсоволокнистые плиты.

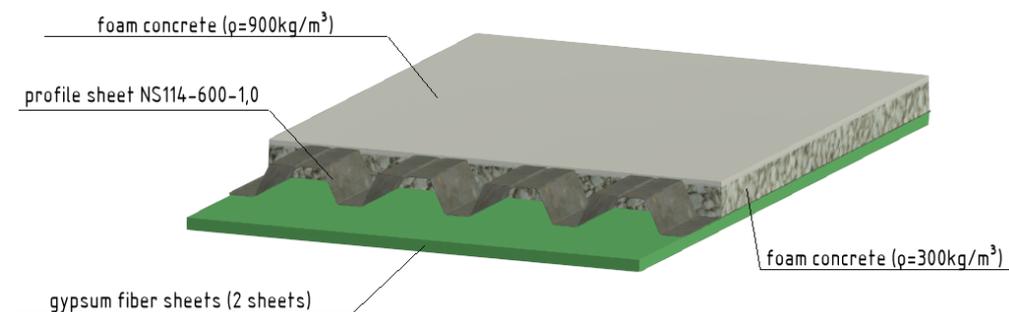


Рис. 14 Конструкция перекрытия с несущим профилированным листом
Fig.14 Floor with load-bearing profiled sheet

5 Flooring structures

Пенобетон используется в качестве выравнивающей стяжки пола толщиной от 30 до 150мм. Такое покрытие является более легким по сравнению с обычной цементно-песчаной стяжкой и создает меньше нагрузки на несущие элементы, а также обладает хорошими тепло- и звукоизоляционными свойствами, что делает эксплуатацию таких полов более комфортной [75], [76].

Допускается два варианта устройства стяжки: комбинированная и монолитная. В первом случае выполняется укладка двух слоев пенобетона: теплоизоляционного (200 кг/м^3) и основного ($600\text{--}1200 \text{ кг/м}^3$). Во втором случае используется материал одной плотности (более 800 кг/м^3) [77]. Толщина каждого слоя определяется отдельно для каждого случая.

6 Roof structures

Благодаря своей легкости и теплоизоляционным свойствам пенобетон хорошо себя показывает в конструкциях кровли: как в новых, так и в реконструируемых [78].

6.1 Construction of a flat roof with the use of foam concrete

В работе [79] описан вариант применения пенобетона при устройстве плоской кровли. В конструкции применяется два типа пенобетона разных марок. Несъемной опалубкой является железобетонная плита перекрытия и наружные стены. Вес такой кровли составляет около 70 кг/м^2 , что позволяет ее использование в конструкциях с невысокой прочностью.

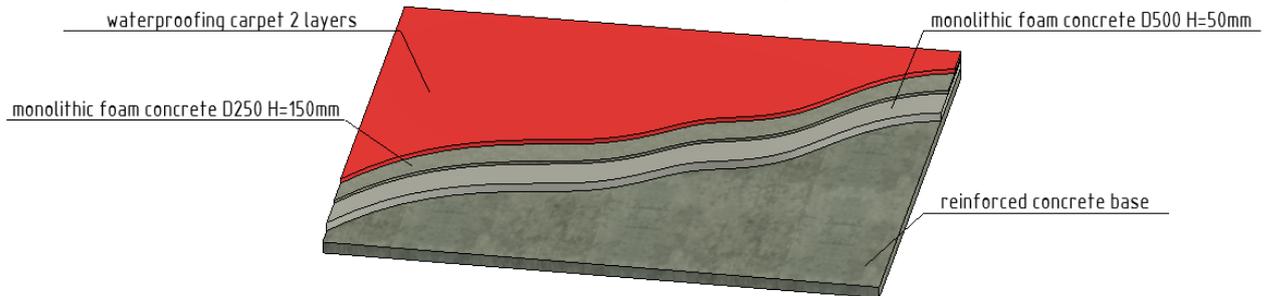


Рис. 15 Конструкция плоской кровли с применением пенобетона
Fig.15 Construction of a flat roof with the use of foam concrete

В работе [80] выполнено сравнение кровли с применением пенобетона и стандартной кровли, состоящей из цементно-песчаной стяжки и керамзита. Было выяснено, первый вариант кровли является более устойчив к протечкам воды, имеет меньший вес на 1 м^2 кровли и выигрывает по стоимости традиционной кровле со стяжкой по керамзиту. Однако, монолитный пенобетон допускает уклоны с меньшим градусом, чем керамзит.

6.2 Construction of a coverage with the use of foam concrete

Соломахин А. С. и Каменев Ю. А. в своем исследовании [81] предложили конструкцию покрытия с использованием неавтоклавно полимерцементного пенобетона в качестве утеплителя и поддерживающим каркасом из ЛСТК.

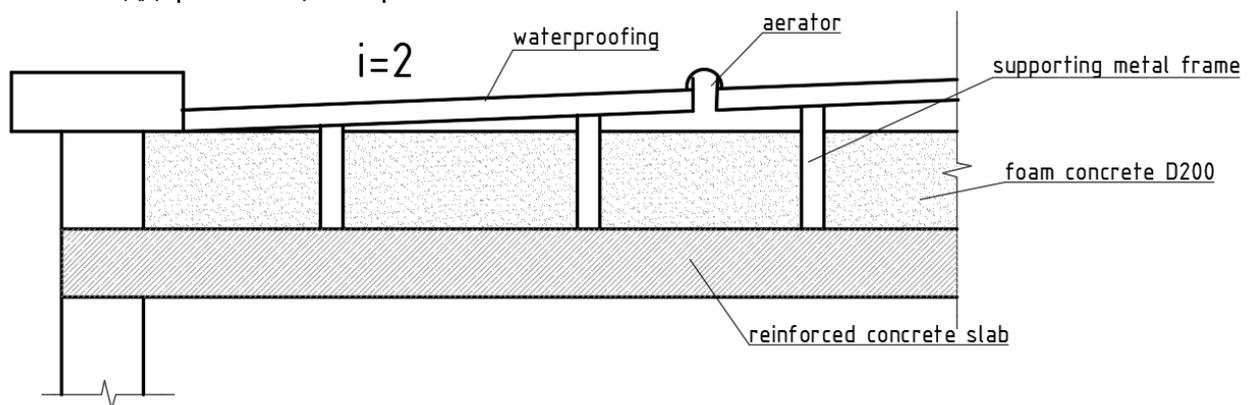


Рис. 16 Конструкция кровли с применением пенобетона
Fig.16 Construction of a roof with the use of foam concrete

Представленное покрытие представляет собой уложенный слой пенобетона с установленными в него стойками для каркаса. На стойки уложены поперечные и продольные балки, а поверх них уложен несущий слой из двух листов хризотилцементного материала. Поверх этого слоя уложена гидроизоляция из двух слоев наплавляемого материала. Между пенобетоном и поддерживающим каркасом имеется воздушный зазор, который позволяет поддерживать пенобетон в равновесном влажностном состоянии при использовании кровельных аэраторов. В качестве несъемной опалубки выступает железобетонная плита.

6.3 Construction of a mansard roof with the use of foam concrete

Пенобетон используется для утепления мансардной кровли. В данном варианте используется обрешетка из тонкостенного омега-профиля и деревянной доски. Опалубкой для пенобетона (200кг/м^3) выступает хризотилцементный лист. Несущим элементом конструкции является С-образная балка типа ГПС или оцинкованный профиль.

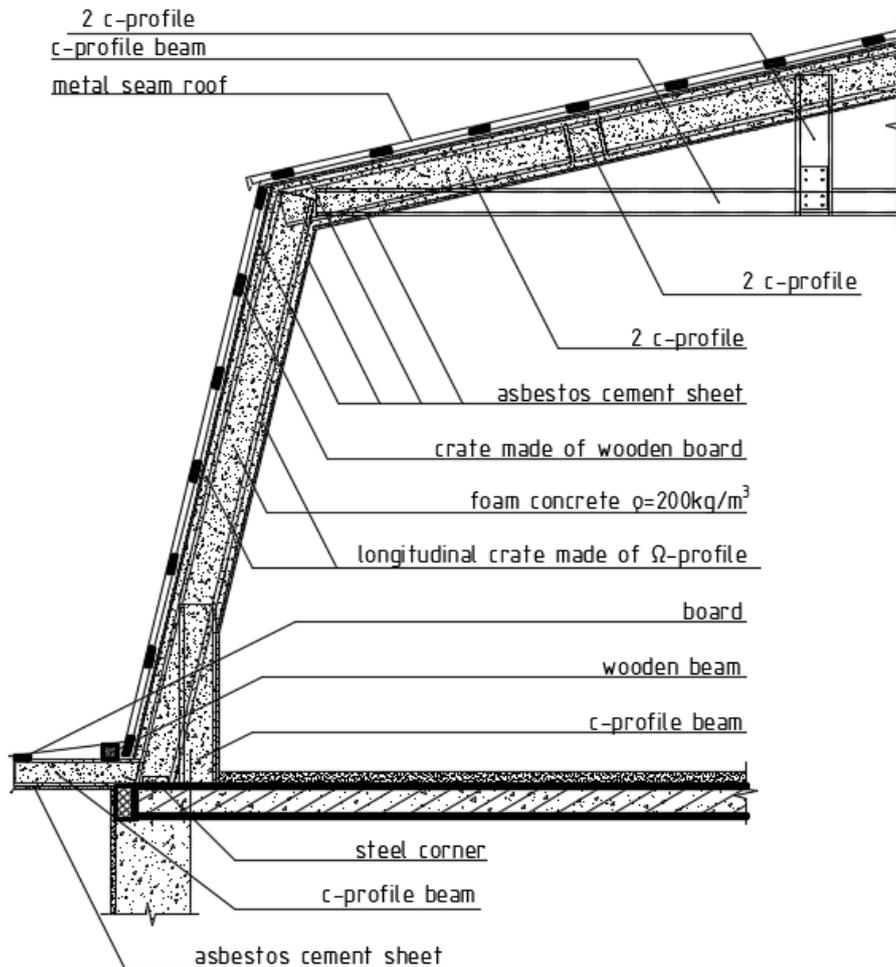


Рис. 17 Конструкция мансардной кровли с применением пенобетона
Fig.17 Construction of a mansard roof with the use of foam concrete

6.4 Roof repair using foam concrete

В работе [77] рассмотрена возможность применения монолитного пенобетона для ремонта кровель. В зависимости от несущей способности покрытия работы могут проводиться по существующей кровле, либо с полным или частичным снятием существующей кровли и утеплителя. (рис.18) Объемный вес такого бетона $300\text{--}350\text{ кг/м}^3$.

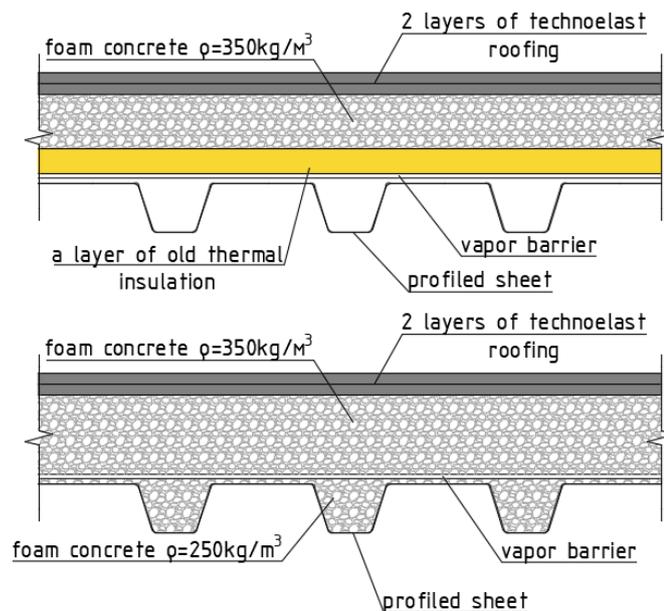


Рис. 18 Ремонт кровли с применением пенобетона
Fig.18 Roof repair using foam concrete

7 Foam concrete in road construction

Также конструкции с пенобетоном могут быть хорошей альтернативой традиционным материалам в составе дорожной насыпи, таких как грунт и щебень особенно при строительстве на слабом основании. Материал является экологичным и не создает большого давления на основание [82–85].

7.1 Road embankment with the use of foam concrete

Е.П. Медрес в [86] представил комбинированную дорожную насыпь, в которой экструзионные пенополистирольные блоки заключены в оболочку из пенобетона. Конструкция рассматривается как альтернатива традиционной дорожной насыпи для слабых грунтов.

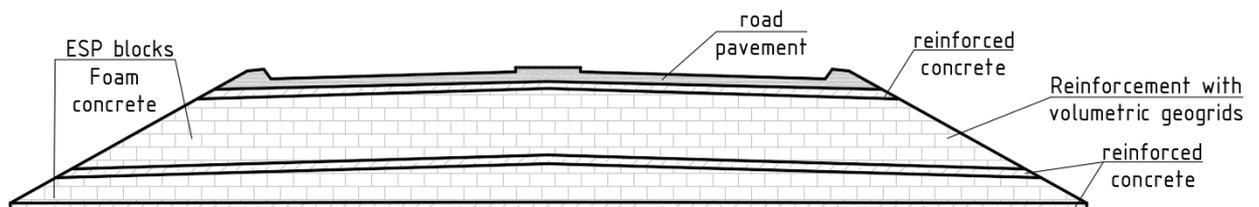


Рис. 19 Дорожная насыпь с применением пенобетона
Fig.19 Road embankment with the use of foam concrete

7.2 Construction of a road surface with a bearing base made of foam concrete

В работе [87] с целью повышения качества и снижения затрат предложен вариант дорожной одежды с несущим основанием из пенобетона. В данной конструкции пенобетон марки D800 является альтернативой традиционному щебеночному основанию, его использование позволяет снизить нагрузку на грунты, обеспечить теплоизоляцию и исключить применение катков для уплотнения несущего слоя.

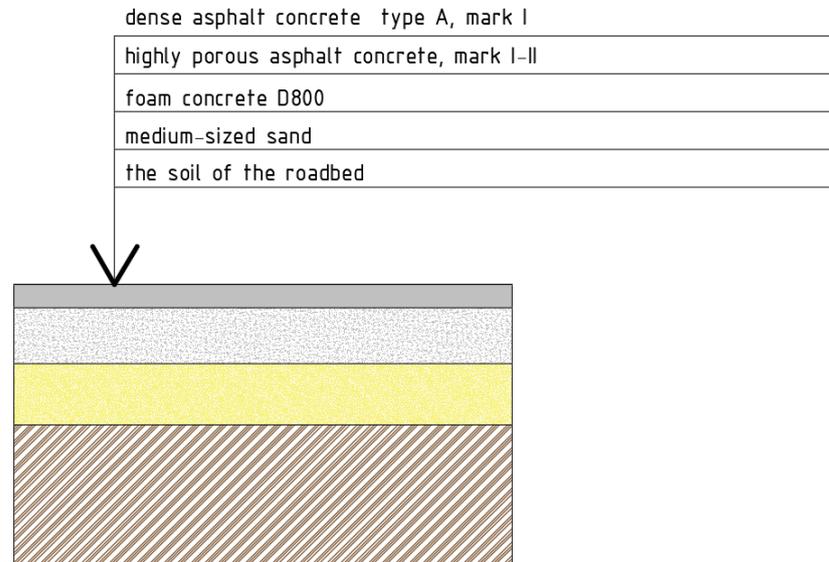


Рис. 20 Конструкция дорожной одежды с несущим основанием из пенобетона
Fig.20 Construction of a road surface with a bearing base made of foam concrete

7.3 Construction of the railway track with the use of foam concrete

Также пенобетон используется и для устройства оснований железнодорожных насыпей. В работе [88] используется пенобетон средней плотности марок D800 и D500 вместо части земляного полотна, что обеспечивает массу конструкции и обеспечивает пучино - и морозоустойчивость конструкции [89]

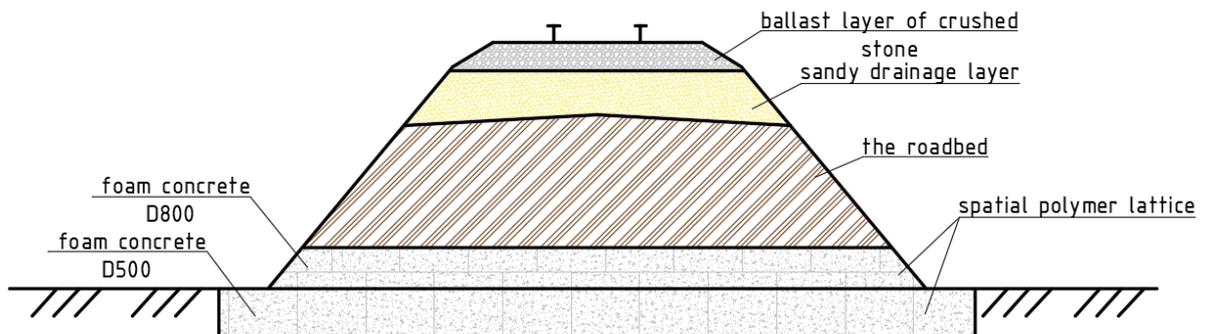


Рис. 21 Конструкция железнодорожного полотна с применением пенобетона
Fig.21 Construction of the railway track with the use of foam concrete

8 Thermal insulation of pipelines

Использование монолитного пенобетона при воздушной прокладке трубопроводов позволят значительно снизить стоимость и улучшить теплофизические показатели. Для крепления утеплителя на трубе устанавливаются центраторы с несъемной опалубкой. Пенобетон заливается через технологические отверстия в опалубке.

Л.А. Сагадеева [90] в своей работе исследовала свойства монолитного пенобетона в качестве материала для теплоизоляции трубопроводов. Результатом исследования стал вывод, что пенобетон является достаточно хорошей заменой для пенополиуретановой изоляции, которая на данный момент используется чаще всего.

9 Results and Discussion

Проанализировав все рассмотренные конструкции, можно выделить основные достоинства и недостатки конструкций с применением пенобетона в несъемной опалубке.



Общие характерные достоинства:

- высокая скорость строительства;
- низкая теплопроводность;
- относительно небольшая масса конструкции;
- простота монтажа;
- низкая пожароопасность;
- долговечность;
- пенобетон не меняет свои теплоизоляционные свойства со временем.

Общие характерные недостатки:

- низкая морозостойкость пенобетона;
- сложность возведения в зимнее время года.

В дорожном строительстве преимуществами будут:

- повышенная пучино- и морозоустойчивость конструкции;
- снижение нагрузки на грунты.

Конструкция кровли с применением пенобетона:

- более устойчива к протечкам воды, имеет меньший вес на 1 м² кровли и выигрывает по стоимости традиционной кровле со стяжкой по керамзиту;
- допускается использование в конструкциях с невысокой прочностью.

Однако монолитный пенобетон допускает уклоны с меньшим градусом, чем, например, керамзит.

10 Conclusion

В статье дана характеристика такого материала как пенобетон, а также его классификация. Выполнен обзор конструкций с применением пенобетона в несъемной опалубке, выделено 6 основных сфер применения материала: конструкции стен, конструкции перекрытий, конструкции кровли, конструкции полов, дорожное покрытие, теплоизоляция трубопроводов.

Применение пенобетона в несъемной опалубке имеет свои преимущества и недостатки, которые следует учитывать при проектировании и строительстве зданий. В целом, перспективы материала достаточно велики, он может быть применен в строительстве как экономически выгодное и эффективное решение для создания надежных и безопасных конструкций.

11 Funding

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No 23-29-00564, <https://rscf.ru/project/23-29-00564/>.

References

- 1 Mohd Nawi, M.N., Baluch, N. and Bahauddin, A.Y. (2014) Impact of Fragmentation Issue in Construction Industry: An Overview. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, **15**. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/20141501009>.
- 2 Gadde, L.E. and Dubois, A. (2010) Partnering in the Construction Industry—Problems and Opportunities. *Journal of Purchasing and Supply Management*, Pergamon, **16**, 254–263. <https://doi.org/10.1016/J.PURSUP.2010.09.002>.
- 3 Ringen, K., Seegal, J. and Englund, A. (2003) Safety and Health in the Construction Industry. *Annual Reviews* 4139 El Camino Way, P.O. Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, **16**, 165–188. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PU.16.050195.001121>.
- 4 Gvarishvili A.A., Sedova A.A. and Shoshitaishvili N.G. (2020) Fixed Formwork and Its Application. *Innovatsii i investitsii*, 253–256 <https://elibrary.ru/item.asp?id=42764981>
- 5 Bedarf, P., Calvo-Barentin, C., Dinorah, ·, Schulte, M., Senol, A., Jeoffroy, E. and Dillenburger, · Benjamin. (2023) Mineral Composites: Stay-in-Place Formwork for Concrete Using Foam 3D Printing. *Architecture, Structures and Construction* 2023 3:2, Springer, **3**, 251–262. <https://doi.org/10.1007/S44150-023-00084-X>.



- 6 Jipa, A. and Dillenburger, B. (2022) 3D Printed Formwork for Concrete: State-of-the-Art, Opportunities, Challenges, and Applications. *3D Printing and Additive Manufacturing*, Mary Ann Liebert, Inc., **9**, 84. <https://doi.org/10.1089/3DP.2021.0024>.
- 7 Kuzielova, E., Pach, L. and Palou, M. (2016) Effect of Activated Foaming Agent on the Foam Concrete Properties. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **125**, 998–1004. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.08.122>.
- 8 Montayev S.A., Shakeshev B.T., Ryskaliyev M.Z., Adilova N.B. and Narikov K.A. (2017) Collagen Agent Technology for Foam Concrete Production. *ARPN journal of engineering and applied sciences*, **12**, 1674–1678. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29685385>
- 9 Baliasnikov V. V. (2003) Penobeton Na Modifitsirovannykh Sinteticheskikh Penobrazovatelyakh. Diss. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16004915>
- 10 Huang, Z., Zhang, T. and Wen, Z. (2015) Proportioning and Characterization of Portland Cement-Based Ultra-Lightweight Foam Concretes. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **79**, 390–396. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.01.051>.
- 11 Sayadi, A.A., Tapia, J. V., Neitzert, T.R. and Clifton, G.C. (2016) Effects of Expanded Polystyrene (EPS) Particles on Fire Resistance, Thermal Conductivity and Compressive Strength of Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **112**, 716–724. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.218>.
- 12 Othuman, M.A. and Wang, Y.C. (2011) Elevated-Temperature Thermal Properties of Lightweight Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **25**, 705–716. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.07.016>.
- 13 Tan, X., Chen, W., Wang, J., Yang, D., Qi, X., Ma, Y., Wang, X., Ma, S. and Li, C. (2017) Influence of High Temperature on the Residual Physical and Mechanical Properties of Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **135**, 203–211. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.12.223>.
- 14 Kilincarslan, S., Davraz, M. and Akca, M. (2018) The Effect of Pumice as Aggregate on the Mechanical and Thermal Properties of Foam Concrete. *Arabian Journal of Geosciences*, Springer Verlag, **11**, 1–6. <https://doi.org/10.1007/S12517-018-3627-Y/METRICS>.
- 15 Slavcheva G. S. and Chernyshev E. M. (2016) Algoritm Konstruirovaniya Struktury Tsementnykh Penobetonov Po Kompleksu Zadavaemykh Svoystv. *Stroitel'nye materialy*, 58–64. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26719172>
- 16 Bugajchuk, V.A. and Baranova, A.A. (2020) Comparative Analysis of Water Absorption and Closed Porosity of Cellular Concrete. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress*, **1**, 153. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43019203>
- 17 Hamzah, W.M. (2019) Construction Working Using Foam Concretes the Study of Lightweight Concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, **10**, 25–34. https://iaeme.com/Home/article_id/IJCIET_10_06_003
- 18 Amran, Y.H.M., Farzadnia, N. and Ali, A.A.A. (2015) Properties and Applications of Foamed Concrete; A Review. *Construction and Building Materials*, Elsevier Ltd, **101**, 990–1005. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.112>.
- 19 Vasil'ev V.D. (2005) Monolitnyi Penobeton Po Tekhnologii «SOVBI». *Stroitel'nye materialy*, 39–40. <https://elibrary.ru/item.asp?id=9469590>
- 20 Jones, M.R., Ozlutas, K. and Zheng, L. (2017) High-Volume, Ultra-Low-Density Fly Ash Foamed Concrete. *Magazine of Concrete Research*, Thomas Telford Ltd, **69**, 1146–1156. <https://doi.org/10.1680/JMACR.17.00063>.
- 21 Nambiar, E.K.K. and Ramamurthy, K. (2006) Influence of Filler Type on the Properties of Foam Concrete. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **28**, 475–480. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2005.12.001>.
- 22 Kazaryan, R.R. and Khvan, V.A. (2018) Technological Processes for Manufacturing Cellular Concrete Products for Construction. *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, **931**, 634–639. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.931.634>.
- 23 Shi, M., Yin, G., Wei, P., -, al and Bartenjeva, E. (2020) The Effect of Mineral Additives on Foam Concrete Porosity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **962**, 022023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/2/022023>.
- 24 Mashkin, N. and Bartenjeva, E. (2018) Research of Structuring Processes of Non-Autoclave Foam Concrete with Introduction of Mineral Additives. *IOP Conference Series: Materials*



- Science and Engineering*, IOP Publishing, **451**, 012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012018>.
- 25 Bartenjeva, E. (2018) The Increase of Heat-Insulating Properties of Foam Concrete by Introducing Mineral Additives. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **456**, 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012036>.
- 26 Yang, Z.H., Guo, P.L., Chen, X. and Jiang, W. (2019) Heat and Humidity Performance of EPS and Rock Wool Board External Thermal Insulation System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **592**, 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/592/1/012008>.
- 27 Fu, Y., Wang, X., Wang, L. and Li, Y. (2020) Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review. *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi Limited, **2020**. <https://doi.org/10.1155/2020/6153602>.
- 28 Husna, N., Syed, A., Farhan, M., Mubarak, A., Wahab, A. and Romanova, I. (2018) The Selecting of Building Insulation Material by the Analytic Hierarchy Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **365**, 032016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032016>.
- 29 Zimele, Z., Sinka, M., Bajare, D. and Jakovics, A. (2019) Life Cycle Assessment for Masonry Exterior Wall Assemblies Made of Traditional Building Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **660**, 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/660/1/012042>.
- 30 Krival'tsevich T.V. and Gurova E.V. (2016) Sravnenie Neavtoklavnogo Penobetona s Drugimi Teploizoliatsionnymi Materialami. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport*, 508–512. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25530493>
- 31 Dzhamalov SH. G. and Otsokov K. A. (2016) Sposoby Povysheniia Effektivnosti Penobetona. *Vestnik dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 167–174. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27438317>
- 32 Fediuk, R., Amran, M., Vatin, N., Vasilev, Y., Lesovik, V. and Ozbakkaloglu, T. (2021) Acoustic Properties of Innovative Concretes: A Review. *Materials 2021, Vol. 14, Page 398*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **14**, 398. <https://doi.org/10.3390/MA14020398>.
- 33 Mechtcherine, V., Markin, V., Will, F., Nather, M., Otto, J., Krause, M., Nerella, V.N., and Schrofl, C. (2019) Production of Monolithic, Load-Bearing, Heat-Insulating Wall Structures by Additive Manufacturing with Foam Concrete. *Bauingenieur*, **94**, 405–415. https://scholar.google.com/scholar_lookup
- 34 Sherbin, S.A. and Gorbach, P.S. (2020) Foam Concrete Production with Addition of Microsilica. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **880**, 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/880/1/012021>.
- 35 Lesovik, V., Voronov, V., Glagolev, E., Fediuk, R., Alaskhanov, A., Amran, Y.H.M., Murali, G. and Baranov, A. (2020) Improving the Behaviors of Foam Concrete through the Use of Composite Binder. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **31**, 101414. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101414>.
- 36 Ivashchenko IU. G., Bagapova D. IU. and Strakhov A. V. (2017) Konstruktsionno-Teploizoliatsionnyi Penobeton, Modifitsirovannyi Voloknistym Napolnitelem. *Inzhenernyi vestnik Dona*, **4**, 157. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32731268>
- 37 Eliseeva N.N. (2010) Neavtoklavnyi Penobeton Na Osnove Stabilizatora Kolloidnoi Prirody. *Izvestiia peterburgskogo universiteta putei soobshcheniia*, 226–238. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15548722>
- 38 Akimov, L., Ilenko, N., Mizharev, R., Cherkashin, A., Vatin, N., and Chumadova, L. (2016) Composite Concrete Modifier CM 02-10 and Its Impact on the Strength Characteristics of Concrete. *Matec web of conferences*, **53**, 01022. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26307183>
- 39 Kudyakov, A.I., Kopanitsa, N.O., Prishchepa, I.A., and Shan'gin, S.N. (2013) Constructional and Heat-Insulating Foam Concretes with Thermally-Modified Peat Additive. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*, 172–177. <https://elibrary.ru/item.asp?id=18866791>
- 40 Lesovik, V.S., Glagolev, E.S., Voronov, V.V., Kh, Z.L., Fediuk, R.S., Baranov, A.V., and Svintsov, A.P. (2020) Durability Behaviors of Foam Concrete Made of Binder Composites. *Magazine of Civil Engineering*, **100**, 10003. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44591761>



- 41 Deepak N., Thiagu H. and Manivel S. (2019) Study on Strength of Metakaolin Based Foamed Concrete under Different Elevated Temperature. *ARNP J. Eng. Appl. Sci*, **14**, 2980–2986. <https://1library.net/document/qmwxv3wz-study-strength-metakaolin-foamed-concrete-different-elevated-temperature.html>
- 42 Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K. and Quéneudec, M. (2006) Physico-Mechanical Properties of Aerated Cement Composites Containing Shredded Rubber Waste. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, **28**, 650–657. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2006.05.006>.
- 43 Eltayeb, E., Ma, X., Zhuge, Y., Youssf, O. and Mills, J.E. (2020) Influence of Rubber Particles on the Properties of Foam Concrete. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **30**, 101217. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2020.101217>.
- 44 Koksai, F., Sahin, Y. and Gencel, O. (2020) Influence of Expanded Vermiculite Powder and Silica Fume on Properties of Foam Concretes. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **257**, 119547. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119547>.
- 45 Oren, O.H., Gholampour, A., Gencel, O. and Ozbakkaloglu, T. (2020) Physical and Mechanical Properties of Foam Concretes Containing Granulated Blast Furnace Slag as Fine Aggregate. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **238**, 117774. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117774>.
- 46 Slavcheva G. S., Chernyshov E. M. and Novikov M. V. (2017) Teploeffektivnye Penobetonny Novogo Pokoleniia Dlia Maloetazhnogo Stroitel'stva. *Stroitel'nye materialy*, <https://elibrary.ru/item.asp?id=29827201>
- 47 Seleznev I. G. (1995) Penobeton Dlia Monolitnogo Domostroeniia. **Diss.**, 1–197. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15961836>
- 48 Udachkin V.I. (2000) Malousadochnyi Neavtoklavnyi Beton Dlia Sbornogo i Monolitnogo Stroitel'stva. **Diss.** <https://elibrary.ru/item.asp?id=15961836>
- 49 Bel'kova N. A. and Ivashchenko E. I. (2022) Fibroarmirovannye Penobetonny Neavtoklavnogo Tverdeniia Na Osnove Bazal'tovoi i Poliamidnoi Fibr: Osnovnye Kharakteristiki. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, **2**, 97–104. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49232634>
- 50 Kotova K. S. (2019) Vliianie Kharakteristik Makroporistoi Struktury Penobetona Na Parametry Ego Stseplenii s Armaturoi. *Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU*, **4**, 144–154. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41535588>
- 51 Amran, Y.H.M., Farzadnia, N. and Ali, A.A.A. (2015) Properties and Applications of Foamed Concrete; a Review. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **101**, 990–1005. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.112>.
- 52 Mestnikov A. E. and Rozhin V. N. (2017) Neavtoklavnyi Penobeton Na Mekhanoaktivirovannykh Sukhikh Smesiakh Dlia Stroitel'stva v Usloviakh Arktiki. *Fundamental'nye osnovy stroitel'nogo materialovedeniia*, 1037–1046. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36305922>
- 53 Wagh, C.D., Indu Siva Ranjani, G. and Kamisetty, A. (2021) Thermal Properties of Foamed Concrete: A Review. *RILEM Bookseries*, Springer Science and Business Media B.V., **29**, 113–137. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51485-3_9/COVER.
- 54 Steshenko, A.B. and Kudyakov, A.I. (2018) Cement Based Foam Concrete with Aluminosilicate Microspheres for Monolithic Construction. *Magazine of Civil Engineering*, St-Petersburg State Polytechnical University, **84**, 86–96. <https://doi.org/10.18720/MCE.84.9>.
- 55 Steshenko A. B. and Al K. (2015) Rannee Strukturoobrazovanie Penobetonnoy Smesi s Modifitsiruyushey Dobavkoy. *Magazine of Civil Engineering*, 54. <https://elibrary.ru/item.asp?id=23139926>
- 56 Mashkin N. A., Kudiakov A. I. and Barten'eva E. A. (2018) Neavtoklavnyi Penobeton, Dispersno-Armirovannyi Mineral'nymi i Voloknistymi Dobavkami. *News of higher educational institutions*, 58–68. <https://elibrary.ru/item.asp?id=36685110>
- 57 Luo, D., Zou, X. and Kiyane, A. V. Energy Efficient Wall Design with Stay-in-Place Formwork You May Also like Analysis of GMT Composite Material-Based Building Formwork Energy Efficient Wall Design with Stay-in-Place Formwork. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/2/022079>.



- 58 Li, J., Chen, Z., Chen, W. and Xu, Z. (2020) Seismic Performance of Pre-Cast Self-Insulation Shear Walls Made by a New Type of Foam Concrete with High Strength and Low Thermal Conductivity. *Structures*, Elsevier, **24**, 124–136. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.01.001>.
- 59 Prabha, P., Palani, G.S., Lakshmanan, N. and Senthil, R. (2018) Flexural Behaviour of Steel-Foam Concrete Composite Light-Weight Panels. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Springer Verlag, **22**, 3534–3545. <https://doi.org/10.1007/S12205-018-0827-7/METRICS>.
- 60 Kostyuk, A. and Kovtunenکو, D. (2016) An Experimental Research of the Combined Joints of Wall Panels from the Natural Hardening Foam Concrete. *Tehnički glasnik, Sveučilište Sjever*, **10**, 124–127. <https://hrcak.srce.hr/171833>
- 61 Rybakov, V.A. (2020) Condition Load Effect Factor of Profile Steel in Lightweight Steel Concrete Structures; 2020; Construction of Unique Buildings and Structures. **89**, 8907. <https://doi.org/10.18720/CUBS.89.7>.
- 62 Rybakov, V.A., Kozinetc, K.G., Vatin, N.I., Velichkin, V.Z. and Korsun, V.I. (2018) Lightweight Steel Concrete Structures Technology with Foam Fiber-Cement Sheets. *Magazine of Civil Engineering*, St-Petersburg State Polytechnical University, **82**, 103–111. <https://doi.org/10.18720/MCE.82.10>.
- 63 Gerasimov D. V., SHin L. A. and Rybakov V. A. (2020) Sravnitel'nyi Analiz Tekhniko-Ekonomicheskikh Pokazatelei Karkasno-Obshivnykh i Legkikh Stalebetonnykh Stenovykh Panelei. Regional'nye Aspekty Razvitiia Nauki i Obrazovaniia v Oblasti Arkhitektury, Stroitel'stva, Zemleustroistva i Kadastrov v Nachale III Tysiacheletia, 184–288. <https://elibrary.ru/item.asp?id=44864579>
- 64 Rybakov V. A. (2019) Teplotekhnicheskie i Mekhanicheskie Svoistva Legkikh Stalebetonnykh Konstruktsii (LSBK). Effektivnye Konstruktsii, Materialy i Tekhnologii v Stroitel'stve., 107–115. <https://elibrary.ru/item.asp?id=42311333>
- 65 Nouruzi M. Sh. and Al'-KHasnavi IA. S. G. (2017) Armirovanie Perekrytiia Iz Legkikh Stalnykh Tonkostennykh Konstruktsii s Zapolneniem lacheistym Betonom. Nauka i Innovatsii v Stroitel'stve, 89–94. <https://elibrary.ru/item.asp?id=29881579>
- 66 Rybakov, V., Seliverstov, A., Usanova, K., Rayimova, I., Rybakov, V., Seliverstov, A., Usanova, K. and Rayimova, I. (2021) Combustibility of Lightweight Foam Concrete Based on Natural Protein Foaming Agent. *E3SWC*, EDP Sciences, **264**, 05001. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202126405001>.
- 67 Verbitskaia E. V. (2016) Konstruktivnoe Reshenie i Dostoinstva Fasadnoi Sistemy Iz Penobetona i Metallicheskogo Profilirovannogo Lista. *Polzunovskii al'manakh*, 52–55. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28091543>
- 68 Lundyshev I. A. (2013) Primenenie Dereviannogo Karkasa v Maloetazhnom Domostroenii s Utepleniem Monolitnym Penobetonom. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*, 28–31. <https://elibrary.ru/item.asp?id=20276906>
- 69 Rakova, A. V. (2021) Ograzhdaiushchie Konstruktsii Iz Penobetona. Sposoby Vozvedeniia Iz Penobetona. VI Mezhdunarodnyi Studencheskii Stroitel'nyi Forum, 93–97. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48227624>
- 70 Vytchikov Yu.S., Saparev M.Ye. and Golikov V.A. (2018) The Use of Monolithic Foam Concrete in Enclosing Structures of Buildings and Structures with Variable Thermal Conditions. *Urban Construction and Architecture*, **8**, 10–14. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2018.04.2>.
- 71 Liu, D., Fu, F. and Liu, W. (2021) Structural Behavior of Composite Floor System Using Cold-Formed Thin-Walled C Steel Channel Embedded Foam Concrete. *Applied Sciences 2021, Vol. 11, Page 9888*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **11**, 9888. <https://doi.org/10.3390/APP11219888>.
- 72 Shabbar, R.C., Noordin, N., Dawood, E.T. and Zailan Sulieman, M. (2010) Comparison between Ribbed Slab Structure Using Lightweight Foam Concrete and Solid Slab Structure Using Normal Concrete. *Concrete Research Letters*, **1**. <https://d1wqtxts1xzle7w>
- 73 Proizvodstvo Bystrovozvodimykh Zdanii Iz Legkikh Metallokonstruktsii, Proektirovanie Bystrovozvodimykh Zdanii i Sooruzhenii Iz LSTK. <http://andrometa.ru/>.
- 74 Verbitskii, I.O. (2016) Primenenie Metallicheskogo Profilirovannogo Lista v Kachestve Nesushchego Elementa Monolitnykh Perekrytii Iz Penobetona. *Polzunovskii al'manakh*, 55–58. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28091544>



- 75 Kadela, M. and Kozłowski, M. (2016) Foamed Concrete Layer as Sub-Structure of Industrial Concrete Floor. *Procedia Engineering*, No longer published by Elsevier, **161**, 468–476. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.08.663>.
- 76 Mohd Azaman, N.A., Abd Ghafar, N.H., Ayub, N. and Ibrahim, M.Z. (2017) Vibration Behaviour of Foamed Concrete Floor with Polypropylene and Rise Husk Ash Fibre. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **271**, 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012014>.
- 77 Sergeev A. S., Sukhorebrov D. G. and Pirieva S. IU. (2015) Primenenie Penobetona v Maloetazhnom Stroitel'stve. Mezhdunarodnaia Nauchno-Tekhnicheskaiia Konferentsiia Molodykh Uchenykh BGTU Im. VG Shukhova, 2513–2517. <https://elibrary.ru/item.asp?id=24615625>
- 78 Meng, E., Yang, J., Zhou, B., Wang, C. and Li, J. (2022) Preparation and Thermal Performance of Phase Change Material (PCM) Foamed Cement Used for the Roof. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **53**, 104579. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104579>.
- 79 Khudoerbekov E. S. and Sysoev O. E. (2021) Ispolzovanie Legkogo Betona Pri Proizvdsve Krovnykh Rabot (Penobeton). Molodezh' i Nauka: Aktual'nye Problemy Fundamental'nykh i Prikladnykh Issledovani, 125–128. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46459613>
- 80 Remnev V. V. (2020) The Practice of the Effective Use of Non-Autoclaved Foam Concrete. Bulletin of Science and Research Center of Construction, 91–97. <https://elibrary.ru/ekfuua>
- 81 Solomakhin A. S. and Kamenev IU. A. (2016) Primenenie Neavtoklavnogo Polimertsementnogo Penobetona i Podderzhivaiushchego Karkasa Iz LSTK v Teploizolatsionnykh Konstruktsiakh Pokrytii Zdanii, Sooruzhenii. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka*, 34–36. <https://elibrary.ru/item.asp?id=26290895>
- 82 Kadela, M., Kozłowski, M. and Kukielka, A. (2017) Application of Foamed Concrete in Road Pavement – Weak Soil System. *Procedia Engineering*, No longer published by Elsevier, **193**, 439–446. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.06.235>.
- 83 Ge, Z., Yuan, H., Sun, R., Zhang, H., Wang, W. and Qi, H. (2020) Use of Green Calcium Sulphoaluminate Cement to Prepare Foamed Concrete for Road Embankment: A Feasibility Study. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **237**, 117791. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117791>.
- 84 Cai, D.G., Wei, S.W., Ye, Y.S., Zhang, Q.L., Li, Z.G. and Li, S. (2021) Mechanical Properties of Lightweight Foam Concrete Filler for Roadbed of High-Speed Railway. *Arabian Journal of Geosciences*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **14**, 1–10. <https://doi.org/10.1007/S12517-021-07115-1/FIGURES/15>.
- 85 Decký, M., Drusa, M., Zgútová, K., Blaško, M., Hájek, M. and Scherfel, W. (2016) Foam Concrete as New Material in Road Constructions. *Procedia Engineering*, No longer published by Elsevier, **161**, 428–433. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.08.585>.
- 86 Medres E.P. (2012) The Combined Road Embankment on Weak Soil Application of EPS-Blocks and Foam Concrete. *Bulletin of Civil Engineers*, 199–203. <https://elibrary.ru/item.asp?id=19002483>
- 87 Lesina L.L., M.L.S., E.S.G. (2018) The Methodology of Calculating and Designing of Pavement with Load-Bearing Structure from Foam Concret. *Scientific challenges of logistical support of the armed forces of the Russian Federation*, 108–116. <https://elibrary.ru/yqwszn>
- 88 Sycheva A. M., Solomakhin A. S., IAsnova N. S., Kamenev IU. A., Abukhasan M. S. and Rusanova E. V. (2017) Primenenie Polimertsementnogo Penobetona Dlia Povysheniia Sroka Sluzhby Zheleznodorozhnogo Polotna. *Transport construction*, 21–23. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30048658>
- 89 Sychova, A., Sychov, M. and Rusanova, E. (2017) A Method of Obtaining Geoniseprotective Foam Concrete for Use on Railway Transport. *Procedia Engineering*, No longer published by Elsevier, **189**, 681–687. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.05.108>.
- 90 Sagadeeva L. A. (2022) Ispolzovanie Monolitnogo Penobetona Dlia Teploizolatsii Truboprovodov. Tinchurinskie Chteniia-2022" Energetika i Tsifrovaia Transformatsiia", 180–182. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49190416>