2023. 19(3). 302–312

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ

STRUCTURAL MECHANICS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS AND BUILDINGS

ISSN 1815-5235 (Print), 2587-8700 (Online)

HTTP://JOURNALS.RUDN.RU/STRUCTURAL-MECHANICS

DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-3-302-312
EDN: QBSENQ
УДК 69.04

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Изгибная жесткость легких сталебетонных панелей перекрытий из пенобетона низкой плотности

В.А. Рыбаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация
fishermanoff@mail.ru

История статьи
Поступила в редакцию: 19 апрель 2023 г.
Доработана: 12 июня 2023 г.
Принята к публикации: 16 июня 2023 г.

Благодарности
Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00564, https://rscf.ru/project/23-29-00564. Автор выражает благодарность ООО «СОВБИ» в лице генерального директора Анатолия Владимировича Селиверстова за изготовление образцов панелей для испытаний и научно-испытательной лаборатории «Политех-СКиМ-Тест» в лице заведующего Станислава Васильевича Акимова за содействие в проведении испытаний.

Для цитирования
Рыбаков В.А. Изгибная жесткость легких сталебетонных панелей перекрытий из пенобетона низкой плотности // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 3. С. 302–312. http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-302-312

Аннотация. Легкие сталебетонные конструкции (ЛСБК) относятся к сталебетонным конструкциям, в которых в качестве заполняющего бетона выступает монолитный (заливочный) пенобетон марки D100–D1000, в качестве профильной стали – легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК), а функцию несъемной опалубки выполняют фиброцементные панели. Как правило, в данных конструкциях используется конструкционно-теплоизоляционный пенобетон, обладающий хорошими теплотехническими характеристиками и достаточной прочностью. Исследованы легкие сталебетонные панели перекрытия, являющиеся одним из частных случаев ЛСБК, выполненные из монолитного пенобетона марки по плотности D400. Проведен анализ изгибной жесткости панелей перекрытий из ЛСБК на основе сопоставления экспериментальных данных с аналитическим расчетом. Установлено, что изгибаемые ЛСБК из монолитного пенобетона марки по плотности D400 работают физически нелинейно; на линейном участке работы показана допустимость определения изгибной жесткости панелей перекрытий из ЛСБК как суммы жесткостей профильной стали и пенобетона. Продемонстрирована достоверность предложенной методики в пределах линейной работы. Экспериментально и теоретически доказано, что изгибная жесткость панелей на основе ЛСБК больше изгибной жесткости аналогичных панелей из ЛСТК на величину около 30 %.

Ключевые слова: легкие сталебетонные конструкции, панели перекрытий, профильная сталь, изгибная жесткость, пенобетон

Рыбаков Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент, Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-2299-3096; fishermanoff@mail.ru

© Рыбаков В.А., 2023
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode

Flexural stiffness of lightweight steel-concrete slab panels made of low-density foam concrete

Vladimir A. Rybakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation
fishermanoff@mail.ru

Article history
Received: April 19, 2023
Revised: June 12, 2023
Accepted: June 16, 2023

Acknowledgements
The study was funded by the Russian Science Foundation Grant No. 23-29-00564, https://rscf.ru/project/23-29-00564.
The author expresses his gratitude to the SOVBI, LLC represented by the General Director Mr. Anatoly Vladimirovich Seliverstov for the production of panels' samples for testing and to the scientific and testing laboratory "Politech-SKiM-Test" represented by the head Mr. Stanislav Vasilievich Akimov for assistance in carrying out the experiments.

For citation
Rybakov V.A. Flexural stiffness of lightweight steel-concrete slab panels made of low-density foam concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* 2023;19(3):302–312. (In Russ.) http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-3-302-312

Abstract. Lightweight steel-concrete structures (LSCS) are a type of steel-concrete structures where the filling concrete is monolithic (pouring) foam concrete with density 100–1000 kg/m^3, the profile steel is lightweight steel thin-walled structures (LSTS), and fiber cement panels perform the function of non-removable formwork. As a rule, these structures are made of structural and heat-insulating foam concrete, which has good insulation and technical characteristics and sufficient strength. The object of the study is lightweight steel-concrete slab panels, which are one of the special cases of LSCS, made of monolithic foam concrete with density of 400 kg/m^3. An analysis of the bending stiffness of LSBC slab panels by comparing the experimental data with analytical calculations was carried out. It was found that bendable LSCS made of monolithic foam concrete with density of 400 kg/m^3 operate in physical nonlinear way. It was shown that the bending stiffness of LSCS floor panels can be determined as the sum of stiffnesses of profiled steel and foam concrete at the linear stage of work. The reliability of the proposed methodology within the limits of linear operation was demonstrated. It was proved both experimentally and theoretically that the bending stiffness of panels based on LSCS is higher than the bending stiffness of similar panels made of lightweight thin-walled steel (LTSS) by about 30%.

Keywords: lightweight steel concrete structures, slab panels, profiled steel, flexural stiffness, foam concrete

1. Введение

Панельное домостроение появилось в середине XX в. и с тех пор является крайне востребованным [1]. Использование готовых изделий (панелей) обладает рядом преимуществ, таких как низкие сроки строительства, снижение затрат на внутреннюю отделку и, как следствие, пониженная стоимость недвижимости в панельных домах [2].

Легкие сталебетонные конструкции (ЛСБК) [3; 4] – вид конструкций, в которых в качестве заполняющего бетона выступает монолитный (заливочный) пенобетон марки D100–D1000, в качестве профильной стали, как правило, – легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) [5], а функцию несъемной опалубки выполняют фиброцементные панели. Расчетные усилия от всех воздействий воспринимаются пенобетоном и профильной сталью. Аналогичные конструкции из прокатных металлических профилей также могут быть отнесены к ЛСБК.

Объект исследования в данной работе – легкие сталебетонные панели перекрытий, являющиеся одним из частных случаев ЛСБК, в которых используется монолитный (заливочный) пенобетон марки D400.

Как правило, в данных панелях используется *конструкционно-теплоизоляционный пенобетон*, обладающий хорошими теплотехническими характеристиками [4] и достаточной прочностью.

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

Vladimir A. Rybakov, PhD in Engineering, Associate Professor, Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2299-3096; fishermanoff@mail.ru

В [6] 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/м^3 на 2,9–3,15 МПа.

В [7] показано, 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 [8], метакаолин [9], измельченная резина [10; 11], микрокремнезем [12] и доменный шлак [13].

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 [14] авторы экспериментально исследовали пенобетон плотностью 1200 кг/м^3 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/м^3.

В [15] 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/м^3 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.

Ряд научных работ выполнен под руководством профессора Л.Р. Маиляна. В [16] обоснована возможность повышения физико-механических характеристик различных видов пенобетонов с помощью затворения воды с пониженной температурой. В [17] разработан матричный состав пенобетонной смеси для введения полиамидной фибры, показавший улучшенную адгезию с цементной матрицей с сохранением прочностных свойств.

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 [18; 19]. Усадка ухудшает пористую структуру пенобетона, и, как следствие, снижается прочность и увеличивается теплопроводность пенобетона [20].

В рассмотренных выше работах изучены физико-механические, теплотехнические и прочие свойства пенобетона в несущих и ограждающих конструкциях (крыши, полы, стены и др.) без наличия профильной стали в конструкции. Полученные всеми указанными авторами результаты не дают ответов на обозначенную ранее проблему изучения свойств ЛСБК.

На сегодняшний день нормативно-техническая база в России в области ЛСБК недостаточно развита. Основным нормативным документом является СТО 06041112.002–2018 (с изм. 1, 2) «Сталебетонные конструкции из теплоизоляционного неавтоклавного монолитного пенобетона, профильной стали с облицовкой фиброцементными листами. Правила проектирования». Кроме того, имеется нормативный документ СТО 06041112.001–2018 (с изм. 1, 2) «Панели из сталебетонных конструкций на основе теплоизоляционного неавтоклавного монолитного пенобетона, профильной стали с облицовкой фиброцементными листами» на отдельный подвид ЛСБК – легкие сталебетонные панели (ЛБП).

В научной литературе теплотехнические, механические и иные физические свойства ЛСБК являются малоизученными. Известные публикации [21–25] как отдельных авторов – Я.С.Г. Аль-Хаснави, Н.Н. Ласькова, О.Н. Ефимова, Ф.С. Замалиева, М.Ш. Ноурузи, И.С. Гучкина, В.О. Булавенко, так и авторских коллективов, посвящены теоретическому и экспериментальному исследованию прочностных и деформационных свойств сталебетонных балок из стальных тонкостенных профилей и монолитного пенобетона различных классов прочности на сжатие от В2,5 [21] до В25 [23]. Бетоны указанного диапазона прочности имеют класс плотности не ниже D500, являются конструкционными, относятся к материалам конструкций, включенных в СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», и поэтому могут быть рассчитаны по методикам для бетонных и железобетонных конструкций с жесткой арматурой.

Исследованию прочностных характеристик ЛСБК с использованием пенобетонов марок ниже D500, являющихся по своей сути теплоизоляционными, посвящены наши ранее опубликованные работы [26; 27], где предлагался метод расчета ЛСБК, основанный на формулах расчета стальных конструкций, но с применением повышающего коэффициента условий работы.

При этом в [28] показано, что сам по себе теплоизоляционный пенобетон марок D200–D400 обладает крайне низкой прочностью. Величину фактического сопротивления пенобетона в расчете на прочность самой конструкции невозможно учесть: роль такого пенобетона в конструкции сводится к предотвращению стесненного кручения, депланации и местных эффектов

Однако, помимо условия прочности, несущие горизонтальные элементы конструкций должны удовлетворять требованиям по жесткости (предельным прогибам), соответственно, данный аспект панелей перекрытий из ЛСБК, в которых используется монолитный пенобетон марки D400 по плотности, должен быть проанализирован отдельно, что и является **целью исследования**.

Для достижения цели поставлены задачи:

1. Экспериментально измерить перемещения в середине пролета двух образцов панелей из ЛСБК на основе теплоизоляционного неавтоклавного монолитного пенобетона марки D400, профильной стали с облицовкой фиброцементными листами.

2. Аналитически определить перемещения с учетом пенобетона и без его учета.

3. Сопоставить аналитические результаты с экспериментальными.

2. Материалы и методы

Схема образцов для испытаний на изгиб представлена на рис. 1.

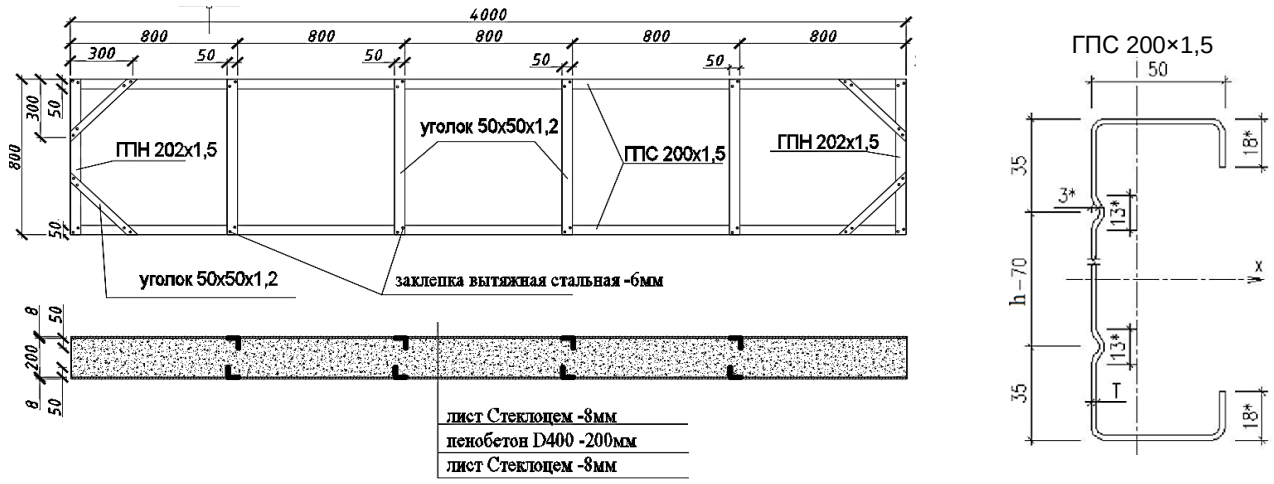

Рис. 1. Конструкция панели перекрытия для испытания на изгиб

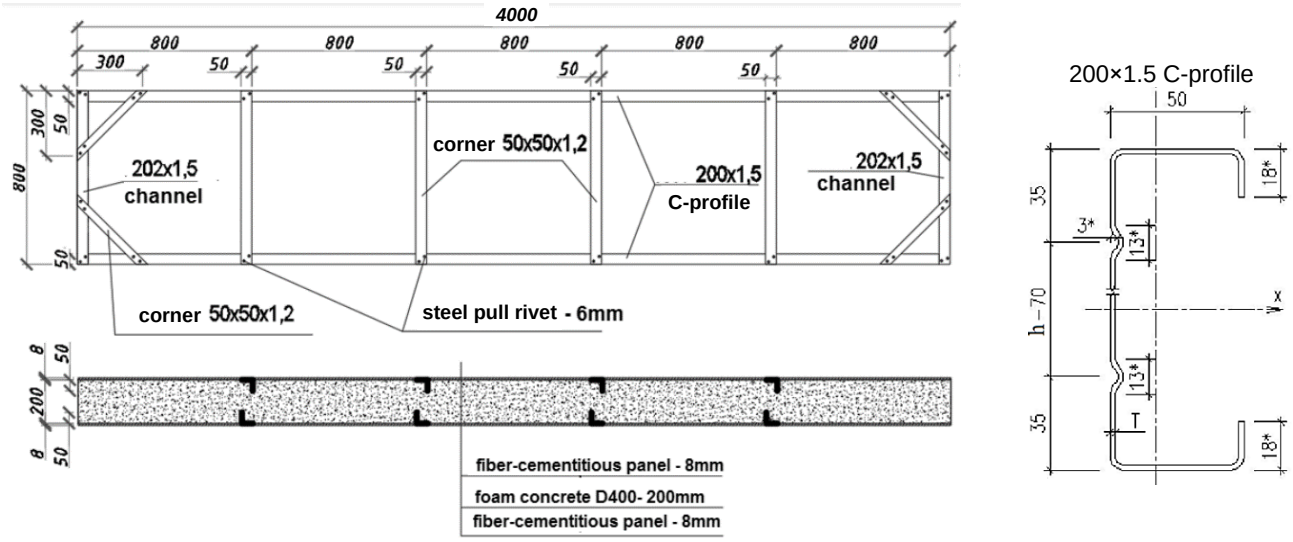

Figure 1. Slab panel design for bending test

Профиль типа ГПС принят по ТУ 1121-001-87370376–2015 «Профили стальные гнутые. Технические условия» (ООО «Сталь-Профиль») и имеет размеры 200×50×1,5.

Момент инерции одиночного сечения I_1 = 262,61 см^4.

Фиброцементные листы марки «Стеклоцем» приняты по ТУ 5742-008-53743439-12 «Листы стекломагнезитовые огнестойкие „СТЕКЛОЦЕМ“. Технические условия».

Внешний вид одного из образцов представлен на рис. 2, на котором наружная облицовочная панель временно снята для наглядности.

Экспериментальная установка изображена на рис. 3, *а*. Панели на основе ЛСБК и ЛСТК размерами 4000×800×216 мм свободно опираются на специальные шарнирные опоры, на которые во избежание местного продавливания панели уложена стальная жесткая пластина (рис. 3, *б*). Таким образом, свободный пролет испытываемых панелей оказался равным L = 3,85 м.

Рис. 2. Внешний вид образцов панелей ЛСБК (фото автора)
Figure 2. Appearance of the LSCS panels samples (photo by author)

а

б

Рис. 3. Экспериментальная установка (фото автора)
Figure 3. Experimental setup (photo by author)

Нагружение происходило с помощью трех гидравлических домкратов, соединенных в единую систему, поддерживающую равенство усилий в каждом из них, упирающихся в жесткую металлическую

траверсу в виде стального условно недеформируемого швеллера, закрепленного к силовому полу с помощью двух стоек.

Домкраты передают усилия через распределительные металлические элементы на бетонные призмы сечением 150×150 мм и длиной 800 мм, совпадающей с шириной панели. Данные бетонные призмы (6 шт.) имитируют сосредоточенную нагрузку на испытываемую панель. Между панелью и бетонным призмами во избежание разрушения по бетону проложены деревянные прокладки по всей поверхности контакта призм и панели.

Таким образом, в экспериментальной установке (рис. 3, *а*) каждый домкрат передает на панель по две полосовые (перпендикулярно пролету) нагрузки, что в совокупности соответствует балке с шестью сосредоточенными нагрузками, расположенными на равном расстоянии друг от друга (рис. 4). Данное загружение можно считать эквивалентным равномерно распределенной нагрузке.

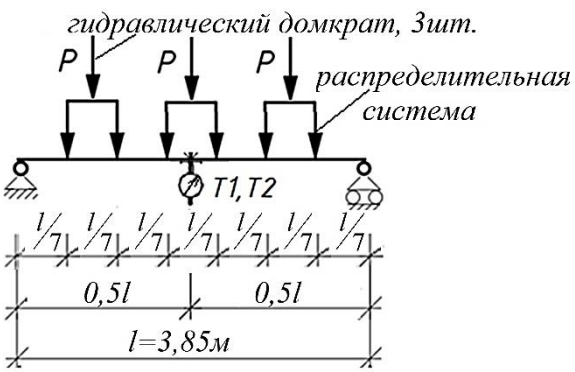

Рис. 4. Испытательная схема

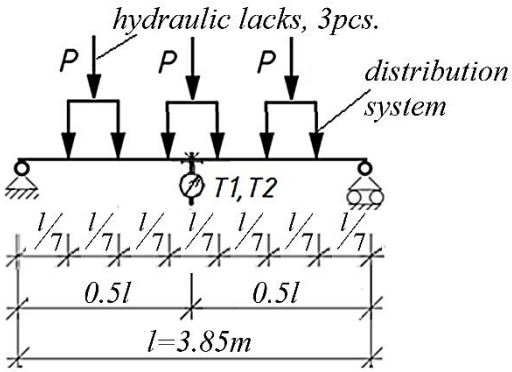

Figure 4. The test scheme

Общий вес распределительных элементов составил 2,55 кН.

Измерение перемещений производилось с помощью тензометров Т1 и Т2, расположенных посередине пролета плиты – с двух ее сторон. Исследовано два образца панелей.

В качестве аналитической модели эксперимента примем балку с эпюрой моментов, представленной на рис. 5.

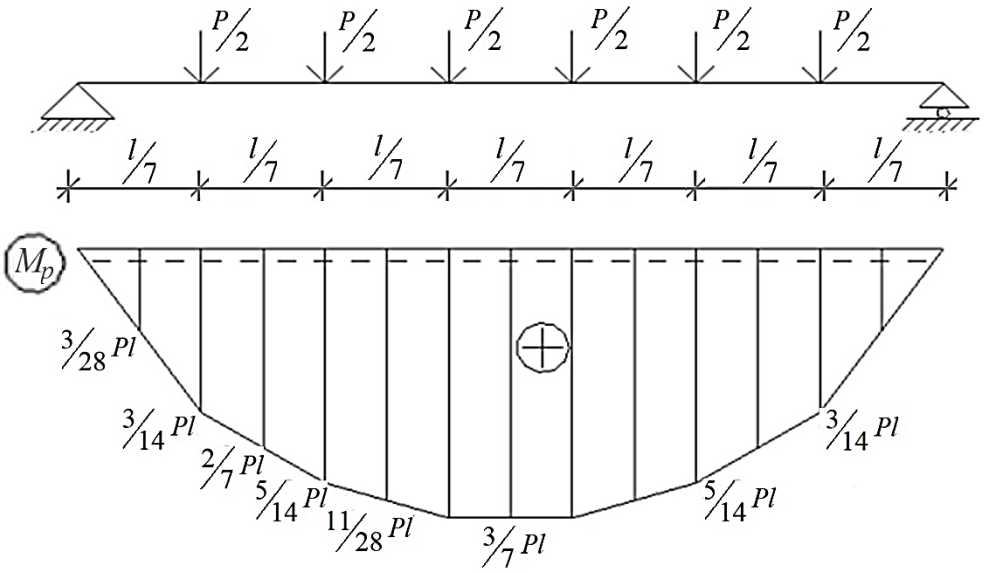

Рис. 5. Расчетная схема и эпюра изгибающих моментов от заданной нагрузки
Figure 5. Calculation scheme and diagram of bending moments from the specified load

Для определения перемещения рассмотрим вспомогательное загружение системы единичной силой с эпюрой моментов на рис. 6.

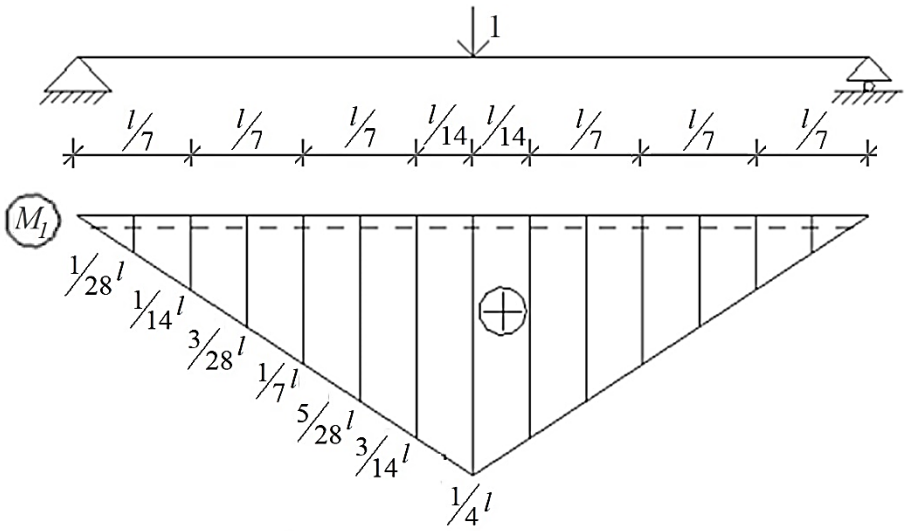

Рис. 6. Расчетная схема и эпюра моментов от единичной силы
Figure 6. Calculation scheme and diagram of bending moments from a unit load

Для определения перемещений воспользуемся формулой Максвелла – Мора (1) и, подставив значения эпюр (рис. 5–6), получим результат:

$$D_{1p} = \int \frac{M_p M_1}{EI} ds = \frac{123}{2744} \cdot \frac{Pl^3}{EI}. \quad (1)$$

Определим изгибную жесткость конструкции на изгиб как сумму жесткостей пенобетона и профильной стали:

$$EI = E_b I_b + E_s I_s . \quad (2)$$

3. Результаты и обсуждение

Расчетные значения моментов инерции для пенобетона и для профильной стали типа ГПС (2 шт., рис. 1) составят соответственно

$$I_b = \frac{bh^3}{12} = \frac{0{,}8 \cdot 0{,}2^3}{12} 5{,}33333 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4; \qquad I_s = 2 I_1 = 5{,}2522 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4. \quad (3)$$

Модули деформации пенобетона и профильной стали $E_b = 960 \cdot 10^6$ Па (для марки пенобетона при средней плотности D400, СТО 06041112.002[1]); $E_s = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па.

Проанализируем прогибы в упругой стадии работы и до достижения значений, предельно допустимых по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»:

$$f_u = \frac{l}{200} = 19{,}25 \text{ мм}. \quad (4)$$

Фактические значения плотностей образцов измерены после вскрытия конструкций по завершении эксперимента и отличаются от заявленных. Следовательно, изменится и значение модулей упругости:

– для образца 1: $\rho_1 = 413$ кг/м^3 и $E_{b1} = 1075 \cdot 10^6$ Н/м^2;

– для образца 2: $\rho_2 = 325$ кг/м^3 и $E_{b1} = 669 \cdot 10^6$ Н/м^2.

[1] СТО 06041112.002–2018 (с изм. 1, 2). Сталебетонные конструкции из теплоизоляционного неавтоклавного монолитного пенобетона, профильной стали с облицовкой фиброцементными листами. Правила проектирования. СПб., 2018. 96 с.

Допустимое отклонение средней плотности пенобетона по стандарту российской организации ООО «СОВБИ» СТО 06041112.001, приложение Е[2] относительно марки D400 для серии образцов составляет 39 кг/м^3 для первой категории качества. Отклонение средней плотности пенобетона образца 1 не превышает допустимого значения, а для образца 2 превышает допустимое значение на 36 кг/м^3. Однако это несоответствие не повлияет существенно на результаты исследования, так как у данного образца наибольшая несущая способность.

Расчетные значения прогибов и их сравнение с экспериментальными значениями для двух образцов представлены на рис. 7–8.

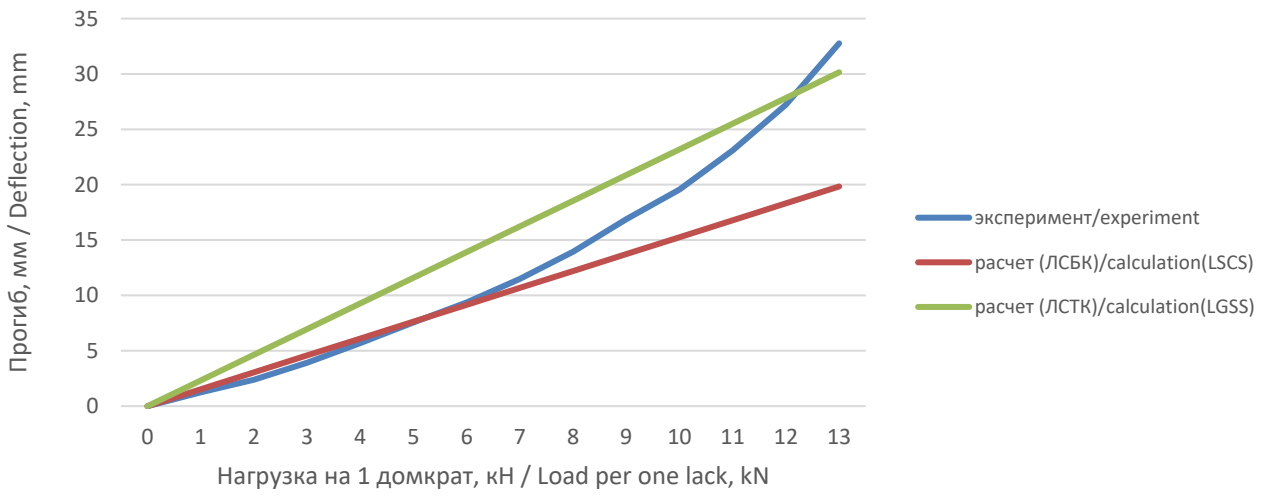

Рис. 7. График деформирования, образец 1
Figure 7. Deformation graph, sample 1

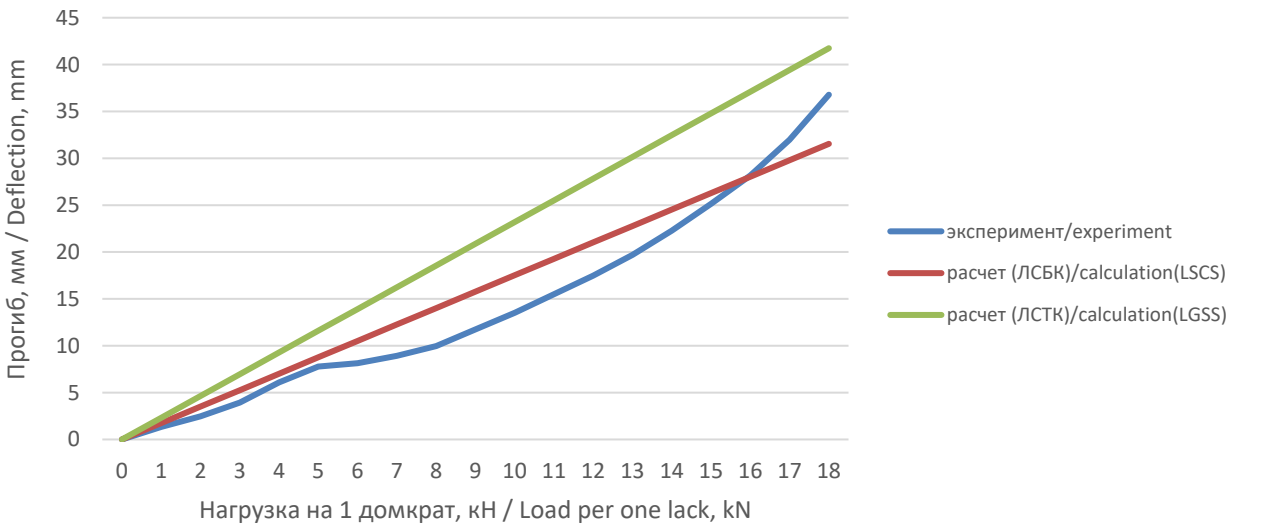

Рис. 8. График деформирования, образец 2
Figure 8. Deformation curve, sample 2

В образце 1 максимальная нагрузка составила 12,75 кН на один домкрат. При усилии в каждом домкрате, равном 9,88 кН (что соответствует равномерно распределенной нагрузке на плиту 9,44 кН/м^2), фактический прогиб достигнет предельно допустимого значения f_u = 19,25мм (что соответствует расчетному прогибу по линейной методике, равному 15,265 мм, и 78 % несущей способности образца).

[2] СТО 06041112.001–2018 (с изм. 1, 2). Панели из сталебетонных конструкций на основе теплоизоляционного неавтоклавного монолитного пенобетона, профильной стали с облицовкой фиброцементными листами. СПб., 2018. 77 с.

При этом, начиная с усилия в каждом домкрате 6,0 кН (что соответствует равномерно распределенной нагрузке на панель 5,73 кН/м^2), необходимо учитывать нелинейную работу пенобетона, что составляет 61 % от нагрузки, соответствующей предельному прогибу.

В образце 2 максимальная нагрузка составила 17,66 кН на один домкрат. При усилии в каждом домкрате, равном 12,8 кН (что соответствует равномерно распределенной нагрузке на панель 12,23 кН/м^2), фактический прогиб достигнет предельно допустимого значения f_u = 19,25 мм (что соответствует 72 % несущей способности образца).

В пределах нагрузок, соответствующих допустимому прогибу, работа образца оказалась приближенной к линейной.

Из проведенных расчетов можно сделать вывод, что визуальная разница на графиках между эксплуатационными значениями и аналитическим решением обусловлена неучетом жесткости фиброцементных панелей. Учет жесткости фиброцементных панелей не представляется целесообразным ввиду возможности демонтажа или замены листов обшивки данного типа на другие (в ходе проектирования, строительства, а также ремонта помещений)

4. Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что изгибаемые ЛСБК из монолитного пенобетона плотностью D400 в целом работают физически нелинейно.

2. На линейном участке работы (до достижения 60 % предельно допустимого прогиба *L*/200) продемонстрирована допустимость определения изгибной жесткости панелей перекрытий из ЛСБК как суммы жесткостей профильной стали и пенобетона; показана достоверность предложенной методики в пределах линейной работы. При прогибах в диапазоне от 60 до 100 % от *L*/200 в практических расчетах рекомендуется применять повышающий коэффициент 1,3. При необходимости эксплуатации конструкции при прогибах, превышающих *L*/200, величину перемещений необходимо устанавливать на основании численного моделирования в нелинейной постановке.

3. Экспериментально и теоретически доказано, что изгибная жесткость панелей на основе ЛСБК больше изгибной жесткости аналогичных панелей из ЛСТК на величину около 30 %, что в целом коррелирует с результатами анализа несущей способности и коэффициентом условий работы, изложенными в ранних трудах автора.

Список литературы

1. *Цветкова А.А.* Жесткость стыков сборных железобетонных стеновых панелей на сдвиг в их плоскости до момента трещинообразования // Инженерные исследования. 2022. № 4 (9). С. 26–33.

2. *Ефимченко М.И.* Проблемы и перспективы современного панельного домостроения // Инженерные исследования. 2022. № 4 (9). С. 17–25.

3. *Rybakov V.A., Kozinetc K.G., Vatin N.I., Velichkin V.Z., Korsun V.I.* Lightweight steel concrete structures technology with foam fiber-cement sheets // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 6 (82). Pp. 103–111. https://doi.org/10.18720/MCE.82.10

4. *Rybakov V.A., Ananeva I.A., Pichugin E.D., Garifullin M.G.* Heat protective properties of enclosure structure from thin-wall profiles with foamed concrete // Magazine of Civil Engineering. 2020. № 2 (94). Pp. 11–20. https://doi.org/10.18720/MCE.94.2

5. *Шевцов С.В., Астафьева Н.С.* Концепция модульного строительства на примере использования легких металлических конструкций // Инженерные исследования. 2022. № 3 (8). С. 30–37.

6. *Иващенко Ю.Г., Багапова Д.Ю., Страхов А.В.* Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон, модифицированный волокнистым наполнителем // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4 (47). С. 157–165.

7. *Кудяков А.И., Копаница Н.О., Прищепа И.А., Шаньгин С.А.* Конструкционно-теплоизоляционные пенобетоны с термомодифицированой торфяной добавкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № 1 (38). С. 172–176.

8. *Lesovik V., Glagolev E., Voronov V., Zagorodnyuk L.Kh., Fediuk R., Baranov A., Alaskhanov A., Svintsov A.P.* Durability behaviors of foam concrete made of binder composites // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 8 (100). https://doi.org/10.18720/MCE.100.3

9. *Deepak N., Thiagu H., Manivel S.* Study on strength of Metakaolin based foamed concrete under different elevated temperature // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. № 14 (17). Pp. 2980–2986.

10. *Eltayeb E., Ma X., Zhuge Y., Youssf O., Mills J.E.* Influence of rubber particles on the properties of foam concrete // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 30. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101217

11. *Benazzouk A., Douzane O., Mezreb K., Quéneudec M*. Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste // Cement and Concrete Composites. 2006. No. 28 (7). Pp. 650–657. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.006

12. *Koksal F., Sahin Y., Gencel O.* Influence of expanded vermiculite powder and silica fume on properties of foam concretes // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 257. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119547

13. *Oren O.H., Gholampour A., Gencel O., Ozbakkaloglu T.* Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 238. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117774

14. *Белькова Н.А., Иващенко Е.И.* Фиброармированные пенобетоны неавтоклавного твердения на основе базальтовой и полиамидной фибр: основные характеристики // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 2 (51). С. 97–105. https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/97-104

15. *Котова К.С.* Влияние характеристик макропористой структуры пенобетона на параметры его сцепления с арматурой // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2019. № 4 (41). С. 144–154.

16. *Маилян Л.Р., Маилян А.Л., Макарычев К.А.* Конструктивные свойства пено- и фибропенобетонов на воде с пониженной температурой затворения // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2012. № 2 (26). С. 75–84.

17. *Маилян Л.Р., Голова Т.А.* Легкий бетон на основе пенополиамидбетонной композиции // Строительство и архитектура. 2019. № 1 (7). С. 70–75.

18. *Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A.* Properties and applications of foamed concrete: a review // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101, Part 1. Pp. 990–1005. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112

19. *Местников А.Е., Рожин В.Н.* Неавтоклавный пенобетон на механоактивированных сухих смесях для строительства в условиях Арктики // Фундаментальные основы строительного материаловедения: сборник докладов международного онлайн-конгресса. Белгород: БГТУ имени В.Г. Шухова, 2017. С. 1037–1046.

20. *Wagh C.D., Indu Siva Ranjani G., Kamisetty A.* Thermal properties of foamed concrete: a review // RILEM Bookseries. 2021. Vol. 29. Pp. 113–137. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51485-3_9

21. *Аль-Хаснави Я.С.Г.* Исследование работы балок из ячеистого бетона, армированных легкими стальными тонкостенными конструкциями // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений: сборник трудов конференции Всероссийской научно-практической конференции, Курск, 21 ноября 2019 года. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. С. 1–14.

22. *Гучкин И.С., Булавенко В.О., Ласьков Н.Н.* Усиление плит из ячеистого бетона после длительной эксплуатации в конструкции покрытия производственного здания // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 1 (38). С. 132–137.

23. *Аль-Хаснави Я.С.Г., Ласьков Н.Н., Ефимов О.И., Замалиев Ф.С.* К вопросу о проектировании балки из ячеистого бетона с жесткой арматурой // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3 (48). С. 137–143.

24. *Аль-Хаснави Я.С.Г., Ласьков Н.Н., Ефимов О.И., Замалиев Ф.С.* Предпосылки и ограничения к нелинейному расчету сталебетонных балок из ячеистого бетона с жесткой арматурой из тонкостенных стальных гнутых профилей // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 4 (49). С. 88–95. https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_88

25. *Аль-Хаснави Я.С.Г., Ласьков Н.Н., Ефимов О.И., Замалиев Ф.С.* Сцепление жесткой арматуры и ячеистого бетона // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 4 (49). С. 79–87. https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_79

26. *Rybakov V.A.* Condition load effect factor of profile steel in lightweight steel concrete structures // Construction of Unique Buildings and Structures. 2020. No. 4 (89). https://doi.org/10.18720/cubs.89.7

27. *Rybakov V.A.* Condition load effect factor of profile steel in lightweight steel concrete wall panels // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023. No. 1 (106). Article 10602. URL: https://unistroy.spbstu.ru/article/2023.107.2/ (дата обращения: 12.02.2023).

28. *Rybakov V., Seliverstov A., Petrov D., Smirnov A., Volkova A.* Strength characteristics of foam concrete samples with various additives // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 245. Issue 28. Article 03015. https://doi.org/10.1051/matecconf/201824503015

References

1. Tsvetkova A.A. The joint stiffness of precast reinforced concrete wall panels to shear in their plane before cracking. *Engineering Research*. 2022;(4):26–33. (In Russ.)

2. Efimchenko M.I. Problems and prospects of modern panel housing construction. *Engineering Research*. 2022;(4):17–25. (In Russ.)

3. Rybakov V.A., Kozinetc K.G., Vatin N.I., Velichkin V.Z., Korsun V.I. Lightweight steel concrete structures technology with foam fiber-cement sheets. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;(6):103–111. https://doi.org/10.18720/MCE.82.10

4. Rybakov V.A., Ananeva I.A., Pichugin E.D., Garifullin M.G. Heat protective properties of enclosure structure from thin-wall profiles with foamed concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;(2):11–20. https://doi.org/10.18720/MCE.94.2

5. Shevtsov S.V., Astafeva N.S. The concept of modular construction on the example of the use of light metal structures. *Engineering Research*. 2022;(3):30–37. (In Russ.)

6. Ivashchenko Yu.G., Bagapova D.Yu., Strahov A.V. Structural and heat-insulating foam concrete modified with fibrous fillers. *Engineering Journal of Don*. 2017;(4):157–165. (In Russ.)

7. Kudyakow A.N., Kopanitsa N.O., Prishepa I.A., Shangin S.N. Constructional and heat-insulating foam concretes with the thermomodified peat additive. *Journal of Construction and Architecture*. 2013;(1):172–176. (In Russ.)

8. Lesovik V., Glagolev E., Voronov V., Zagorodnyuk L.Kh., Fediuk R., Baranov A., Alaskhanov A., Svintsov A.P. Durability behaviors of foam concrete made of binder composites. *Magazine of Civil Engineering*. 2020;(8):10003. https://doi.org/10.18720/MCE.100.3

9. Deepak N., Thiagu H., Manivel S. Study on strength of Metakaolin based foamed concrete under different elevated temperature. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019;(14):2980–2986.

10. Eltayeb E., Ma X., Zhuge Y., Youssf O., Mills J.E. Influence of rubber particles on the properties of foam concrete. *Journal of Building Engineering*. 2020;30:101217. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101217

11. Benazzouk A., Douzane O., Mezreb K., Quéneudec M. Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste. *Cement and Concrete Composites*. 2006;28(7):650–657. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.05.006

12. Koksal F., Sahin Y., Gencel O. Influence of expanded vermiculite powder and silica fume on properties of foam concretes. *Construction and Building Materials*. 2020;257:119547. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119547

13. Oren O.H., Gholampour A., Gencel O., Ozbakkaloglu T. Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 2020;238:117774. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117774

14. Belkova N.A., Ivashchenko E.I. Basic characteristics of fiber-reinforced non-autoclaved foam concretes based on basalt and polyamide fibers. *Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*. 2022;(2):97–105. (In Russ.) https://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-2/97-104

15. Kotova K. Influence of the foam concrete macroporous structure's characteristics on the parameters of its adhesion with reinforcing bars. *Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin*.2019;(4):144–154. (In Russ.)

16. Mailyan L.R., Mailyan A.L., Makarychev K.V. Structural properties of foam concrete and fiber-foam concrete based on water with reduced setting temperature. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2012;(2): 75–84. (In Russ.)

17. Mailyan L., Golova T. Lightweight concrete based on foam and polyamide concrete composition. *Construction & Architecture*. 2019;(1):70–75. (In Russ.)

18. Amran Y.H.M., Farzadnia N., Ali A.A.A. Properties and applications of foamed concrete: a review. *Construction and Building Materials*. 2015;101(Part 1):990–1005. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112

19. Mestnikov A.E., Rozhin V.N. Non-autoclave foam concrete based on mechanically activated dry mixes for construction in the Arctic regions. *Fundamentals of Building Materials Science: Proceedings of the International Online Congress*. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov; 2017. p. 1037–1046. (In Russ.)

20. Wagh C.D., Indu Siva Ranjani G., Kamisetty A. Thermal properties of foamed concrete: a review. *RILEM Bookseries*. 2021;29:11–137. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51485-3_9

21. Al-Chasnavi Ya.S.G. Investigation of beams operation made of cellular concrete reinforced with lightweight steel thin-walled structures. *Innovative Methods of Designing Structures of Buildings and Facilities: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Kursk, 21 November 2019.* Kursk: South-West State University; 2019. p. 1–14. (In Russ.)

22. Guchkin I.S., Bulavenko V.O., Laskov N.N. Strengthening of slabs made of cellular concrete after long-term operation in the roof structure of an industrial building. *Regional Architecture and Engineering*. 2019;(1):132–137. (In Russ.)

23. Al-Chasnavi Ya.S.G., Efimov O.I., Zamaliev F.S., Laskov N.N. On the design of a cellular concrete beam with rigid reinforcement. *Regional Architecture and Engineering*. 2021;(3):137–143. (In Russ.)

24. Al-Chasnavi Ya.S.G., Laskov N.N., Efimov O.I., Zamaliev F.S. Preconditions and limitations to the nonlinear analysis of steel-concrete beams made of cellular concrete with rigid reinforcement consisting of thin-walled steel bent profiles. *Regional Architecture and Engineering.* 2021;(4):88–95. (In Russ.) https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_88

25. Al-Chasnavi Ya.S.G., Laskov N.N., Efimov O.I., Zamaliev F.S. Bonding between rigid reinforcement and cellular concrete. *Regional Architecture and Engineering*. 2021;(4):79–87. (In Russ.) https://doi.org/10.54734/20722958_2021_4_79

26. Rybakov V.A. Condition load effect factor of profile steel in lightweight steel concrete structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020;(4):8907. https://doi.org/10.18720/cubs.89.7

27. Rybakov V.A. Condition load effect factor of profile steel in lightweight steel concrete wall panels. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023;(1):10602. Available from: https://unistroy.spbstu.ru/article/2023.107.2/ (accessed: 12.02.2023).

28. Rybakov V., Seliverstov A., Petrov D., Smirnov A., Volkova A. Strength characteristics of foam concrete samples with various additives. *MATEC Web of Conferences*. 2018;245(28):03015. https://doi.org/10.1051/matecconf/201824503015