

УДК 69.04

СОВМЕСТНАЯ РАБОТА СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ И ЛЕГКОГО БЕТОНА В КОНСТРУКЦИИ ПЕРЕКРЫТИЯ

В.А. Рыбаков, С.Н. Дружинина

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В статье выполняется моделирование панели, состоящей из стальных тонкостенных профилей и пенобетона D400, в программном комплексе ANSYS. Расчет проводится в линейной постановке и с учетом физической нелинейности для стали. Результаты расчета сводятся в графики зависимости прогиба панели от приложенной нагрузки. До значения 7кН графики примерно совпадают и имеют линейный характер, затем при увеличении нагрузки график эксперимента и график нелинейного расчета меняют направление. Результаты нелинейного расчета более близки к результатам эксперимента, чем аналитический и линейный расчет. Разница между нелинейным расчетом и результатами эксперимента составляет 33%.

Ключевые слова: пенобетон, монолитный пенобетон, легкие стальные тонкостенные конструкции, легкие сталебетонные конструкции, перекрытие, совместная работа, физическая нелинейность, ANSYS.

Ссылка для цитирования: Рыбаков В.А., Дружинина С.Н. Совместная работа стальных тонкостенных профилей и легкого бетона в конструкции перекрытия // Инженерные исследования. 2024. №2(17). С. 22-27. EDN: EBGXBJ

THE COLLABORATION OF THIN-WALLED STEEL PROFILES AND LIGHT CONCRETE IN THE FLOOR STRUCTURE

V.A. Rybakov, S.N. Druzhinina

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. The article simulates a panel consisting of thin-walled steel profiles and D400 foam concrete in the ANSYS software package. The calculation is carried out in a linear formulation and taking into account the physical nonlinearity for steel. The calculation results are summarized in graphs of the dependence of the deflection of the panel on the applied load. Up to a value of 7kN, the graphs roughly coincide and are linear in nature, then, with increasing load, the experimental graph and the nonlinear calculation graph change direction. The results of the nonlinear calculation are closer to the experimental results than the analytical and linear calculations. The difference between the nonlinear calculation and the experimental results is 33%.

Keywords: foam concrete, monolithic foam concrete, lightweight thin-walled steel structures, lightweight steel-concrete structures, overlap, collaboration, physical nonlinearity, ANSYS.

For citation: Rybakov V.A., Druzhinina S.N. The collaboration of thin-walled steel profiles and light concrete in the floor structure // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.2(17). Pp. 22-27. EDN: EBGXBJ

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее интересных строительных материалов, набирающих популярность в последнее время, являются легкие стальные тонкостенные конструкции [1-5]. Их изучение актуально по многим причинам.

Ввиду сложности проектирования таких конструкций [6-13], в большинстве случаев они используются для возведения несущих каркасов временных зданий, небольших коттеджей, а также других объектов, не требующих сложных инженерных расчетов. но в перспективе могут применяться и для объектов с более высоким уровнем ответственности, а также применяться в качестве конструктивного элемента, работающего совместно с другими материалами, например, с пенобетоном [14].

Пенобетон – вид ячеистого бетона с пористой структурой, получаемой в результате введения в бетонную смесь органического или синтетического пенообразователя. 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.

По назначению пенобетон разделяют на теплоизоляционный с плотностью до 500 кг/м^3 , конструктивно-теплоизоляционный с плотностью от 500 кг/м^3 до 900 кг/м^3 и конструкционный с плотностью свыше 1000 кг/м^3 . Кроме этого, данный материал разделяют на автоклавный – твердеющий в естественных условиях и неавтоклавный – твердеющий в условиях тепловой обработки при атмосферном давлении.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве предмета исследования была выбрана панель перекрытия, состоящая из стальных тонкостенных профилей и пенобетона (рис.1).

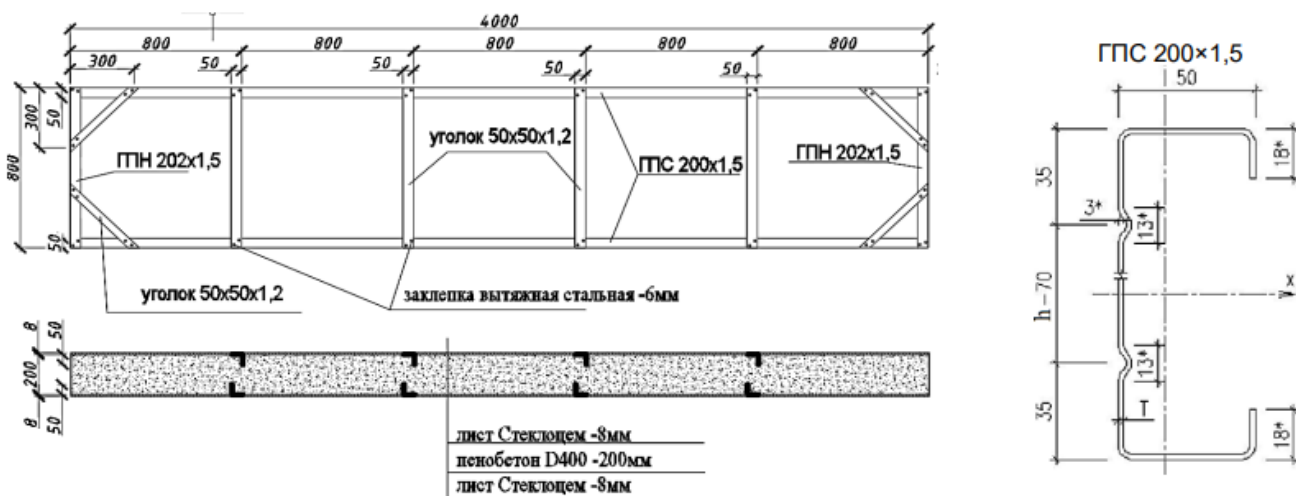


Рис. 1. Габариты панели [15]

Fig. 1. Panel dimensions

Ранее панель была испытана [15]. Экспериментальным способом автором была выявлена зависимость между нагрузкой, приходящей на панель, и ее прогибом.

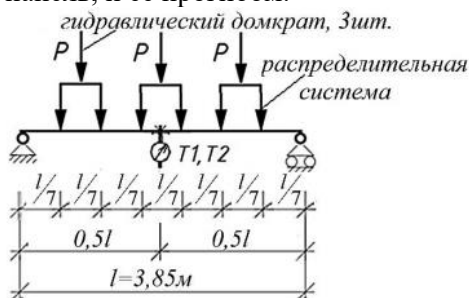


Рис. 2. Расчетная схема [15]

Fig. 2. Calculation scheme

СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ И ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ В ЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Для проведения расчетов был выбран программный комплекс ANSYS. ANSYS — это передовое программное обеспечение для инженерного анализа и численного моделирования, основанное на методе конечных элементов.

Тонкостенные профили были заданы с помощью оболочечных конечных элементов (рис.3), пенобетон с помощью объемного конечного элемента. Так как фиброцементные листы, присутствующие в конструкции, не являются несущими, было принято решение исключить их из расчетной модели.

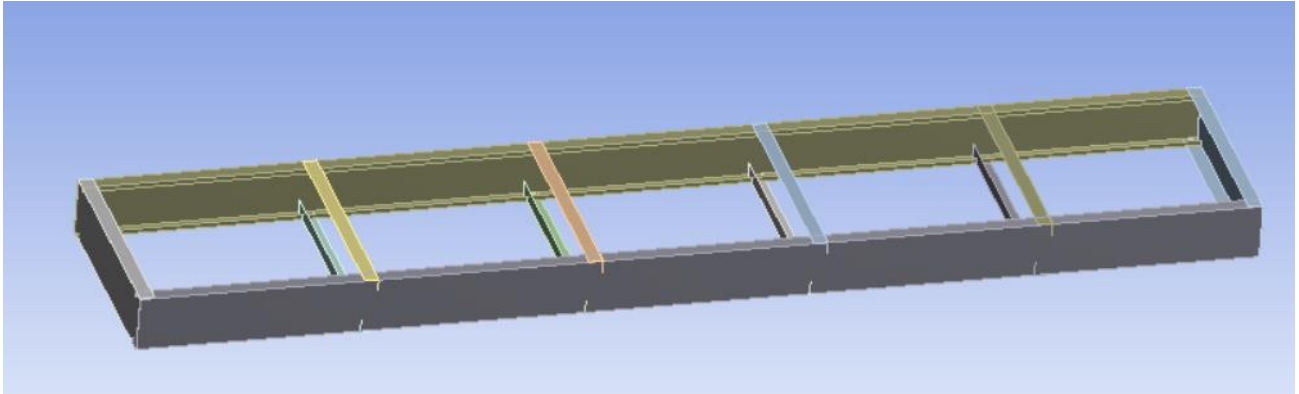


Рис. 3. Каркас панели из тонкостенных профилей
Fig. 3. The frame of the panel is made of thin-walled profiles

Для распределения нагрузки в модели были предусмотрены бетонные распределительные бруски аналогичные экспериментальным (рис. 4).

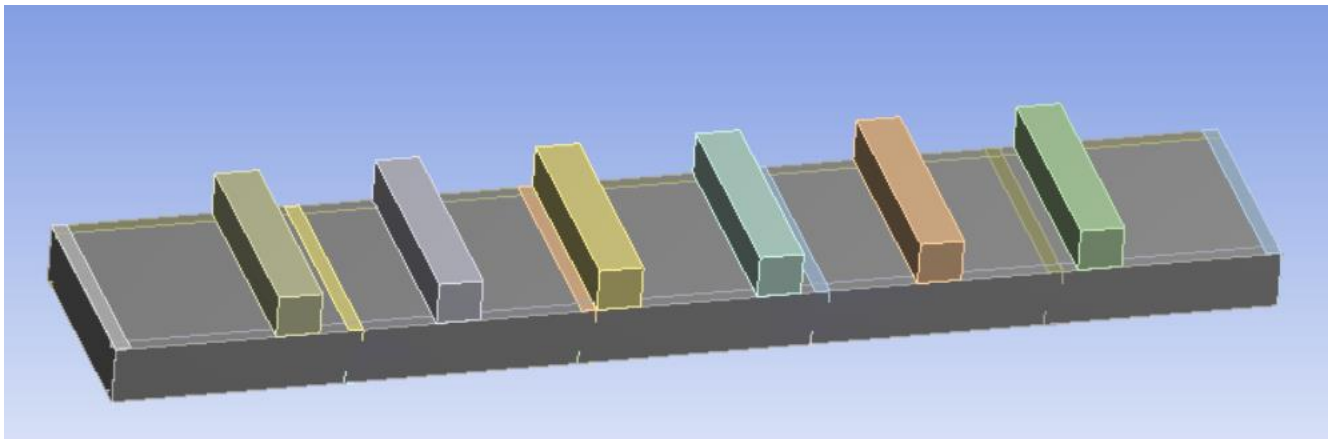


Рис. 4. 3D-модель панели
Fig. 4. 3D panel model

По краям было задано шарнирное опирание, а также приложена сосредоточенная нагрузка на каждую из 6 бетонных призм от 1 до 14 кН на 1 домкрат (рис. 5).

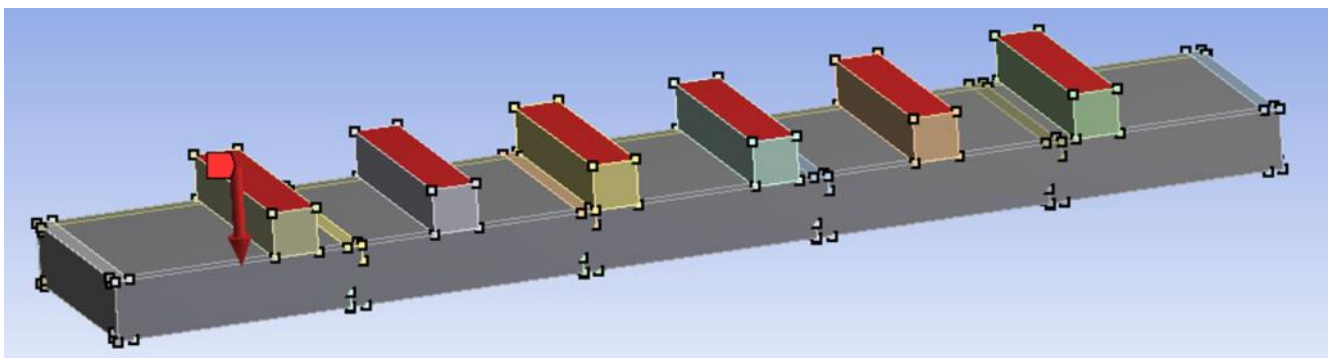


Рис. 5. Приложение нагрузки на панель
Fig. 5. Application of the load on the panel

Шаг разбиения сетки был выбран исходя из анализа зависимости погрешности результатов от размера конечного элемента 100 мм (рис. 6).

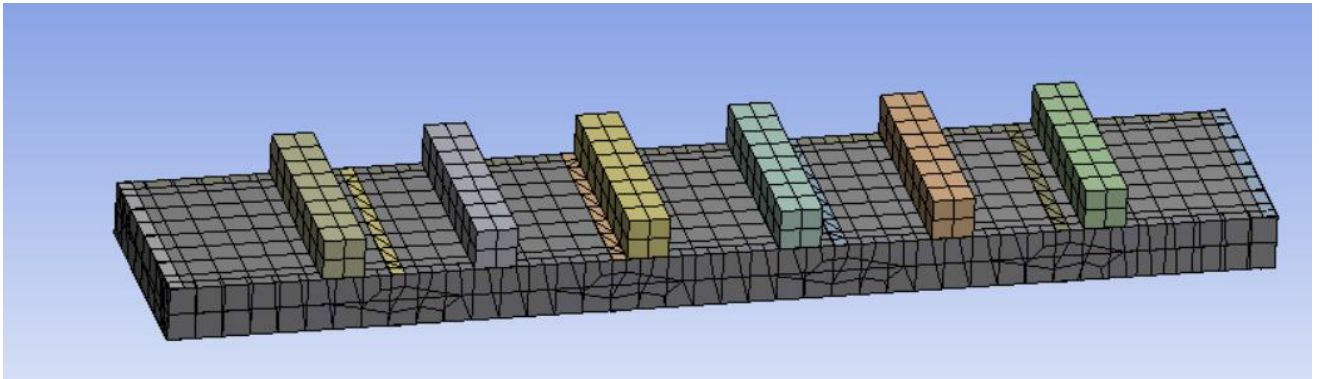


Рис. 6. Сетка конечных элементов
Fig. 6. Finite Element Grid

Модуль деформации пенобетона марки D400 согласно СТО-001-50845180 $E_b=960 \cdot \text{МПа}$, профильной стали - $E_s=2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

В ходе расчета были вычислены прогибы панели при приложении нагрузки от 1 до 14 кН на 1 домкрат (рис. 7).

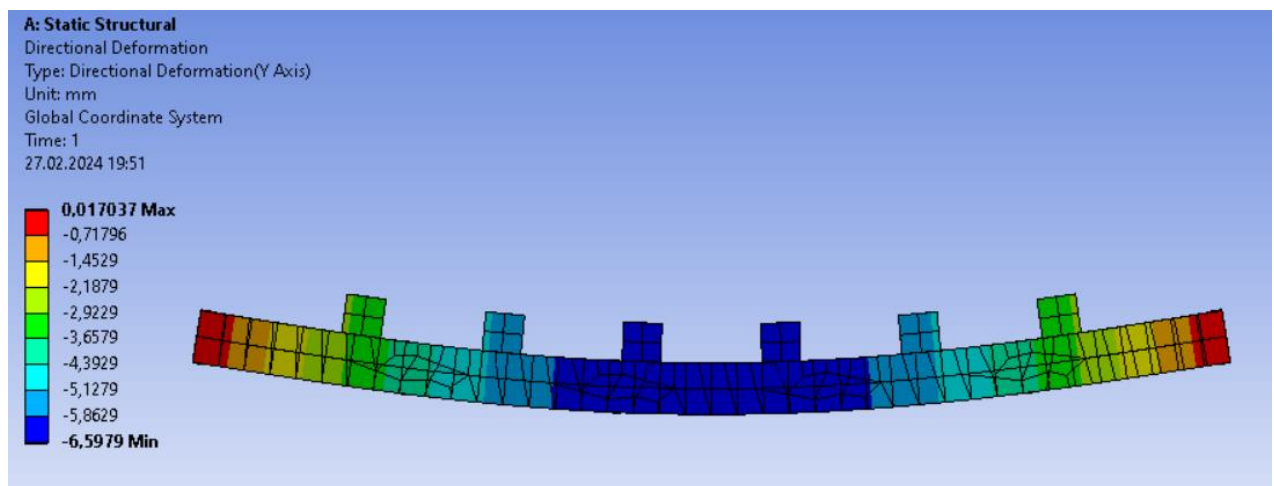


Рис. 7. Прогиб панели при нагрузке 3 кН
Fig. 7. Deflection of the panel at a load of 3 kN

По итогам расчета значения прогибов, полученных различными способами, были сведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения прогибов панели
Table 1. Panel deflection values

Нагрузка, кН	Аналитический расчет, мм	Линейный расчет ANSYS, мм	Результаты эксперимента, мм
0	0	0	0
1	1,584	1,53	1,383
2	3,168	3,119	2,768
3	4,752	4,7081	4,443
4	6,336	6,297	6,405
5	7,92	7,886	8,365
6	9,504	9,476	9,877
7	11,088	11,065	11,617
8	12,672	12,654	13,703
9	14,256	14,244	16,310
10	15,839	15,833	18,923
11	17,423	17,422	22,365
12	19,007	19,011	27,068
13	20,591	20,601	30,868

Результаты были сопоставлены с результатами эксперимента. Исследование показало, что результаты численного анализа отличаются от аналитического решения не более, чем на 5%, однако сильно отличаются от экспериментальных данных. Для приближения результатов расчета к результатам реальной работы конструкции было принято решение проводить расчет с учетом нелинейных свойств материалов.

СОЗДАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ И ПРОВЕДЕНИЕ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИИ В НЕЛИНЕЙНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Основным несущим элементом в конструкции является каркас из стальных тонкостенных профилей, следовательно, при расчете нелинейные свойства достаточно задавать только для стали. Для стали был выбран материал из библиотеки нелинейных материалов ANSYS. Все результаты расчетов были сведены в общий график (рис. 8). Так как графики линейного и аналитического расчетов практически совпадают, их значения показаны единой прямой.

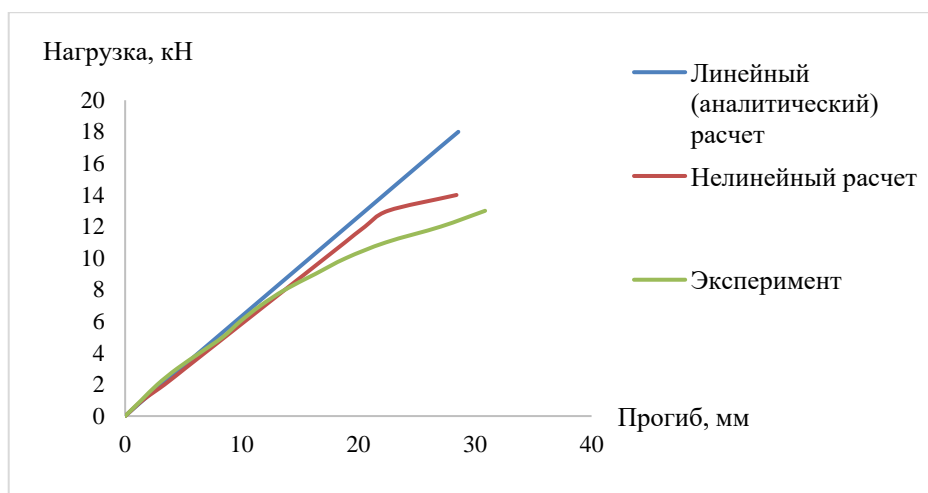


Рис. 8. График зависимости прогиба от нагрузки
Fig. 8. The graph of the deflection dependence on the load

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчетов и исследований были сформулированы следующие выводы:

1. В линейной постановке результаты численного расчета панели перекрытия совпали с результатами аналитического расчета с точностью до 5%.
2. До значения 7кН графики примерно совпадают и имеют линейный характер, затем при увеличении нагрузки график эксперимента и график нелинейного расчета меняют направление.
3. Результаты нелинейного расчета более близки к результатам эксперимента, чем аналитический и линейный расчет. Разница между нелинейным расчетом и результатами эксперимента составляет 33%.
4. Основным несущим элементом в конструкции является каркас из стальных тонкостенных профилей, следовательно, при расчете нелинейные свойства достаточно задавать только для стали.
5. Наличие пенобетона в конструкции позволяет избежать депланации и потери местной устойчивости стержней, что увеличивает несущую способность панели. Поэтому при расчете конструкции моделирование пенобетона необходимо, но его нелинейными свойствами можно пренебречь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губанов Д.И. Перспективы применения легких стальных тонкостенных конструкций в жилищном строительстве // Интерактивная наука. 2019. № 12 (46). С. 30-32.
2. Евтушенко А.И., Нуриев В.Э., Зотов П.В., Морева И.С. Технология легких стальных тонкостенных конструкций и её особенности // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). С. 218. EDN JVWOPC.
3. Илюхина Е. А., Соболев А. А. Мирская практика применения технологии ЛСТК в строительстве // Ползуновский альманах. 2018. № 1. С. 89-82.
4. Никулин М. Ю., Скачков С. В., Муро Г. Э. Легкие стальные тонкостенные конструкции // Актуальные проблемы науки и техники. 2020: Материалы национальной научно-практической

конференции, Ростов-на-Дону, 25–27 марта 2020. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2020. С. 1145-1146. EDN EMOODF.

5. Rzeszut K. Selected aspects of stability of thin-walled steel structures with clearances and initial imperfections // *Lightweight Structures in Civil Engineering. Contemporary Problems. Local seminar of IASS Polish chapters*. 2018. Pp. 119-125.

6. Белый Г. И. К определению редуцированных сечений стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 5 (64). С. 33-37.

7. Кацеф В. И. К вопросу обрушения зданий и сооружений на основе легких стальных тонкостенных конструкций // *Молодой ученый*. 2019. № 24. С. 1–2.

8. Ал Али М., Томко М. Расчет сопротивления сжатых элементов легких стальных тонкостенных конструкций закрытого профиля. Часть 2 // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 1(45). С. 53-58. DOI 10.5862/MCE.45.6. EDN RWXKMP.

9. Никагосов Д. В., Кудрявцев С. В. Особенности расчета сечений из ЛСТК профилей // *Проблемы безопасности строительных критичных инфраструктур Safety2020: Сборник статей VI Международной конференции*, Екатеринбург, 05-06 ноября 2020. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2021. С. 15-21. EDN MUTZAN

10. Рыбаков В.А., Кутина А.А., Кудрявцев К.С. Математическая модель процесса производства здания из легких стальных тонкостенных конструкций // *Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения: Материалы Всероссийской научно-технической конференции / Под общей редакцией В.И. Геры: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского*, 2018. С. 130-134. EDN ХАТҮКВ.

11. Тимошенко М. С., Будак Т. Н. Оценка дефектов зданий и сооружений из легких стальных тонкостенных конструкций // *Ростовский научный журнал*. 2018. № 12. С. 301–308.

12. Тналиева З. К. Исследование методов проектирования и строительства быстровозводимых зданий из ЛСТК // *Потенциал интеллектуально одарённой молодежи - развитию науки и образования: Материалы IX Международного научного форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников*, Астрахань, 28-29 апреля 2020. Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. С. 528-534. EDN KRULHF

13. Shi Q., Shi X., Gattas J.M., Kitipornchai S. Folded assembly methods for thin-walled steel structures // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol.138. Pp. 235–245. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.07.010

14. Атавин И. В., Имескенов Т. Л., Иванова Е. Г. Лёгкие стальные тонкостенные конструкции в строительстве спортивных сооружений // *Синергия Наук*. 2016. № 6. С. 367-376. EDN XEQPUL.

15. Рыбаков В.А. Изгибная жесткость легких сталебетонных панелей перекрытий из пенобетона низкой плотности // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2023. № 3 (19). С. 302–312.

ОБ АВТОРАХ

Владимир Александрович Рыбаков – к.т.н., доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: fishermanoff@mail.ru

Светлана Николаевна Дружинина – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: druzhinina.sn@edu.spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Vladimir A. Rybakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: fishermanoff@mail.ru

Svetlana N. Druzhinina – master's degree student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: druzhinina.sn@edu.spbstu.ru