

№2 (12)  
**2023**

# Инженерные --- ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2782-5582

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГОФРО-БАЛКИ В КАЧЕСТВЕ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ <b>М.С. Захаркевич</b> .....	3-10
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ CLT-ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ЖИЛОЙ МНОГОЭТАЖНОЙ ЗАСТРОЙКИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА <b>Д.И. Арзиманов, З.А. Гаевская</b> .....	11-18
УТЕПЛЕНИЕ ФАСАДОВ ПРИ РЕНОВАЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ТИПОВЫХ СЕРИЙ <b>М.К. Андреев, О.С. Гамаюнова</b> .....	19-26
ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЁТНОГО КОМПЛЕКСА FLOW-3D НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДОСЛИВОВ <b>А.А. Гиргидов</b> .....	27-32
АРХИТЕКТУРА «ЗЕЛЕННЫХ» КРЫШ И ИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ <b>Е.Д. Чернова, О.С. Гамаюнова</b> .....	33-41

## CONTENTS

JUSTIFICATION OF THE USE OF A SIN-BEAM AS A SUPPORTING STRUCTURE OF THE COATING <b>M.S. Zaharkevich</b> .....	3-10
COMPARATIVE ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF CLT-PANELS FOR RESIDENTIAL HIGH-RISE BUILDINGS IN ST. PETERSBURG <b>D.I. Arzimanov, Z.A. Gaevskaya</b> .....	11-18
FACADE INSULATION DURING RENOVATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS OF STANDARD SERIES <b>M.K. Andreev, O.S. Gamayunova</b> .....	19-26
VERIFICATION OF THE FLOW-3D SOFTWARE BASED ON NUMERICAL SIMULATION OF WEIRS <b>A.A. Girgidov</b> .....	27-32
ARCHITECTURE OF GREEN ROOFS AND THEIR ENERGY EFFICIENCY <b>E.D. Chernova, O.S. Gamayunova</b> .....	33-41

УДК 624.014

## ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГОФРО-БАЛКИ В КАЧЕСТВЕ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ

**М.С. Захаркевич**

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

**Аннотация.** В настоящее время основное внимание в исследованиях металлических конструкций уделяется разработке высокоэффективных конструктивных решений, обеспечивающих достаточную прочность при минимальном весе. Перфорированные или гофрированные конструкции используются для уменьшения количества металла, используемого в элементах, работающих на изгиб. Однако, ограниченное исследование гофрированных балок создает проблему для их широкого применения, несмотря на их потенциал в современном строительстве. В силу сказанного, цель данной работы заключается в обосновании применения гофро-балок и определении наиболее оптимальных параметров сечения конструкции покрытия. В данной статье приводится основное понятие гофрированных конструкций, включая их виды, основные достоинства, и недостатки. Для обоснования применения гофро-балки приведено сравнение ее параметров со сварной балкой двутаврового сечения с плоской стенкой. Исследование общей устойчивости и максимального прогиба при загрузке условной нагрузкой проводилось с помощью ПК LIRA soft. Была разработана численная модель гофро-балки и балки с плоской стенкой в ПК LIRA soft. Полученные данные показывают, балки с гофрированной стенкой имеют ряд достоинств по сравнению с балками с плоской стенкой.

**Ключевые слова:** двутавры с гофрированной стенкой, рамные каркасы, гофро-балка, применение гофрированных балок, современное строительство, численное моделирование, оптимизация сечения, металлоемкость, устойчивость.

**Ссылка для цитирования:** Захаркевич М.С. Обоснование применения гофро-балки в качестве несущей конструкции покрытия // Инженерные исследования. 2023. №2 (12). С. 3-10. EDN: GEXRPG

## JUSTIFICATION OF THE USE OF A SIN-BEAM AS A SUPPORTING STRUCTURE OF THE COATING

**M.S. Zaharkevich**

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

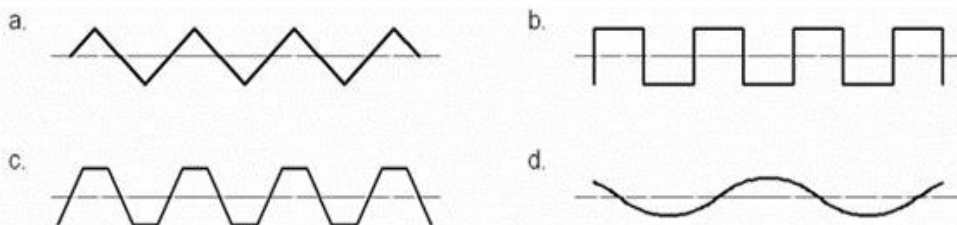
**Abstract.** Currently, the main attention in the research of metal structures is paid to the development of highly efficient structural solutions that provide sufficient strength with minimal weight. Perforated or corrugated structures are used to reduce the amount of metal used in bending elements. However, the limited study of corrugated beams poses a problem for their widespread use, despite their potential in modern construction. By virtue of the above, the purpose of this work is to substantiate the use of corrugated beams and determine the most optimal parameters of the section of the coating structure. This article provides the basic concept of corrugated structures, including their types, main advantages and disadvantages. To justify the use of a corrugated beam, a comparison of its parameters with a welded beam of I-beam section with a flat wall is given. The study of the overall stability and maximum deflection during loading with a conditional load was carried out using a LIRA soft PC. A numerical model of a corrugated beam and a beam with a flat wall was developed in the LIRA soft PC. The data obtained show that I-beams with a corrugated wall have a number of advantages compared to beams with a flat wall.

**Keywords:** I-beams with a corrugated wall, frame frames, sin-beam, the use of corrugated beams, modern construction, numerical modeling, optimization of the section, metal consumption, stability.

**For citation:** Zaharkevich M.S. Justification of the use of a sin-beam as a supporting structure of the coating // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.2 (12). Pp. 3-10. EDN: GEXRPG

## ВВЕДЕНИЕ

Гофрированная балка представляет собой составную конструкцию, состоящую из поясов и изогнутой тонкой металлической стенки [1-3]. Существует множество форм стеновых гофр, однако наиболее часто применяемыми являются гофры треугольной, трапециевидной, прямоугольной и волнообразной формы. (рис.1).



**Рис. 1.** Виды гофрирования стенки: а - треугольное; б - прямоугольное; с - трапецидальное; d - синусоидальное [3]  
**Fig. 1.** Types of wall corrugation: a - triangular; b - rectangular; c - trapezoidal; d - sinusoidal [3]

Стенка балки воспринимает поперечную силу, поэтому прочность сечения по касательным напряжениям обеспечивается при малой толщине стенки. Однако, толщину стенки увеличивают, для выполнения условия местной устойчивости. Это приводит к увеличению металлоемкости и стоимости конструкции. Применения гофрирования в конструкциях, работающих на изгиб, позволяет добиться прочности, и устойчивости с меньшим использованием металла [3].

Основные достоинства гофро-балок перед обычными двутавровыми балками:

- повышенная жесткость по сравнению с конструкциями с плоскими стенками эквивалентных размеров. [4-6];

- меньший расход стали и, как следствие, малый собственный вес [7];

- трудозатраты на 12-15 % меньше, чем при выполнении составных двутавров с плоской стенкой [8].

Если говорить о недостатках, то можно отметить такие пункты, как:

- высокая стоимость оборудования для производства таких балок;

- использование двутавров с гофрированной стенкой в качестве колонн нецелесообразно из-за их меньшей прочности на сжатие.;

- отсутствие сведений о проектировании таких балок в нормативной литературе [9].

В строительной отрасли двутавровые балки с гофрированной стенкой используются для возведения различных сооружений, таких как производственные цеха, сельскохозяйственные объекты, мосты. В основном, их применяют в строительстве каркасных сооружений, в качестве несущих конструкций покрытия. Не рекомендуется применять двутавры с гофрированной стенкой в качестве конструкций, работающих на сжатие и растяжение, вследствие возникновения местных деформаций смятия в стенке [3]. Важно отметить использование металлических гофрированных конструкций в гидротехнических сооружениях [2].

Объектом данного исследования является стальная гофро-балка. Предметом исследования является обоснование ее применения в качестве конструкции покрытия.

Цель исследования заключается в определении параметров и приведении алгоритма обоснования применения гофро-балок в строительстве. Таким образом, задачи исследования представляют собой:

- подбор сечения гофро-балки, аналогичной по несущей способности со сварной балкой с плоской стенкой;

- определение параметров для сравнения двух вариантов конструкций;

- численное моделирование и расчет двух конструкций;

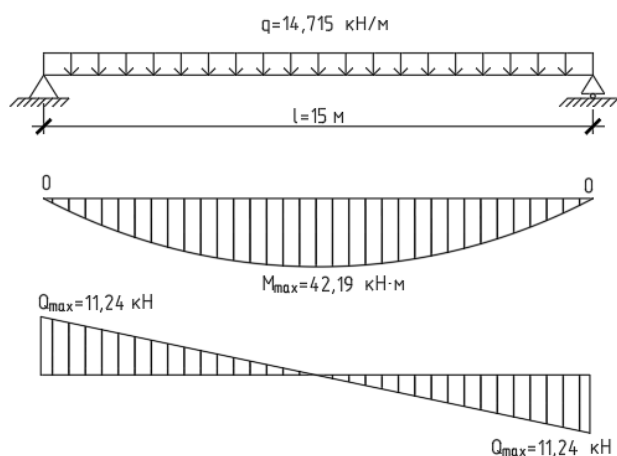
- сравнение и анализ полученных результатов;

- оценка и возможность применения данного алгоритма исследования гофро-балок в строительстве.

## ПОДБОР СЕЧЕНИЙ

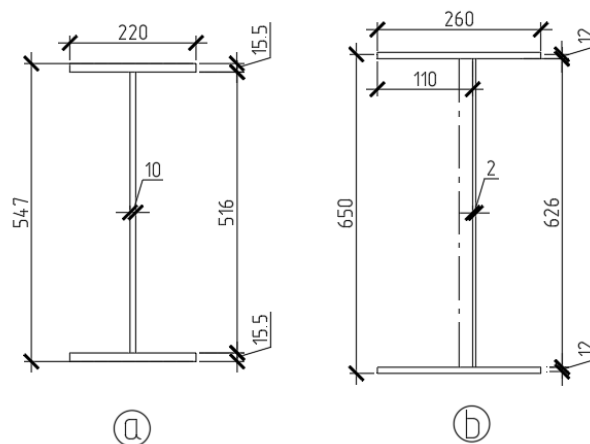
Для обоснования применения гофро-балки сравним ее параметры с двутавровой балкой составного сечения. Подбор сечения балки с плоской стенкой был выполнен в соответствии с требованиями СП 16.13330.2017. Гофро-балка была рассчитана по методическим пособиям [10, 11]. Габариты сечения гофро-балки были определены в соответствии с каталогом, приведенным на сайте ООО «А ГРУПП

Стальные Конструкции»<sup>1</sup>. Гофро-балка подобранного сечения является аналогом сварной балки по несущей способности, поэтому высота стенки гофро-балки больше. На рис.2 и рис.3 приведены расчетная схема балки, эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил, а также габариты подобранных сечений.



**Рис. 2.** Расчетная схема балки, эпюры изгибающих моментов и перерезывающих сил

**Fig. 2.** Design diagram of the beam, diagram of bending moments and shear forces



**Рис. 3.** Габариты сечений: а - двутавр с плоской стенкой; б - двутавр с гофрированной стенкой

**Fig. 3.** Dimensions of sections: а - I-beam with a flat wall; б - I-beam with a corrugated wall

Нагрузка от пирога кровли, действующая по всей длине балки, равна  $q=14,715$  кН/м. В качестве материала изготовления конструкции покрытия выбрана сталь С245, расчетное сопротивление которой равно  $R_y=24$  кН/см<sup>2</sup>.

Таким образом, было определено что для данной конструкции необходимый момент сопротивления сечения должен быть равен  $W=1793,79$  см<sup>3</sup>, а требуемый момент инерции сечения  $I=60271,429$  см<sup>4</sup>. Максимально допустимый прогиб для данной длины балки равен 66,66 мм. В таблице 1 представлены параметры подобранных сечений. На рисунке 3 показаны габариты поперечных сечений балок.

**Таблица 1.** Параметры подобранных профилей

**Table 1.** Parameters of selected profiles

№	Параметр	Балка с плоской стенкой	Гофро-балка
1	Высота стенки, мм	516	626
2	Толщина стенки, мм	10	2
3	Ширина полки, мм	220	260
4	Толщина полки, мм	15,5	12
5	Площадь сечения, см <sup>2</sup>	124,74	74,92
6	Момент инерции сечения, см <sup>4</sup>	62 784,45	63 300
7	Запас прочности, кН·м	625	624
8	Масса 1 м, кг	97,9	60,8

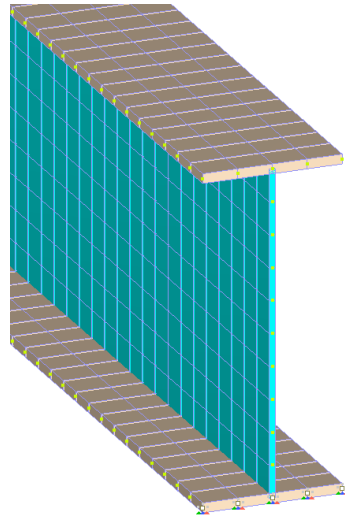
Для обоснования применения гофро-балки в качестве конструкции покрытия был проведен численный расчет в ПК Lira Soft. Для сравнения двух вариантов профилей были выбраны следующие параметры:

- 1) значение прогиба в центре пролета;
- 2) значение коэффициента запаса устойчивости, который показывает во сколько раз критическая сила по Эйлеру превышает 14,715 кН/м;
- 3) анализ форм потери устойчивости.

<sup>1</sup> Гофро-балка. Общее описание. Основные преимущества. Технические характеристики. [Электронный ресурс]. - URL: <https://agsc.ru/upload/iblock/b2a/Gofrobalka.pdf?ysclid=1l3nafoidh702423747> (дата обращения: 10.08.2023)

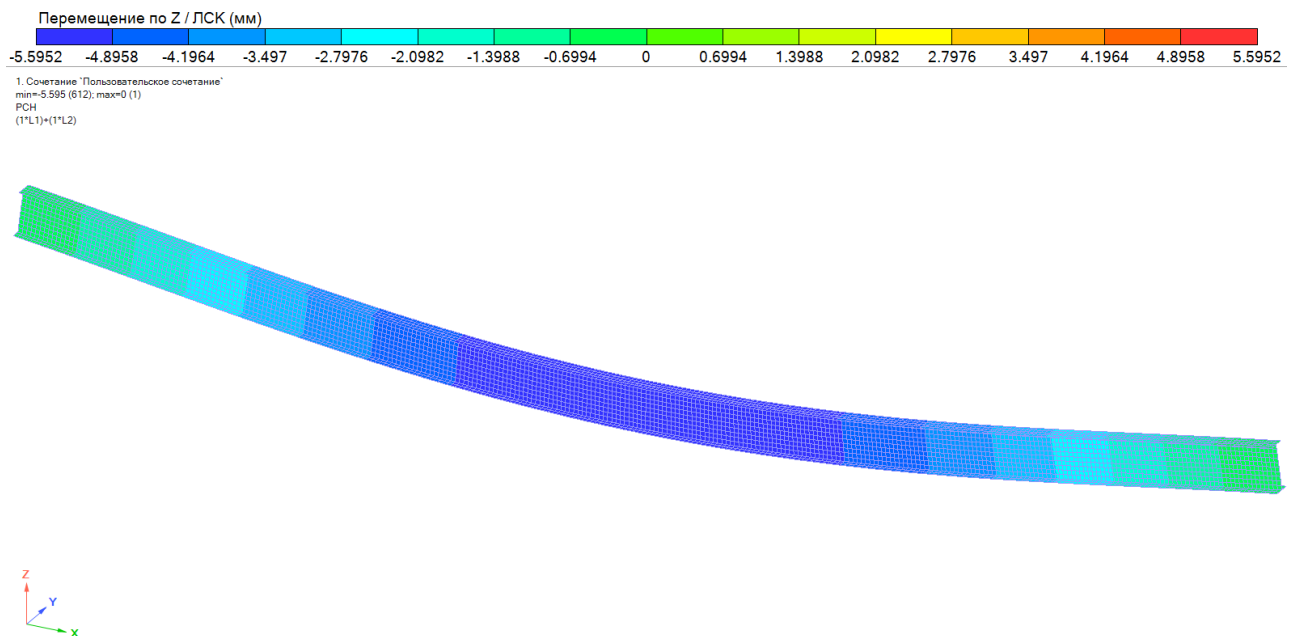
### РАСЧЕТ БАЛКИ С ПЛОСКОЙ СТЕНКОЙ

Численная модель шарнирно-опертой балки с плоской стенкой состоит из пластинчатых конечных элементов. Шаг сетки конечных элементов равен 5 см. В расчетной схеме узлов 5719, элементов 5400. Расчет был выполнен в упругой постановке задачи. Фрагмент расчетной модели сварной балки приведен на рис. 4.



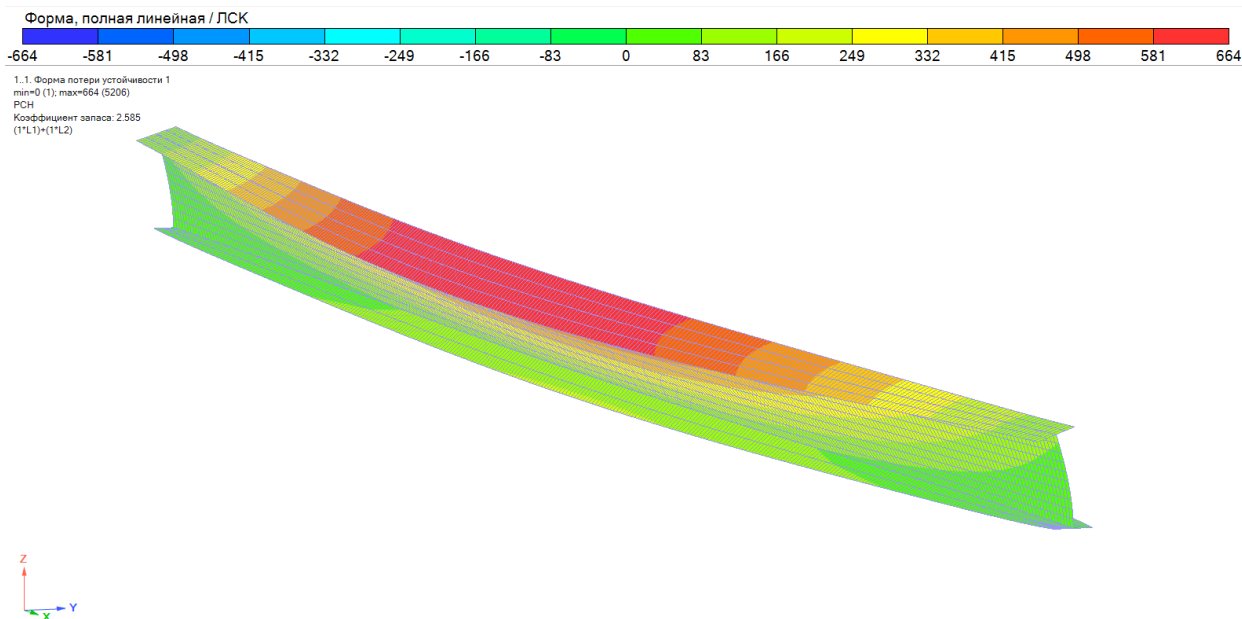
**Рис. 4.** Фрагмент численной модели балки с плоской стенкой  
**Fig. 4.** A fragment of a numerical model of a beam with a flat wall

Далее, проведем расчет на сочетания нагрузок от собственного веса балки и внешней нагрузки. На рис. 5 представлены перемещения по оси Z, максимальный прогиб в центре пролета равен 5,595 мм.



**Рис. 5.** Перемещения по оси Z в балке с плоской стенкой.  
**Fig. 5.** Movement along the Z axis in a beam with a flat wall.

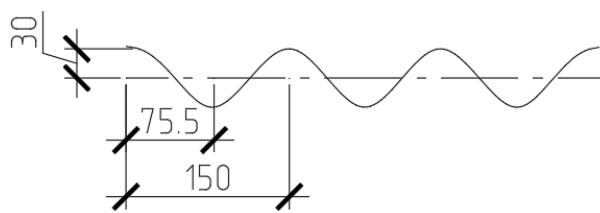
Коэффициент запаса при расчете на общую устойчивость равен 2,585. На рис. 6 приведена первая форма потери устойчивости.



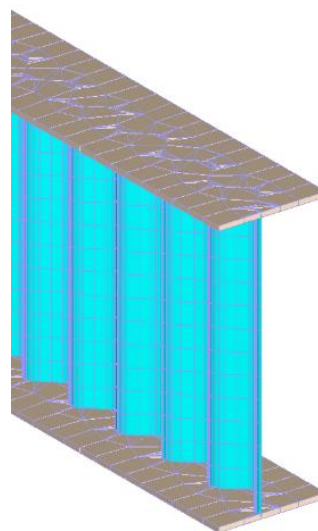
**Рис. 6.** Первая форма потери устойчивости балки с плоской стенкой  
**Fig. 6.** The first form of loss of stability of a beam with a flat wall

#### РАСЧЕТ ГОФРО-БАЛКИ

Численная модель шарнирно-опертой гофро-балки состоит из пластинчатых конечных элементов. Шаг сетки конечных элементов равен 5 см. В расчетной схеме 24749 узлов и 27711 элементов. Расчет был выполнен в упругой постановке задачи. Геометрические характеристики гофрирования стенки и фрагмент расчетной модели приведены на рис.7 и рис.8.

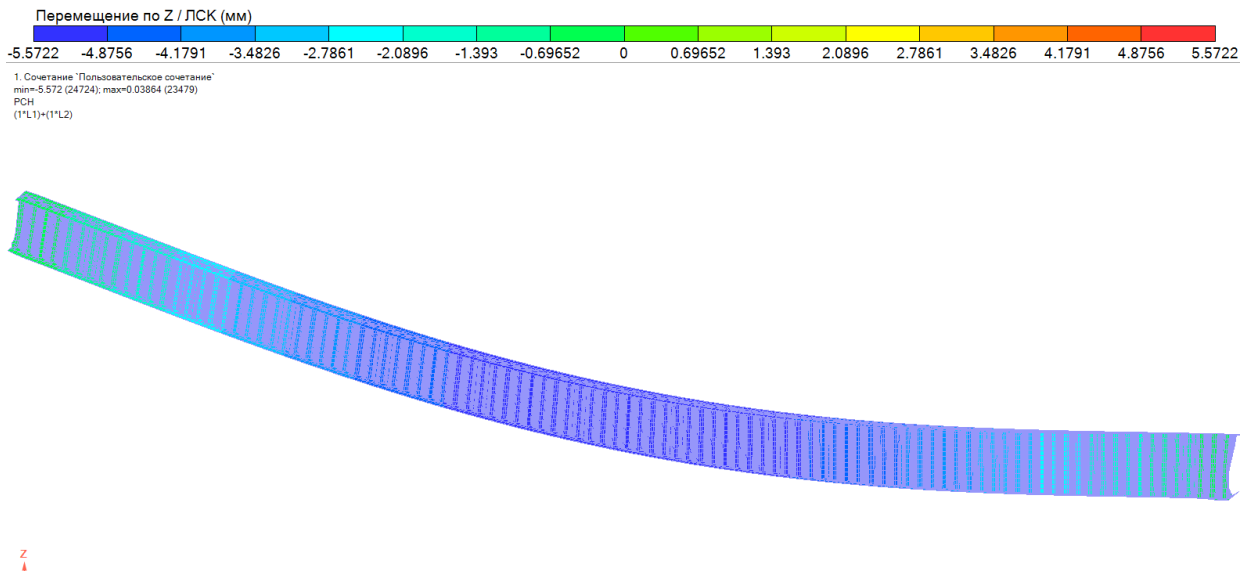


**Рис. 7.** Геометрические характеристики гофрирования стенки  
**Fig. 7.** Geometric characteristics of wall corrugation



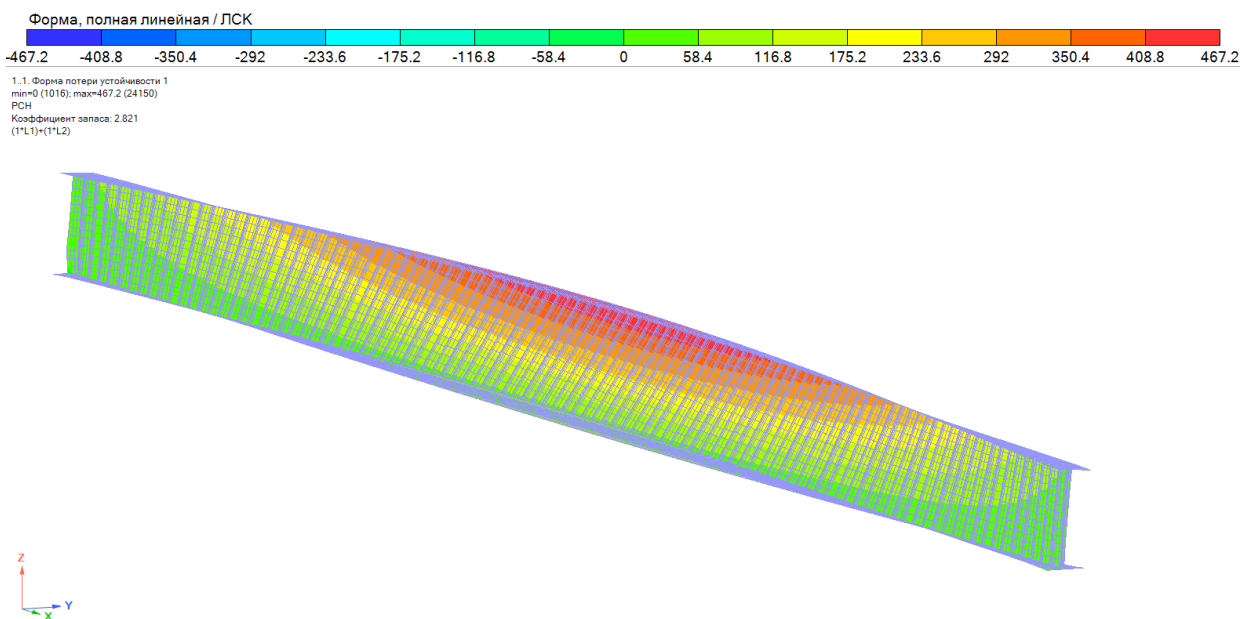
**Рис. 8.** Фрагмент численной модели гофро-балки  
**Fig. 8.** A fragment of a numerical model of a sin-beam

После проведения статического расчета балки при загрузке нагрузкой от конструкции покрытия и снега были получены результаты прогиба по оси Z с максимальным значением в центре пролета 5,572 мм (рис. 9).



**Рис. 9.** Перемещения по оси Z в гофро-балке.  
**Fig. 9.** Movement along the Z axis in a sin-beam

Коэффициент запаса при расчете на местную устойчивость равен 2,821. Первая форма потери устойчивости гофро-балки приведена на рис. 10.



**Рис. 10.** Первая форма потери устойчивости гофро-балки  
**Fig. 10.** The first form of loss of stability of a sin-beam

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчетов для обоснования применения гофро-балки в качестве конструкции покрытия приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета  
**Table 2.** Calculation results

№	Параметр	Балка с плоской стенкой	Гофро-балка	Процентное соотношение, %
1	Максимальный прогиб, мм	5,595	5,572	-0,41
2	Коэффициент запаса устойчивости	2,585	2,821	+8,36
3	Металлоемкость балки, кг	1 468,5	912	-38



Сравнение результатов расчета показало, что при пролете равном 15 м применение гофро-балки в качестве несущей конструкции покрытия целесообразно, так как:

- значение прогиба в центре балки уменьшилось на 0,41 %;
- коэффициент запаса устойчивости увеличился на 8,36 %;
- вес конструкции уменьшился на 38%.

Однако, стоит отметить необходимость увеличения высоты стенки гофро-балки и ширины полки, для достижения необходимого запаса прочности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данной работы:

- был выполнен подбор аналогичных по несущей способности профилей двутавра с плоской и гофрированной стенкой;
- определены параметры для сравнения двух профилей;
- было выполнено численное моделирование и расчет двух вариантов балок для получения значений параметров сравнения;
- анализ полученных данных показал, что применение гофро-балки в качестве несущей конструкции покрытия целесообразно.

С помощью данного алгоритма действий было доказано, что применение гофро-балок целесообразно, особенно в тех случаях, когда необходимо существенно снизить собственный вес здания, передаваемый на фундамент, или в целях экономии денежных средств.

При оптимизации сечения гофро-балки, была выяснена необходимость увеличения высоты стенки и ширины полки, в целях обеспечения необходимой несущей способности. Следовательно, можно сделать вывод о том, что проектирование зданий и сооружений с использованием гофрированных конструкций позволит уменьшить металлоемкость и повысить устойчивость конструкций, работающих на изгиб, однако, применение таких конструкций требует особого обоснования, ведь их использование целесообразно не во всех случаях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. № 6. С. 676–687. DOI:10.22227/1997-0935.2021.6.676-687. EDN: XDBUII.
2. Баязитова Ю.А. Случаи применения рамных каркасов из двутавров с гофрированной стенкой в современном строительстве // АЛЛЕЯ НАУКИ. 2020. № 45(6). С. 264–277. EDN: STXPLQ.
3. Дмитриева Т.Л., Уламбаяр Х. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании // Технические науки. Строительство. 2015. № 4(15). С. 132–138. EDN: VHDRER.
4. Соболев Ю.В., Рыбкин И.С. Конструкционный анализ гофрированных металлических изгибаемых элементов // Вестник МГСУ. 2007. № 3. С. 144–148.
5. Серпик И.Н., Балабин П.Ю. Снижение материалоемкости стальных рам без сокращения резерва несущей способности конструкций // Строительство и реконструкция. 2015. № 62(6). С. 66–74. EDN: VBTQQV.
6. Мартынюк А.Я., Нилов А.А., Лазнюк М.В. Сварные соединения элементов двутаврового сечения с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Металлические конструкции. 2008. С. 237–244.
7. Брянцев А.А., Абсиметов В.Э., Лалин В.В. Эффективность применения двутавров с гофрированными стенками в производственных зданиях // Строительство Уникальных Зданий И Сооружений. 2017. № 54(3). С. 93–104. DOI:10.18720/CUBS.54.8. EDN: YSPKZR.
8. Erdal F., Tunca O., Doğan E. Optimum Design of Composite Corrugated Web Beams Using Hunting Search Algorithm // International Journal Of Engineering & Applied Sciences. 2017. № 2(9). P. 156–156. DOI:10.24107/ijeas.323633.
9. Erdal F., Tunca O., Taş S., Carbas S. Experimentally Tests of Optimally Designed Composite Corrugated Web Beams // 3rd International Conference on Mechanics of Composites. 2017. № April 2022. P. 41. DOI:10.15651/978-88-938-5029-2.
10. Степаненко, А. Н. Стальные двутавровые стержни с волнистой стенкой: учебное пособие / А.Н. Степаненко. – Хабаров. гос. техн. ун-та, 1999. – 115 с
11. Проектирование металлических конструкций: учебное пособие / С.М. Тихонов, В.Н. Алехин., З.В. Беляева [и др.]. Санкт-Петербург: Изд-во Перо, 2020 468 с. - ISBN:9785001714392.

#### ОБ АВТОРАХ

**Мария Сергеевна Захаркевич** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: [mariazaharkevich@yandex.ru](mailto:mariazaharkevich@yandex.ru)

#### ABOUT THE AUTHORS

**Maria S. Zaharkevich** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: [mariazaharkevich@yandex.ru](mailto:mariazaharkevich@yandex.ru)

УДК 691

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ CLT-ПАНЕЛЕЙ ДЛЯ ЖИЛОЙ МНОГОЭТАЖНОЙ ЗАСТРОЙКИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Д.И. Арзиманов, З.А. Гаевская

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

**Аннотация.** Технический прогресс строительной отрасли 21-го века привел к использованию в конструкциях зданий новых материалов. Особое внимание научного сообщества и девелопмента сосредоточено на потенциале дерева, ввиду его природного происхождения, доступности, возобновляемости, энергоэффективности и относительной дешевизне. Эксперименты развитых стран по возведению и эксплуатации многоэтажных жилых зданий из CLT-панелей перерастают в устойчивую практику, а российский рынок девелопмента начинает осваивать для себя новую отрасль. В статье рассмотрены нормативно-правовые предпосылки для использования ДПК в многоквартирном жилом строительстве. Проведенный в статье сравнительный анализ теплотехнических характеристик двух стеновых конструкций из CLT (ДПК) и железобетона в климатических условиях г. Санкт-Петербург доказал преимущество использования древесины перекрестно-клееной с точки зрения расхода тепловой энергии и требуемой толщины утеплителя для стен типа СФТК. Статья актуальна для застройщиков и проектировщиков жилых многоэтажных зданий ленинградской области.

**Ключевые слова:** ДПК, CLT, девелопмент, сравнительный анализ, жилые здания, многоквартирные дома, несущие конструкции, перекрестно-клееные панели, КДК, дерево, теплотехнический расчет

**Ссылка для цитирования:** Арзиманов Д.И., Гаевская З.А. Сравнительный анализ энергоэффективности CLT-панелей для жилой многоэтажной застройки Санкт-Петербурга // Инженерные исследования. 2023. №2 (12). С. 11-18. EDN: HGAQIZ

## COMPARATIVE ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF CLT-PANELS FOR RESIDENTIAL HIGH-RISE BUILDINGS IN ST. PETERSBURG

D.I. Arzimanov, Z.A. Gaevskaya

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

**Abstract.** Technical progress in the construction industry of the 21st century has led to the use of new materials in building structures. Particular attention of the scientific community and the development industry is focused on the potential of wood, due to its natural origin, availability, renewability, energy efficiency and relative cheapness. Experiments of developed countries on the construction and operation of multi-storey residential buildings made of CLT-panels are growing into a sustainable practice, and the Russian development market is beginning to master a new industry for itself. In this article regulatory and legal prerequisites for the use of CLT in multifamily residential construction are considered. The comparative analysis of the thermal characteristics of two wall structures made of CLT and reinforced concrete in the climatic conditions of St. Petersburg proved the advantage of using cross-laminated timber in terms of heat energy consumption and the required thickness of insulation for walls of the ETICS type. The article is relevant for developers and designers of residential multi-storey buildings in the Leningrad region.

**Keywords:** CLT, X-Lam, development, comparative analysis, residential buildings, multi-family buildings, load-bearing structures, cross-laminated timber, wood, thermal calculation.

**For citation:** Arzimanov D.I., Gaevskaya Z.A. Comparative energy efficiency analysis of CLT-panels for residential high-rise buildings in St. Petersburg // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.2 (12). Pp. 11-18. EDN: HGAQIZ

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно ГОСТ Р 56706-2022, древесина перекрестно-клееная (ДПК от англ. CLT; Cross-Laminated Timber) – это изготовленная заводским способом деревянная массивная плита, состоящая не менее чем из трех ортогонально склеенных слоев из цельных или сращенных по длине на зубчатое соединение досок и предназначенная для применения в несущих и ограждающих строительных конструкциях (рис. 1).

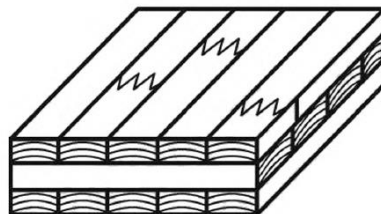


Рис.1. Древесина перекрестно-клееная<sup>1</sup>  
Fig.1. Cross-laminated wood

Сегодня в России производят панели шириной до 3,5 и длиной до 16 м, при толщине до 320 мм. Количество слоев варьируется от 3-х до 8-ми. Плотность такой плиты составляет  $500\text{кг/м}^3$ , что в 4 раза легче бетона класса В25<sup>2</sup>.

Древесина перекрестно-клееная (ДПК) за последние 30 лет практики хорошо зарекомендовала себя в европейском жилом строительстве [1]. Благодаря природному происхождению, сравнительно низкому расходу энергии на производство материал вписался в зеленую повестку [2]. Как показывает исследование [3], при производстве CLT-панелей используется на 28% энергии меньше, чем для железобетона. Кроме того, он демонстрирует конкурентные, в сравнении с железобетоном, результаты по восприятию нагрузок и сопротивлению деформациям, что позволяет применять плиты в многоэтажных зданиях [4].

В России ДПК – это новый, малоизученный и перспективный строительный материал, внедрение которого в многоэтажный девелопмент во многом зависит от совершенствования нормативно-правовой базы [5]. Актуальной инженерной задачей в связи с зеленой повесткой является повышение энергоэффективности ограждающих конструкций [6]. Известно, что зависимость между количеством теплотерь ( $Q$ ) через  $1\text{ м}^2$  ограждающей конструкции и значением приведенного сопротивления теплопередаче ( $R_0^{\text{пр}}$ ) выражается гиперболической функцией [7]. Т.к. толщина несущего слоя в рамках задачи является константой, то переменной будет толщина ( $\delta$ ) утеплителя. В качестве утеплителя выбраны плиты минераловатные из каменного волокна теплопроводностью по условиям «Б»  $\lambda=0,048\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$  в связи противопожарными требованиями к ДПК [8].

Цель исследования – проведение сравнительного анализа влияния значений приведенного сопротивления теплопередаче ( $R_0^{\text{пр}}$ ) стеновых ограждающих конструкций типа СФТК на основе ДПК и железобетона на толщину ( $\delta$ ) минераловатного утеплителя.

Задачи исследования:

1. Изучение нормативно-правовых предпосылок строительства многоэтажных жилых зданий с применением ДПК в России.
2. Выявление особенностей строения стеновых ограждающих конструкций типа СФТК на основе ДПК и железобетона.
3. Установление графической зависимости между значениями потерь тепловой энергии на отопление ( $Q$ ) и толщиной минераловатного утеплителя ( $\delta$ ).
4. Определение значения перерасхода утеплителя по толщине.
5. Сравнение разницы в затратах энергии на отопление зданий ( $Q$ ) с ограждающими конструкциями двух вариантов с определением процента экономии.
6. Анализ зависимости теплотерь от изменения толщины утеплителя с целью определения наиболее энергоэффективного варианта.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 56706-2022 Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия

<sup>2</sup> Каталог типовых архитектурных узлов с применением перекрестно-клееной древесины (CLT) [Электронный ресурс]. – URL: <https://segezha-group.com/product/clt-panel/?ysclid=lm05tdwruf782794325#section-documents> (дата обращения: 01.09.2023).

## НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

В стимуляции развития жилищного CLT-девелопмента в РФ играют роль несколько категорий документов.

Первая категория – общестроительная. Подписанный 7 мая 2018 г. Указ Президента РФ № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»<sup>3</sup> предполагает увеличить объем жилищного строительства не менее, чем до 120 млн. квадратных метров в год. Кроме того, в нем упоминается модернизация строительной отрасли и повышение качества индустриального жилищного строительства, а также введение новых технологий. Совершенствование нормативно-правовой базы – один из ключевых пунктов. Документ предполагает также сокращение вредных выбросов в атмосферу не менее чем на 20 процентов совокупного объема.

Вторая категория – нормативно-технологическая. Первый документ - СП 452.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций»<sup>4</sup>. Пункт 5.6 допускает применение ДПК в качестве несущих конструкций в жилых зданиях высотой до 28 м включительно. Пункт 7.5 посвящен остальным правилам применения ДПК.

Далее, ГОСТ Р 56706-2022, ранее изданный в 2015-ом закрепил официальное название древесины перекрестно-клееной ДПК взамен CLT, а также содержит требования для соблюдения при разработке технических условий и стандартов плит.

В начале 2022 года вышла редакция №3 к СП 64.13330.2017<sup>5</sup>, дополненная информацией про ДПК. Документ ссылается на СП452.1325800.2019 и допускает использование деревянных конструкций в зданиях до 28 м высотой.

Третья категория – энергоэффективная. Ключевое значение имеет Указ Президента РФ от 4 ноября 2020 года № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов»<sup>6</sup>, согласно которому к 2030 году необходимо сократить выбросы CO<sup>2</sup> до 70 процентов. После было подготовлено Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 г. №3052-р «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года»<sup>7</sup>. В [9] сказано необходимости строительства с 2030 г. новых домов с классом энергетической эффективности не ниже В, а с 2035 г. не ниже А, как о необходимой мере достижения целей Стратегии. Согласно Приказу Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ №399 от 6 июня 2016 года<sup>8</sup>, классу А соответствует здание с величиной отклонения значения фактического удельного расхода энергетических ресурсов от базового уровня  $\delta$  от -40 до -50%.

## ВЫБОР ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Для исследования было выбрано несколько вариантов стеновых конструкций из ДПК и железобетона. ДПК - сравнительно молодой на российском рынке материал, поэтому был рассмотрен опыт компании ООО «Сокол СиЭлТи», дочернего предприятия ПАО «Сегежа Групп». В каталоге типовых архитектурных узлов и деталей с применением перекрестно-клееной древесины (CLT) представлено несколько конструкций наружных стен. Каждый тип стен состоит из 4-х функциональных слоев: базового (основания), энергоэффективного, наружного декоративно-защитного и внутренней отделки. В рамках исследования, рассмотрены следующие варианты: СФТК с наружными штукатурными слоями на основе ДПК (рис. 2) и ж/б (рис. 3)

<sup>3</sup> Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027> (дата обращения: 01.09.2023).

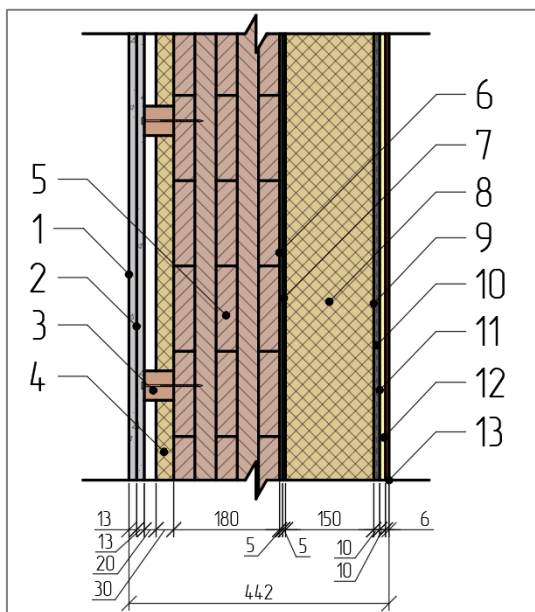
<sup>4</sup> СП 452.1325800.2019 Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования

<sup>5</sup> Изменение №3 к СП64.13330.2017 «СНИП II-25-80 Деревянные конструкции»

<sup>6</sup> Указ Президента Российской Федерации от 04.11.2020 г. № 666 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (дата обращения: 01.09.2023)

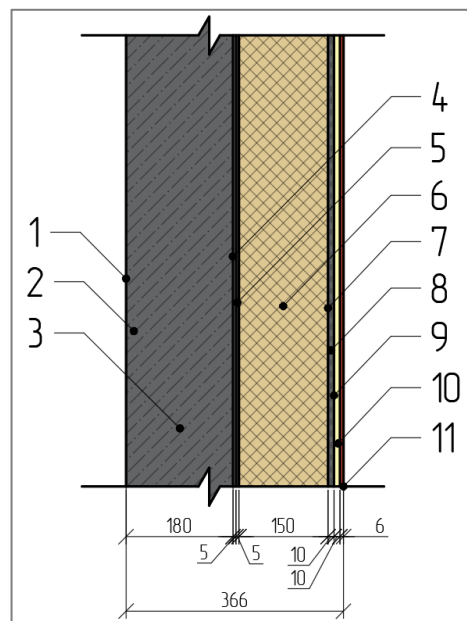
<sup>7</sup> Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2021 г. №3052-р [Электронный ресурс]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202111010022?ysclid=lm08bh33wi200111706> (дата обращения: 01.09.2023).

<sup>8</sup> Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 06.06.2016 № 399/пр "Об утверждении Правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов" [Электронный ресурс]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201608100003?ysclid=lm08emo9nj985416797> (дата обращения: 01.09.2023).



**Рис. 2.** СФТК на ДПК: 1 – штукатурка; 2 – ГКЛЮ два слоя; 3 – брусок 50x50; 4 – минеральная вата; 5 – ДПК пятислойная; 6 – пароизоляция; 7 – клеевая смесь; 8 – минераловатный утеплитель; 9 – штукатурно-клеевая смесь; 10 – фасадная стеклосетка; 11 – адгезионный грунт; 12 – декоративная штукатурка; 13 – краска. Автор: Д.И. Арзиманов

**Fig. 2.** ETICS with CLT: 1 - plaster; 2 - Fire Resistant Drywall two layers; 3 - bar 50x50; 4 - mineral wool; 5 - five-layered CLT; 6 - vapor barrier; 7 - glue mixture; 8 - mineral wool insulation; 9 - plaster and glue mixture; 10 - facade glass mesh; 11 - adhesive primer; 12 - decorative plaster; 13 - paint. Author: D.I. Arzimanov



**Рис. 3.** СФТК на ж/б: 1 – краска; 2 – штукатурка; 3 – железобетон; 4 – пароизоляция; 5 – клеевая смесь; 6 – минераловатный утеплитель; 7 – штукатурно-клеевая смесь; 8 – фасадная стеклосетка; 9 – адгезионный грунт; 10 – декоративная штукатурка; 11 – краска. Автор: Д.И. Арзиманов

**Fig. 3.** ETICS on reinforced concrete: 1 - paint; 2 - plaster; 3 - reinforced concrete; 4 - vapor barrier; 5 - adhesive mixture; 6 - mineral wool insulation; 7 - plaster-adhesive mixture; 8 - facade glass mesh; 9 - adhesive primer; 10 - decorative plaster; 11 - paint. Author: D.I. Arzimanov

Т.к. необходимо обеспечить нормативное время для пожарной эвакуации, стена на основе ДПК обшивается дополнительно изнутри слоем каменной ваты и двумя листами огнестойкого гипсокартона [10].

### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Для климатических условий Санкт-Петербурга определяется значение градусо-суток отопительного периода,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}/\text{год}$ , определяют по формуле (1):

$$ГСОП = (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) \cdot z_{\text{от}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{от}}$ ,  $Z_{\text{от}}$  - средняя температура наружного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ , и продолжительность, сут./год, отопительного периода, принимаемые по СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более  $8^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{в}}$  – расчетная температура внутреннего воздуха здания,  $^{\circ}\text{C}$ , принимаемая при расчете ограждающих конструкций групп зданий, указанных в табл.3 СП 50.13330.2012 (по поз. 1 – по минимальным значениям оптимальной температуры соответствующих зданий по ГОСТ 30494 (в интервале  $20-22^{\circ}\text{C}$ )).

$$ГСОП = (20 - (-1,2)) \cdot 211 = 4473,2 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}}{\text{год}},$$

Далее, определяется требуемое сопротивление теплопередаче  $R_0^{mp}$  по формуле (2):

$$R_0^{mp} = a \cdot ГСОП + b \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, значение которых следует принимать по данным таблицы 3 СП50.13330.2012 для соответствующих групп зданий.

$$R_0^{mp} = 0,00035 \cdot 4473,2 + 1,4 = 2,96562 \frac{\text{M}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}},$$

Затем, нормированное значение приведенного сопротивления теплопередаче  $R_0^{норм}$  по формуле (3):

$$R_0^{норм} = R_0^{mp} \cdot m_p, \quad (3)$$

где  $m_p$  - коэффициент, учитывающий особенности региона строительства. В расчете принимается равным 1.

$$R_0^{норм} = R_0^{mp} = 2,96562 \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm}$$

Характеристики ограждающей конструкции типа СФТК на ДПК представлены в табл.1.

**Таблица 1.** Теплотехнические характеристики ограждающей конструкции типа СФТК на ДПК  
**Table 1.** Thermal characteristics of the ETICS type envelope with CLT

Номер п/п	Материал	Толщина слоя ( $\delta$ ), м	Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), Вт/( $M^2 \cdot ^\circ C$ )
1	Плиты минераловатные из каменного волокна	?	?
2	Сосна и ель поперек волокон	0,18	0,18
3	Плиты минераловатные из каменного волокна	0,03	0,048
4	Замкнутая воздушная прослойка	0,02	0,14
5	ГКЛО	0,026	0,15

Определяется условное сопротивление теплопередаче  $R_0^{усл}$ ,  $M^2 \cdot ^\circ C / Bm$ , ограждающей конструкции по формуле (4):

$$R_0^{усл} = \frac{1}{\alpha_в} + \sum R_s + \frac{1}{\alpha_н}, \quad (4)$$

где  $\alpha_н$  коэффициент теплоотдачи наружной поверхностей ограждающей конструкции для условий холодного периода года, Вт/( $M^2 \cdot ^\circ C$ ), принимаемый по таблице 6;  $\alpha_в$  – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, принимаемый по табл. 4.  $R_s$  - термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, ( $M^2 \cdot ^\circ C$ )/Вт, определяется по формуле (5):

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}, \quad (5)$$

где  $\delta_s$  – толщина слоя, м;  $\lambda_s$  – теплопроводность материала слоя, Вт/( $M^2 \cdot ^\circ C$ ), принимаемая по табл. 8, в зависимости от условий эксплуатации.

$$R_0^{усл} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,18}{0,18} + \frac{0,03}{0,048} + \frac{0,02}{0,14} + \frac{0,026}{0,15} + \frac{1}{23} = 2,1 \left( \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm} \right),$$

Т.к.  $R_0^{усл} < R_0^{норм}$ , то необходимо определить толщину утеплителя для обеспечения минимальных требований теплозащиты (6).

$$\delta_{ym}^{req} = \lambda_{ym} \cdot R_{targ} \quad (6)$$

Минимально допустимое (требуемое) термическое сопротивление теплоизоляционного материала определяется по формуле (7):

$$R_{targ} = R_0^{норм} - R_0^{усл} \quad (7)$$

Требуемая толщина утеплителя для СФТК на ДПК составит:

$$\delta_{ym}^{req} = 0,048 \cdot (2,96562 - 2,1) = 0,041 м \approx 0,05 м$$

Значение термического сопротивления R для СФТК на ДПК будет равно:

$$R = 2,1 + \frac{0,05}{0,048} = 3,14 \left( \frac{M^2 \cdot ^\circ C}{Bm} \right)$$

Таким образом, определена нижняя граница термического сопротивления R для СФТК на ДПК.

Потери тепловой энергии на отопление  $Q_{огр}$ , кВт ч/год через 1  $M^2$  ограждающих конструкций находится по формуле (8):

$$Q = 0,024 \cdot GCOП \cdot \frac{F}{R} \quad (8)$$

где F – площадь поверхности ограждающей конструкции принимаемая 1 м<sup>2</sup>; GCOП– то же, что и в (1); R – термическое сопротивление ограждающей конструкции, (м<sup>2</sup>·°C)/Вт; 0,024 – переводной коэффициент потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции из Вт · сут в кВт · ч (1 сут =24 ч, 1Вт= 0,001кВт, 1Вт · сут = 0,024 кВт · ч).

$$Q = 0,024 \cdot 4473,2 \cdot \frac{1}{3,14} = 34,19 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{год})$$

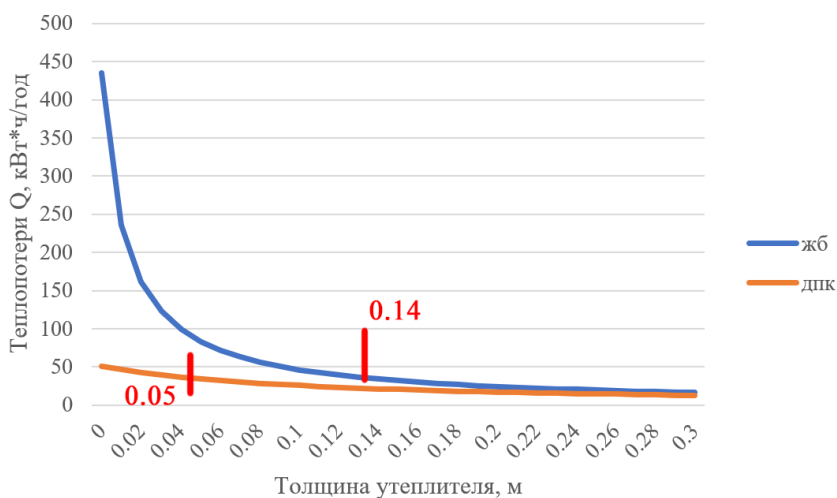
Пользуясь аналогичным методом, определим значение термического сопротивления R для СФТК на железобетоне. Характеристики конструкции представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Теплотехнические характеристики ограждающей конструкции типа СФТК на ж/б  
**Table 2.** Thermal characteristics of the enclosing structure of ETICS type with reinforced concrete

Номер п/п	Материал	Толщина слоя (δ), м	Коэффициент теплопроводности (λ), Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)
1	Плиты минераловатные из каменного волокна	0,14	0,048
2	Железобетон	0,18	2,04

Нижняя граница термического сопротивления R будет равна 3,16 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт при толщине утеплителя 0,14 м. Значение потерь тепловой энергии на отопление Q<sub>жб</sub> равно 33,94 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год) .

Рассмотрим зависимость потери тепловой энергии Q от толщины утеплителя δ в обоих вариантах конструкций (рис.4).



**Рис. 4.** График зависимости теплопотери от толщины утеплителя для СФТК на основе ж/б и ДПК.

Автор: Д.И. Арзиманов

**Fig. 4.** Graph of dependence of heat loss on insulation thickness for ETICS based on reinforced concrete and CLT.

Author: D.I. Arzimanov

Как видно из графика, обеспечение минимального требуемого значения термического сопротивления R для стены типа СФТК на основе ДПК при кратности минераловатного утеплителя 0,01 м соответствует значению толщины δ 0,05 м. Для железобетона значение δ равно 0,14 м. Энергоэффективность при одинаковой толщине утеплителя равной 0,05 м определяются формулой (9):

$$Q_0 = Q_{дпк} - Q_{жб} = 34,17 - 83,33 = -49,15 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{год}) \quad (9)$$

Таким образом, затраты энергии на отопление при использовании СФТК на основе древесины перекрестно-клееной получились в 2,43 раза меньше по сравнению с железобетоном.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения исследования установлено, что:

1. Нормативно-правовые предпосылки свидетельствуют о заинтересованности государства и девелопмента в технологии перекрестно-клееных панелей. Существующие нормативные документы позволяют возведение жилых многоэтажных зданий до 28 м высотой.

2. Конструктивно стены типа СФТК на основе ДПК и ж/б отличаются между собой внутренней отделкой. Для ограждающей конструкции на основе ДПК требуется предусматривать защиту от огневого воздействия с внутренней стороны. Слой каменной ваты толщиной в 30 мм не оказывает серьезного влияния на сопротивление теплопередаче.

3. Зависимость потерь тепловой энергии от толщины утеплителя представлена гиперболической функцией для стены типа СФТК с несущим слоем из железобетона. Для стены на основе ДПК функция параболическая. Это свидетельствует о перерасходе утеплителя в случае с железобетоном почти в 3 раза.

4. Для утепления стеновой ограждающей конструкции типа СФТК на основе ДПК требуется на 90 мм меньше минераловатного утеплителя, чем для железобетонного варианта.

5. Разница в энергии, затраченной на отопление здания из ДПК по сравнению с железобетонным, составляет 49,15 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год). Это дает экономию в 243%

6. Изменения толщины утеплителя ( $\delta$ ), м 0-100 мм сокращает количество теплопотерь для железобетонной стены с 450 до 50 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год). Для ДПК при аналогичных условиях теплопотери уменьшаются с 50 до 35 кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год). Это свидетельствует о большей энергоэффективности ДПК.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wieruszewski M., Mazela B. Cross laminated timber (CLT) as an alternative form of Construction Wood // *DRVNA INDUSTRIJA*, 2017. №4 (68). P. 359-367. DOI:10.5552/drind.2017.1728
2. Hansted J.A., Lin N.R., Walbech M.R. Comparative life cycle assessment of cross laminated timber building and concrete building with special focus on biogenic carbon // *Energy & Buildings*, 2021. №254. pp. 111604 DOI:10.1016/j.enbuild.2021.111604
3. Sathre R., Gustavsson L. Using wood products to mitigate climate change: External costs and structural change // *Applied Energy*, № 86, 2009. P. 251-257. DOI:10.1016/j.apenergy.2008.04.007
4. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // *Инженерный вестник Дона*, №6 (90), 2022. С 329-339. EDN: TWGFWN
5. Есауленко И.В. Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта // *Архитектура, строительство, транспорт*, №4 (98), 2021. С. 17-25. DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25 EDN: OFUFZP
6. Кожин В.А., Кремлёв С. Сущность понятия энергоэффективности и показатели её измерения в жилищном строительстве // *Научный альманах*, № 5-1 (103), 2023. С. 33-37.
7. Горшков А.С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // *Инженерно-строительный журнал*, № 1, 2010. С 9-13 EDN: MZJCQP
8. Serrano E. Översikt och delprojektrapporter i // *School of Technology and Design Reports*. 2009. No. 47. P 1-25. ISBN 978-3-902320-59-9
9. Булгакова И.А. Повышение энергоэффективности в сфере жилищно-коммунального комплекса как путь снижения углеродного следа // *Энергосбережение* №7, 2022. С 1-13. EDN: RHBQFW
10. Teibinger M. Multi-storey Timber Houses in Urban Regions in Austria // *Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe – Timber Committee*. Geneva. 2010. P 1-10

## ОБ АВТОРАХ

**Давид Ифтихарович Арзиманов** – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: arzimanol.david@mail.ru

**Злата Анатольевна Гаевская** – доцент, к.арх. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: gaezлата@yandex.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**David I. Arzimanov** – the Master degree student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: [arzimanov.david@mail.ru](mailto:arzimanov.david@mail.ru)

**Zlata A. Gaevskaya** – Associate Professor, architecture PhD. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: [gaezlata@yandex.ru](mailto:gaezlata@yandex.ru)

УДК 691

## УТЕПЛЕНИЕ ФАСАДОВ ПРИ РЕНОВАЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ ТИПОВЫХ СЕРИЙ

**М.К. Андреев, О.С. Гамаюнова**

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

**Аннотация.** Типовые серии жилых домов составляют большую часть жилого фонда еще с советских времен, когда нужно было построить много жилья в короткие сроки. Построенные в то время жилые дома не соответствуют современным строительным нормам. Низкий уровень тепловой защиты ограждающих конструкций в типовых зданиях обусловлен отсутствием требований к теплозащитным характеристикам ограждающих конструкций в действующих на момент строительства этих зданий нормативных документах. В статье произведен теплотехнический расчет ограждающих стеновых конструкций жилых домов типовой серии 137 для климатических условий Санкт-Петербурга, определен срок окупаемости инвестиций в дополнительное утепление фасадов домов 137 серии. Расчеты проведены на примере теплоизоляционных материалов торговых марок KNAUF, ISOROC, ISOVER, ROCKWOOL, PAROC, URSA, ЭКОБЕР. Показано, что с учетом тенденции изменения тарифов на тепловую энергию в Санкт-Петербурге за последние 10 лет при среднегодовом росте тарифов в 6,45%, средний срок окупаемости инвестиций составляет 23-25 лет.

**Ключевые слова:** типовые серии жилых домов, реновация, энергоэффективность, тепловая защита, теплоизоляционный материал, утеплитель, фасад, теплотехнический расчет, срок окупаемости.

**Ссылка для цитирования:** Андреев М.К., Гамаюнова О.С. Утепление фасадов при реновации жилых зданий типовых серий // Инженерные исследования. 2023. №2 (12). С. 19-26. EDN: LTHEIC

## FACADE INSULATION DURING RENOVATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS OF STANDARD SERIES

**M.K. Andreev, O.S. Gamayunova**

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

**Abstract.** Standard series of residential buildings have made up the majority of the housing stock since Soviet times, when it was necessary to build a lot of housing in a short time. Residential buildings built at that time do not meet today's building codes. The low level of thermal protection of enclosing structures in standard buildings is due to the lack of requirements for the thermal protection characteristics of enclosing structures in the regulatory documents in force at the time of construction of these buildings. The article carried out a thermal engineering calculation of the enclosing wall structures of residential buildings of the 137 standard series for the climatic conditions of St. Petersburg, and determined the payback period for investments in additional insulation of the facades of the 137 series buildings. Calculations were carried out using the example of thermal insulation materials of the KNAUF, ISOROC, ISOVER, ROCKWOOL, PAROC, URSA, ECOVER brands. It is shown that, taking into account the trend of changes in tariffs for thermal energy in St. Petersburg over the past 10 years, with an average annual increase in tariffs of 6.45%, the average payback period for investments is 23-25 years.

**Keywords:** standard series of residential buildings, renovation, energy efficiency, thermal protection, thermal insulation material, insulation, facade, thermal engineering calculation, payback period.

**For citation:** Andreev M.K., Gamayunova O.S. Facade insulation during renovation of residential buildings of standard series // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.2 (12). Pp. 19-26. EDN: LTHEIC

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с действующим законодательством, на протяжении эксплуатации зданий должно быть обеспечено эффективное и экономное расходование энергетических ресурсов при соблюдении требований к параметрам внутреннего микроклимата, а также санитарно-гигиенических требований. Современные дома благодаря наличию нормативных документов, теплоустойчивы и энергоэффективны, однако многие более ранние типовые серии не утеплены вовсе, хотя и остаются самым массовым жильем. Важно привести в соответствие с действующими нормами при наименьших затратах те из них, которые останутся разумным выбором для покупки достаточно долгое время. Кроме правильного выбора теплоизоляционного материала, необходимо обратить внимание на экономическую составляющую работ по утеплению ограждающих конструкций типовых серий зданий, ведь тепловая энергия дорого стоит и дорожает со временем, а теплоизоляционный материал должен прослужить по крайней мере до следующей реновации, которая может и не случиться. В этой связи важно рассчитать за какое время утепление фасадов окупится и, по возможности, дать рекомендации по подбору теплоизоляционного материала. Энергосберегающие мероприятия должны не только приводить к уменьшению объемов потребляемой зданиями энергии, но и быть окупаемыми [1-6].

Обзор методов повышения энергоэффективности жилых зданий описаны в работах [7-12]. Авторы рассматривают применение энергоэффективных теплоизоляционных материалов, уменьшение негативного влияния наружного климата за счет ориентации здания по сторонам света, применение энергоэффективного инженерного оборудования и др.

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Оценку эффективности утепления фасадов при реновации жилых зданий проведем на примере классической 137-ой серии зданий (рис.1), которая обладает более рациональной планировкой (рис.2) по сравнению с другими сериями того времени, потому что при ее создании учитывали прошлый опыт строительства типовых зданий.



Рис. 1. Здание 137 серии<sup>1</sup>  
Fig. 1. Building 137 series



Рис. 2. Планировки квартир в домах 137 серии<sup>2</sup>  
Fig. 2. Layouts of apartments in houses of series 137

Таблица 1. Основные характеристики домов серии 137  
Table 1. The main characteristics of the houses of the 137 series

Характеристика	Описание
Этажность	9-16
Материал наружных стен	облегченные керамзитобетонные панели
Высота жилых помещений	270 см
Квартиры	одно-, двух-, трех-, четырех-, пятикомнатные
Площади кухонь	7,7-14 м <sup>2</sup>
Производитель	ДСК-4
Годы строительства	1973-1995
Основные районы расположения	Все районы Санкт-Петербурга, за исключением центральных

<sup>1</sup> 137 (серия домов) [Электронный ресурс]. - URL: <https://skedraft.ru/serii-domov/137> (дата обращения: 04.05.2022)

<sup>2</sup> Планировки квартир дома типовой серии 137 [Электронный ресурс]. - URL: [https://www.kvmetr.ru/information/homes\\_series/137/](https://www.kvmetr.ru/information/homes_series/137/) (дата обращения: 24.04.2022)

Теплотехнический расчет ограждающих конструкций стеновых панелей здания 137-й серии выполнен в соответствии с СП 50.13330.2012, который применяется при проектировании тепловой защиты строящихся или реконструируемых зданий, в которых нужно поддерживать определенный температурно-влажностный режим.

**Таблица 2.** Исходные данные для расчетов  
**Table 2.** Initial data for calculations

Характеристика	Описание
Населенный пункт	Санкт-Петербург
Условия эксплуатации ограждающих конструкций	Б
Температура внутреннего воздуха (жилые помещения)	$t_a - 20 \text{ }^\circ\text{C}$
Температура наиболее холодной пятидневки	$t_{х.п.} - -24 \text{ }^\circ\text{C}$
Характеристика	Описание
Средняя температура воздуха з отопительный период ( $<8 \text{ }^\circ\text{C}$ )	$t_{ср.о.} - 1,3 \text{ }^\circ\text{C}$
Продолжительность отопительного периода ( $<8 \text{ }^\circ\text{C}$ )	$z_{от} - 213 \text{ сут.}$

Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) определяются по формуле (1):

$$ГСОП = (t_b - t_{от}) z_{от}, \quad (1)$$

где:  $t_b$  - расчетная температура внутреннего воздуха здания,  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{от}$ ,  $z_{от}$  - средняя температура наружного воздуха,  $^\circ\text{C}$ , и продолжительность, сут/год, отопительного периода, принимаемые по СП 131.13330 для жилых и общественных зданий для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$ГСОП = (20 - (-1,3)) \cdot 213 = 4537 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{сут/год}$$

Требуемое сопротивление теплопередаче ( $R_0^{тп}$ ) определяется по формуле (2):

$$R_0^{тп} = a \cdot ГСОП + b, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  - коэффициенты, значения которых следует принимать по данным табл.3 СП 50.13330.2012 для соответствующих групп зданий, за исключением графы 6, для группы зданий в строках 1 и 2.

$$R_0^{тп} = 0,00035 \cdot 4537 + 1,4 = 2,99 \text{ (м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)/Вт}$$

Нормируемое сопротивление теплопередаче ( $R_0^{норм}$ ) определяется по формуле (3):

$$R_0^{норм} = R_0^{тп} m_p, \quad (3)$$

где:  $m_p$  - коэффициент, учитывающий особенности региона строительства (в соответствии с СП 50.13330.2012 значения коэффициента  $m_p$  принимается равным 1).

$$R_0^{норм} = 2,99 \cdot 1 = 2,99 \text{ (м}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)/Вт}$$

Термическое сопротивление конструкции ( $R_0$ ) определяется по формуле (4):

$$R_0 = R_{int} + \sum_{i=1}^K R_i + R_{ext}, \quad (4)$$

где:  $R_{int}$  - термическое сопротивление на внутренней поверхности стеновой конструкции;

$R_{ext}$  - термическое сопротивление на внешней поверхности стеновой конструкции;

$K$  - количество слоев ограждения;

$R_i$  - термическое сопротивление  $i$ -го слоя ограждающей конструкции,  $i = \overline{1, K}$ .

Термическое сопротивление на внутренней поверхности стеновой конструкции ( $R_{int}$ ) рассчитывается по формуле (5):

$$R_{int} = \frac{1}{\alpha_{int}}, \quad (5)$$

где:  $\alpha_{int}$  – коэффициент теплопередачи внутренней стеновой конструкции, назначаемый с использованием СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий».

Термическое сопротивление на внешней поверхности стеновой конструкции ( $R_{ext}$ ) рассчитывается по формуле (6):

$$R_{ext} = \frac{1}{\alpha_{ext}} \quad (6)$$

где:  $\alpha_{ext}$  – коэффициент теплопередачи внешней стеновой конструкции, назначаемый с использованием СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий».

Ограждающие конструкции домов 137-ой серии выполнены из керамзитобетона толщиной 350 мм (коэффициент теплопроводности = 0,47 Вт/(м·°C)). С учетом этого термическое сопротивление конструкции будет равно:

$$R_0 = R_{int} + \sum_{i=1}^K R_i + R_{ext} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,35}{0,47} + \frac{1}{12} = 0,94 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

Полученное значение говорит о том, что условие тепловой защиты зданий не выполнено, а ограждающие стеновые конструкции требуют дополнительного утепления.

В качестве дополнительного слоя теплоизоляционного материала, например, можно использовать плиты минераловатные из каменного волокна Rockwool Венти Баттс Д (коэффициент теплопроводности равен 0,038 Вт/(м·°C)).

Требуемая толщина утеплителя ( $\delta_{yt}^{TP}$ ), которая обеспечит требуемое термическое сопротивление ограждающей конструкции, определяется по формуле (7).

$$\delta_{yt}^{TP} = \lambda_{yt} \cdot R_{yt}^{TP}, \quad (7)$$

где:  $\lambda_{yt}$  – коэффициент теплопроводности рассматриваемого утеплителя (значения этих показателей – справочные).

$R_{yt}^{TP}$  – разница между требуемым сопротивлением теплопередаче ( $R_0^{TP}$ ) и термическим сопротивлением конструкции ( $R_0$ ).

С учетом коэффициента теплопроводности Rockwool Венти Баттс Д потребуется 78 мм теплоизоляционного материала. В виду того, что ближайшая к требуемой толщина данного утеплителя составляет 100 мм, то термическое сопротивление ограждающей стеновой конструкции будет равно:

$$R_0^{yt} = R_{int} + \sum_{i=1}^K R_i + R_{ext} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,35}{0,47} + \frac{0,1}{0,038} + \frac{1}{12} = 3,57 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

Таким образом, благодаря использованию теплоизоляционного материала, условие тепловой защиты будет выполнено.

#### ОКУПАЕМОСТЬ ИНВЕСТИЦИЙ В ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ УТЕПЛЕНИЕ ФАСАДОВ

Для расчета прогнозируемого дисконтированного срока окупаемости инвестиций [13], направленных на дополнительное утепление фасадов, будем использовать формулу (8):

$$T_D = \frac{\ln\left(1 + \frac{\Delta K}{\Delta \mathcal{E}} \cdot \frac{r - i}{1 + i}\right)}{\ln \frac{1 + r}{1 + i}} \quad (8)$$

где:  $T_D$  – прогнозируемый дисконтированный срок окупаемости инвестиций, год;

$\Delta K$  – разница капитальных затрат на возведение утепленного и базового вариантов наружных стен (фасадов) здания, руб.

$\Delta \mathcal{E}$  – разность потерь тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции до и после утепления, руб.

$r$  – средний ежегодный рост стоимости тарифов на тепловую энергию.

$i$  - процентная ставка дисконтирования

Очевидно, что наиболее выгодным будет результат с минимальным временем окупаемости.

Капитальные затраты на дополнительное утепление наружной стены существующего здания примем равными 2510 руб./м<sup>2</sup>:

– 256 руб./м<sup>2</sup> - стоимость утеплителя Rockwool ВЕНТИ БАТТС 100 мм;

– 152 руб./м<sup>2</sup> - крепеж и направляющие;

– 393 руб./м<sup>2</sup> - сухие строительные смеси;

– 1709 руб./м<sup>2</sup> - стоимость полного цикла строительно-монтажных работ.

Предположим, что для проведения работ строительная компания взяла аннуитетный кредит под 11,12%<sup>3</sup> на 3 года, тогда коэффициент аннуитета составит 0,033.

Тогда суммарные инвестиции на реализацию энергосберегающего проекта с учетом платежей по кредиту составят (при аннуитетных ежемесячных платежах 3960,8 руб./м<sup>2</sup>:

$$\Delta K = 36 \cdot 0,033 \cdot 2510 = 2982 \text{ руб./м}^2$$

Годовая экономия денежных средств, достигаемая в результате проведения работ по реновации фасадов существующего здания, определяется по формуле (9):

$$\Delta \Delta = (V_1 - V_2) \frac{0,024 \cdot \text{ГСОП}}{1163} \cdot c \quad (9)$$

где:  $c$  - стоимость тепловой энергии, руб./Гкал.

В нашем случае коэффициент теплопередачи наружных стен до утепления ( $V_1$ ) равен:

$$V_1 = \frac{1}{R_0} = \frac{1}{0,94} = 1,06$$

Аналогично коэффициент теплопередачи наружных стен после утепления ( $V_2$ ) равен:

$$V_2 = \frac{1}{R_0^{yt}} = \frac{1}{3,57} = 0,28$$

С учетом того, что в 2022 году стоимость тепловой энергии установлена в размере 1947,79 руб./Гкал, величина уменьшения эксплуатационных затрат за первый отопительный период в результате внедрения энергосберегающих мероприятий составит 142,25 руб./м<sup>2</sup>.

С учетом тенденций изменений тарифов на тепловую энергию в Санкт-Петербурге за последние 10 лет примем среднегодовой рост тарифов равным 6,45%. (табл.3)

**Таблица 3.** Динамика роста тарифов на тепловую энергию в Санкт-Петербурге в 2013–2022 гг.<sup>4</sup>

**Table 3.** Dynamics of growth of heat energy tariffs in St. Petersburg in 2013–2022

Год	Тариф на тепловую энергию, руб./Гкал	Прирост стоимости тепловой энергии к предыдущему году
2013	1 175,00	+11,9%
2014	1 351,25	+15,0%
2015	1 408,01	+4,20%
2016	1 541,78	+9,50%
2017	1 621,95	+5,20%
2018	1 678,72	+3,50%
2019	1 775,45	+5,76%
2020	1 818,29	+2,41%
2021	1 880,11	+3,40%
2022	1 947,79	+3,60%

Дисконтирование будущих денежных потоков произведем по ставке рефинансирования ЦБ РФ (7,5%), то есть параметр при расчете срока окупаемости инвестиций примем равным 0,075.

<sup>3</sup> Процентные ставки по кредитам и депозитам и структура кредитов и депозитов по срочности [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.cbr.ru/> (дата обращения: 17.04.2022)

<sup>4</sup> Тарифы и ставки [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.gov.spb.ru/helper/tarif/> (дата обращения: 17.04.2022)

Наконец, применяя формулу (9) получаем срок окупаемости инвестиций на утепление фасадов равный 25,5 лет.

Аналогичные расчеты были проведены для теплоизоляционных материалов других торговых марок [14], представленных на рынке г. Санкт-Петербурга. Результаты сведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Срок окупаемости теплоизоляционных материалов  
**Table 4.** Payback period of thermal insulation materials

№ п/п	Теплоизоляционный материал	Коэффициент теплопроводности ( $\lambda_{yt}$ ), Вт/(м·°С)	Требуемая толщина утеплителя ( $\delta_{yt}^{tr}$ ), мм	Цена утеплителя за 1м <sup>2</sup> , руб.	Срок окупаемости, лет
1	KNAUF ECOROLL Плита, 1230x610x100 мм	0,04	82	131	24,3
2	ISOROC Ультралайт Л, 1000x600x100 мм	0,038	78	165	24,2
3	ISOVER Классик Плюс, 1170x610x100 мм	0,037	76	128	23,7
4	ROCKWOOL Лайт Баттс, 1000x600x100 мм	0,036	74	218	24,3
5	PAROC eXtra Light, 1200x600x100 мм	0,038	78	162	24,2
6	URSA Универсальный, 1250x600x100 мм	0,036	74	123	23,5
7	ЭКОБЕР Лайт 45, 1000x600x100 мм	0,035	72	196	23,9

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Любые работы по реновации зданий должны не только приводить здания в соответствие к нормам, но и быть экономически выгодными. В статье приведен пример теплотехнического расчета для внешних ограждающих стеновых конструкций домов 137-ой серии в г. Санкт-Петербурге, а также определен срок окупаемости инвестиций в дополнительное утепление фасадов.

С учетом тенденции изменения тарифов на тепловую энергию в Санкт-Петербурге за последние 10 лет при среднегодовом росте тарифов в 6,45%, средний срок окупаемости инвестиций составляет 23-25 лет. Эти значения получены на основании расчетов по выборке теплоизоляционных материалов различных торговых марок, представленных на строительном рынке Санкт-Петербурга. Аналогичные расчеты можно провести и для других типовых серий жилых домов. При этом следует учесть целесообразность инвестиций в утепление фасадов домов, подлежащих реновации, так как, возможно, некоторые серии будут выведены из эксплуатации раньше срока окупаемости. Отдельное внимание стоит уделить влажностному режиму ограждающих конструкций [15-17], а также изучению особенностей повышения энергоэффективности ограждающих конструкций в различных климатических зонах [18-21]. Кроме того, в виду появления новых строительных материалов, одним из направлений исследования могут быть различные добавки в уже известные строительные материалы для повышения их энергоэффективности [22, 23].

Дополнительно необходимо отметить, что снижение сроков окупаемости мероприятий по повышению энергетической эффективности ограждающих конструкций возможно путем сокращения затрат на материалы (например, за счет использования более дешевых, но не менее качественных, или оптовых скидок). Несмотря на длительные сроки окупаемости энергосберегающих мероприятий при капитальном ремонте жилых домов типовых серий, их реализация может обеспечить в краткосрочной перспективе значительную экономию энергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков А.С., Рымкевич П.П., Немова Д.В., Ватин Н.И. Методика расчета окупаемости инвестиций по реновации фасадов существующих зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 2(17). С. 82-106. EDN RWGNPV.
2. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Оценка прогнозируемых сроков окупаемости работ по утеплению фасадов при капитальном ремонте жилых зданий первых массовых серий // Кровельные и изоляционные материалы. 2015. № 6. С. 33-39. EDN VSUTON.



3. Мусорина Т.А., Багаутдинов Р.И., Ракова К.М. Энергоэффективность промышленного района в составе проекта реновации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 12(51). С. 61-72. DOI 10.18720/CUBS.51.5. EDN XUWFGX.
4. Горшков А.С. Об окупаемости инвестиций на утепление фасадов существующих зданий // Энергосбережение. 2014. № 4. С. 12-27. EDN QKWQFH.
5. Gamayunova O., Musorina T., Ishkov A.D. Humidity Distributions in Multilayered Walls of High-rise Buildings // E3S Web of Conferences, Samara, 04-08 сентября 2017 года. Vol. 33. Samara: EDP Sciences, 2018. P. 02045. DOI 10.1051/e3sconf/20183302045. EDN YUMGLC.
6. Vostrikova E.V., Gayevskaya Z.A. Modernization of residential buildings of the 1960s // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 941-944. P. 858-863. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.858. EDN UGOLMV.
7. Чиркова Ю.Э., Бабаев М.В., Птухина И.С. Преимущества применения энергоэффективных технологий в зданиях // Неделя науки ИСИ: Материалы всероссийской конференции в 3-х частях, Санкт-Петербург, 26–30 апреля 2021 года / Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Том Часть 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021. С. 220-223. EDN VHTRLJ.
8. Абрамян С.Г., Михайлова Н.А., Котляревский А.А., Семочкин В.О. Теплоизоляционные материалы, обеспечивающие энергоэффективность фасадных систем // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4(51). С. 221. EDN OFAKID.
9. Учнина Т.В., Бабичева Н.В. Обзор методов повышения энергоэффективности жилых зданий // Молодой ученый. 2017. № 10(144). С. 101-105. EDN YFWJWH.
10. Адигамова З.С., Килязова Е.А. Энергоэффективные строительные технологии как инвестиции в будущее // Шаг в науку. 2018. № 2. С. 107-110. EDN TFJROB.
11. Вафаева Х.М., Гаевская З.А. Параметрическая энергоэффективная оптимизация проекта реконструкции объекта культурного наследия // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. С. 156-164. EDN SZPWIP.
12. Лукаш К.А., Олехнович Я.А., Радаев А.Е. Обоснование характеристик теплоизоляционного материала в составе ограждающих конструкций жилых зданий // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 03–09 апреля 2023 года. Том Часть 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2023. С. 161-164. EDN VMQAAW.
13. Гамаюнова О.С. Модель и методика принятия рационального решения по обеспечению энергоэффективности домов старого фонда военных городков // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. 2019. № 669. С. 18-28. EDN OWUUGW.
14. Гамаюнова О.С. Методика обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий: специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2021. 166 с. EDN CJHWXK.
15. Гагарин В.Г., Зубарев К.П. Математическое моделирование нестационарного влажностного режима ограждений с применением дискретно-континуального подхода // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 2. С. 244-256. DOI 10.22227/1997-0935.2020.2.244-256. EDN LQXAWF.
16. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Assessment of enclosing structure unsteady-state moisture behavior using moisture potential theory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: VIII International Scientific Conference Transport of Siberia, Novosibirsk, 22-27 мая 2020 года. Vol. 918. Novosibirsk: IOP Publishing Ltd, 2020. P. 012113. DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012113. EDN LYSSZF.
17. Zubarev K., Gagarin V. Heat and Moisture Transfer in Building Enclosing Structures // Conference “INTERAGROMASH 2021”. Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry, Volume 2: Conference proceedings, Ростов-на-Дону, 24-26 февраля 2021 года. Ростов-на-Дону: Springer, 2022. P. 257-266. DOI 10.1007/978-3-030-80946-1\_26. EDN HSLOOO.
18. Гамаюнова О. С. Выбор оптимального варианта утепления жилых домов в различных климатических зонах // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 16(68). С. 89-97. EDN ANXMJJ.
19. Старцев Я.В., Филиппова Т.М. Теплоизоляция в энергосберегающих технологиях в строительстве // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2018. № 12. С. 227-230. DOI 10.36629/2686-777X-2018-1-12-227-230. EDN MILSWD.
20. Слободчиков Е.Г., Рожин В.Н., Местников А.Е. Комплексная оценка энергоэффективности стеновых изделий и ограждений в условиях экстремально холодного климата // Фундаментальные исследования. 2017. № 9-2. С. 357-361. EDN ZITTWL.
21. Окунцов И.И., Сычкина Е.Н. Проектирование Энергоэффективных жилых домов в климатических условиях Пермского края // Химия. Экология. Урбанистика. 2017. Т. 2017. С. 93-97. EDN ZHKVGF.
22. Мусорина Т.А., Наумова Е.А., Шонина Е.В., Петриченко М.Р., Куколев М.И. Теплотехнические свойства энергоэффективного материала на основе растительной добавки (сухой борщевик) // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, № 12. С. 1555-1571. DOI 10.22227/1997-0935.2019.12.1555-1571. EDN JWTJIZ.
23. Мусорина Т.А., Петриченко М.Р., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С., Куколев М.И. Улучшение свойств бетонного композита, армированного сухой растительной добавкой // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22(74). С. 57-65. DOI 10.37279/2413-1873-2021-22-57-65. EDN KELGCV.

## ОБ АВТОРАХ

**Матвей Константинович Андреев** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: andreev.mk@edu.spbstu.ru

**Ольга Сергеевна Гамаюнова** – 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: gamayunova\_os@spbstu.ru

## ABOUT THE AUTHORS

**Matvey K. Andreev** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: andreev.mk@edu.spbstu.ru

**Olga S. Gamayunova** – Ph.D., 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: gamayunova\_os@spbstu.ru

УДК 532.53

## ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЁТНОГО КОМПЛЕКСА FLOW-3D НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДОСЛИВОВ

**А.А. Гиргидов**

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

**Аннотация.** В статье рассматривается часть верификации расчётной программы FLOW-3D. Детально рассматривается верификация на моделях водосливов (с острым гребнем, длинным гребнем и Кригера-Офицерова). Величины расходов, полученные в результате численного моделирования водосливов сопоставляются с нормативными значениями. Дополнительно сравниваются профиль струи и величины давлений. На основании сопоставления результатов делается основной вывод о возможности использования FLOW-3D не только при моделировании водопропускных сооружений, но и при кросс-верификации альтернативного программного обеспечения.

**Ключевые слова:** численное моделирование, верификация, расчётное программное обеспечение, FLOW-3D

**Ссылка для цитирования:** Гиргидов А.А. Верификация расчётного комплекса FLOW-3D на основе моделирования водосливов // Инженерные исследования. 2023. №2 (12). С. 27-32. EDN: TKEJSB

## VERIFICATION OF THE FLOW-3D SOFTWARE BASED ON NUMERICAL SIMULATION OF WEIRS

**A.A. Girgidov**

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

**Abstract.** The article discusses part of the FLOW-3D software verification. Verification using weir models (with a sharp ridge, a long ridge and WES (Krieger-Officerov) profile) is considered in detail. The flow rates obtained as a result of numerical simulation for weirs are compared with standard values. Additionally, the flow profile and pressure values are compared. Based on a comparison of the results, the main conclusion is made about the possibility of using FLOW-3D not only in modeling spillways, but also in cross-verification of alternative software.

**Keywords:** Numerical simulation, verification, software, FLOW-3D

**For citation:** Girgidov A.A. Verification of the FLOW-3D software based on numerical simulation of weirs // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.2 (12). Pp. 27-32. EDN: TKEJSB

## ВВЕДЕНИЕ

Использование расчётных программ при моделировании гидравлических процессов, в настоящее время приобретает всё более широкий характер по сравнению с физическими лабораторными исследованиями [1, 2].

В то же время, для обоснованного и эффективного использования расчетного программного обеспечения (ПО) необходима верификация, которая позволяет уточнить особенности численной модели и численных параметров. Процесс верификации заключается в сравнении результатов численного моделирования с теоретическими, нормативными или экспериментальными данными [3]. В работе представлены верификация расчётного ПО FLOW-3D [4] для моделирования водосливов:

- водослив с острым гребнем [5, 6] (водослив с тонкой стенкой [7, 8]);
- водослив с длинным гребнем [4, 5] (водослив с широким порогом [7, 8]);
- водослив с профилем WES [5] (безвакуумный водослив Кригера-Офицера [7, 8]).

Использование FLOW-3D обусловлено методикой описания свободной поверхности TrueVOF [9], которая эффективно и с достаточной точностью позволяет моделировать конфигурацию потока при обтекании стен с отрывом струи.

Для всех моделей использовалась абсолютная шероховатость, принятая для бетонной поверхности согласно [6, 7, 10].

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВА С ОСТРЫМ ГРЕБНЕМ

Первой верификационной задачей в серии численных экспериментов была модель водослива с острым гребнем. Данная задача имеет ряд особенностей, наблюдение которых в численной модели обосновывает качество моделирования: расход через водослив при заданном напоре на гребне водослива, геометрия струи. Для проведения моделирования были приняты следующие параметры водослива и потока на подводящем и отводящем участках:

- ширина подводящего и отводящего участков равна  $b = 1.0$  м;
- высота водосливной стенки  $c_u = c_d = 3.0$  м, где  $c_u$  - высота стенки со стороны подводящего участка,  $c_d$  - высота стенки со стороны отводящего участка;
- толщина водосливной стенки составляет  $d = 0.2$  м;
- напор на гребне водослива  $H = 1.0$  м.

Водослив с приведёнными параметрами соответствует водосливу с острым гребнем [5, 7, 8].

Согласно принятой методике расчётов [7, 8], расход через водослив с острым гребнем определяется по формуле (1):

$$Q = mb\sqrt{2gH^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где  $m = 0.41$  - коэффициент расхода водослива,  $g = 9.81$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения.

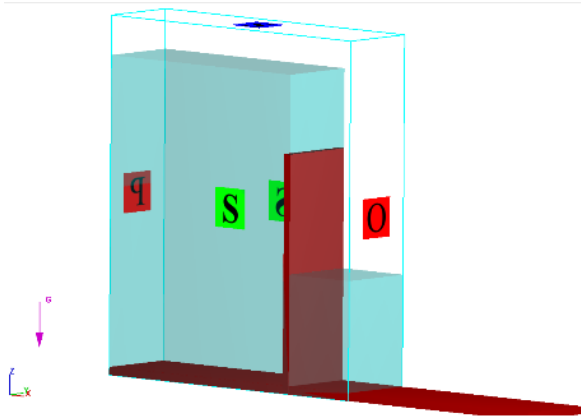
Подставляя в формулу (1) параметры, приведённые выше, получается:

$$(Q)_{calc} = 0.41 \cdot 1.0 \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 1.0^{\frac{3}{2}}} = 1.81 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для проведения численного эксперимента, в программный комплекс FLOW-3D была импортирована трёхмерная компьютерная геометрическая модель водослива, на основе которой была построена 3D численная модель (рис.1).

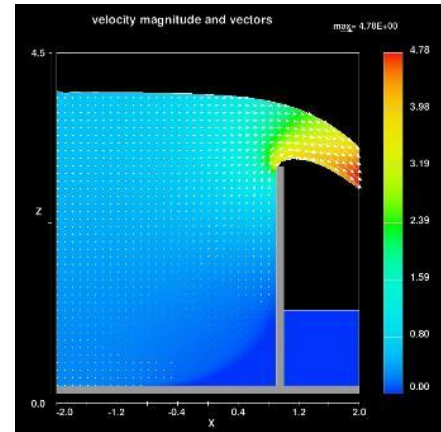
Моделирование проводилось до квази-стационарных условий (рис. 2). При моделировании использовались следующие граничные условия:

- левая граница – постоянный уровень воды. Давление распределено по гидростатическому закону (P);
- правая граница – условие пропускa расхода (O)
- нижняя граница – стена (W);
- верхняя граница – симметрия (учитывает атмосферное давление) (S);
- фронтальная и задняя граница – условия симметрии (S).



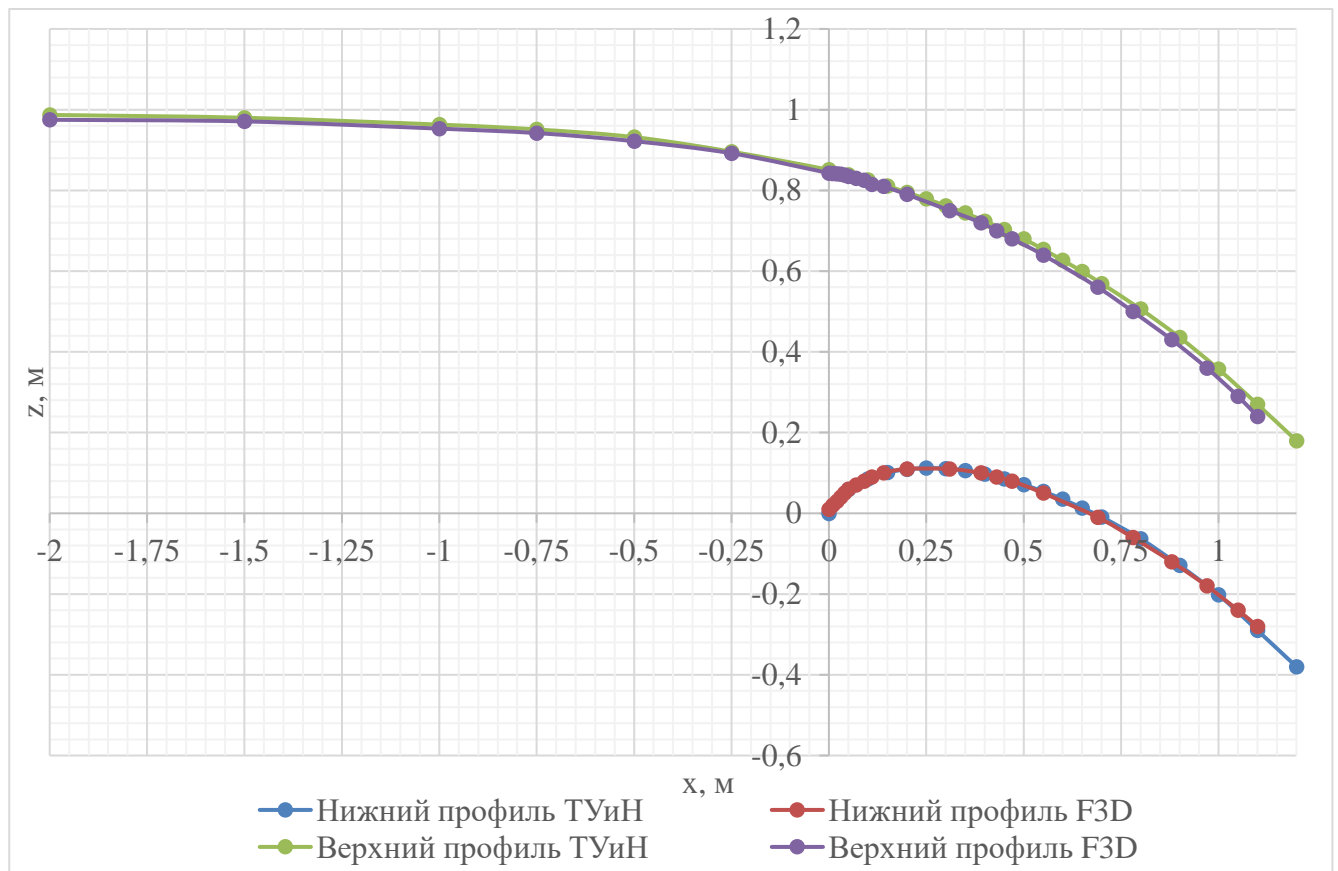
**Рис. 1.** Трёхмерная численная модель водослива с острым гребнем с граничными условиями в программном комплексе FLOW-3D

**Fig. 1.** 3D numerical model of a sharp crest weir with a boundary conditions in the FLOW-3D software



**Рис. 2.** Картина течения через водослив с острым гребнем в пост-процессоре FLOW-3D (разрез по продольной оси численной модели). Цветом показано распределение скорости в м/с  
**Fig. 2.** Pattern of the flow through a sharp crest weir in the FLOW-3D post-processor (cross section along the longitudinal axis of the numerical model). The color shows the velocity distribution in m/s

Геометрия струи при переливе через водослив, полученная при численном моделировании соответствует геометрии, приведённой в справочной документации [7, 8]. На рис. 3 приведены кривые верхней и нижней поверхностей струи при переливе через водослив.



**Рис. 3.** Сопоставление координат верхнего и нижнего профилей струи через водослив  
**Fig. 3.** Comparison of coordinates for the upstream and downstream profiles for the flow through the weir

Ошибка в величине расхода, полученного в результате численного моделирования  $(Q)_{num}$ , и рассчитанного по формуле (1)  $(Q)_{calc}$ , не превысила 2%:

$$\Delta = \frac{(Q)_{num} - (Q)_{calc}}{(Q)_{calc}} \cdot 100\% = \frac{1.84 - 1.81}{1.81} \cdot 100\% = 1.7\% .$$

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВА С ДЛИННЫМ ГРЕБНЕМ

Аналогичное моделирование было проведено для водослива с длинным гребнем. Для проведения верификации были приняты следующие параметры водослива, подводящего и отводящего участков:

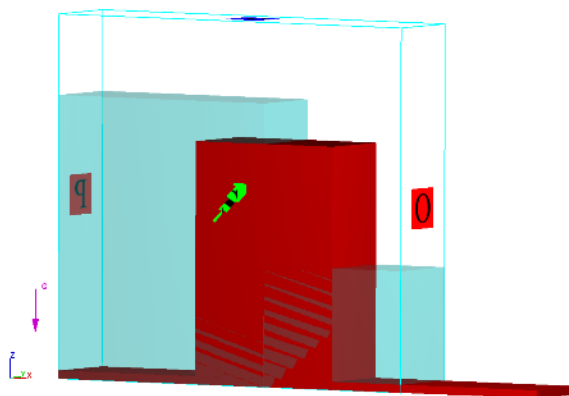
- ширина подводящего и отводящего каналов составляет  $b = 1.0$  м;
- высота водосливной стенки  $c_u = c_d = 3.0$  м, где  $c_u$  - высота стенки со стороны верхнего бьефа,  $c_d$  - высота стенки со стороны нижнего бьефа;
- толщина водосливной стенки составляет  $d = 3.0$  м;
- напор на гребне водослива  $H = 0.5$  м.

Согласно [6], расход через водослив с длинным гребнем определяется по формуле (1), при этом коэффициент расхода водослива, с учётом сеточной шероховатости [4, 9], равен  $m = 0.33$  [7, 8]. Подставляя исходные данные в формулу (1), получаем:

$$Q = 0.33 \cdot 1.0 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 0.5^{\frac{3}{2}} = 0.516 \text{ м}^3/\text{с}.$$

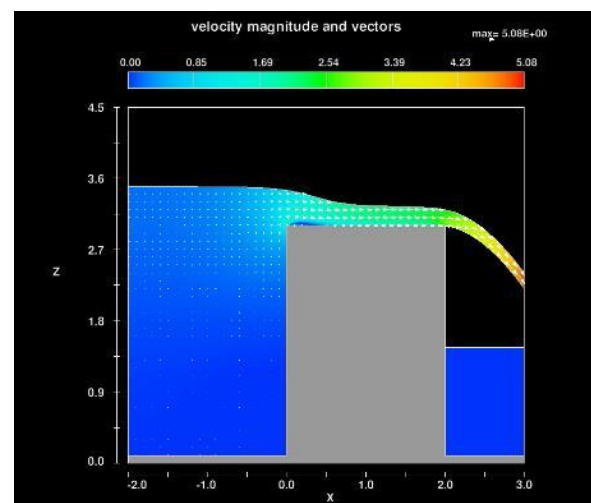
На рис. 4 приведена численная модель в расчётном ПО FLOW-3D.

Моделирование до квазистационарных условий дало величину расхода равную  $Q = 0.524 \text{ м}^3/\text{с}$ . Картина течения через водослив показана на рис. 5. При моделировании использовались граничные условия аналогичные предыдущей модели.



**Рис. 4.** Трёхмерная численная модель водослива с длинным гребнем с граничными условиями в программном комплексе FLOW-3D

**Fig. 4.** 3D numerical model of a long crest weir with boundary conditions in the FLOW-3D software



**Рис. 5.** Картина течения через водослив с длинным гребнем в пост-процессоре FLOW-3D (разрез по продольной оси численной модели). Цветом показано распределение скорости в м/с

**Fig. 5.** Pattern of the flow through a long crest weir in the FLOW-3D post-processor (cross section along the longitudinal axis of the numerical model). The color shows the velocity distribution in m/s

Ошибка в величине расхода, полученного в результате численного моделирования  $(Q)_{num}$ , и рассчитанного по формуле (1)  $(Q)_{calc}$ , не превысила 2%:

$$\Delta = \frac{(Q)_{num} - (Q)_{calc}}{(Q)_{calc}} \cdot 100\% = \frac{0.524 - 0.516}{0.516} \cdot 100\% = 1.6\% .$$

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВА С ПРОФИЛЕМ WES

Моделирование для водослива WES проводилось для аналогичных условий. Исходными данными для моделирования были:

- ширина подводящего и отводящего каналов составляет  $b = 1.0$  м;
- высота водосливной стенки  $c_u = c_d = 5.35$  м, где  $c_u$  - высота стенки со стороны верхнего бьефа,  $c_d$  – высота стенки со стороны нижнего бьефа;
- напор на гребне водослива  $H = 1.0$  м.

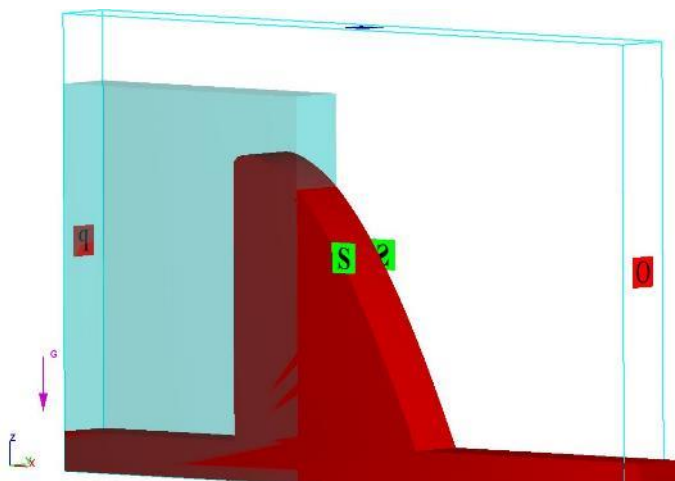
Согласно [6-8], расход через водослив с длинным гребнем определяется по формуле (1), при этом коэффициент расхода водослива равен  $m = 0.49$  [7, 8]. Подставляя исходные данные в формулу (1), получаем:

$$Q = 0.49 \cdot 1.0 \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 1.0^{\frac{3}{2}} = 2.17 \text{ м}^3/\text{с}.$$

На рис. 6 приведена численная модель в расчётном ПО FLOW-3D. При моделировании использовались граничные условия аналогичные предыдущим моделям

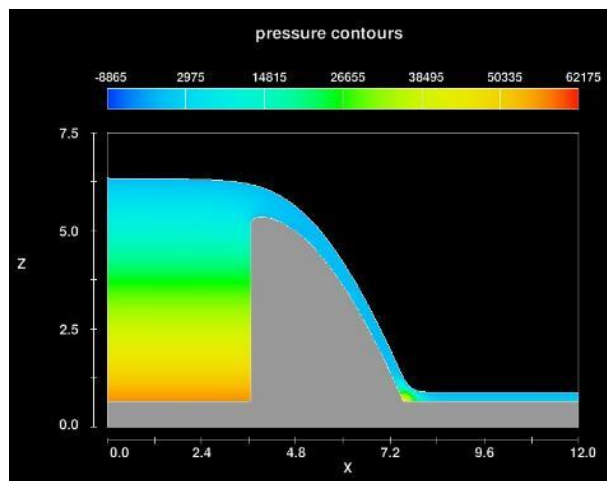
В результате моделирования до квазистационарных условий было получено значение расхода через водослив  $Q = 2.20 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Согласно [5], водослив WES является безвакуумным, что соответствует водосливу Кригера-Офицера [6], следовательно, давление на свободной поверхности потока и на низовой поверхности водослива должно быть близким к атмосферному. Таким образом, важнейшей характеристикой при моделировании такого водослива является распределение давления в потоке воды. Картина распределения давления при течении воды через водослив WES показана на рис. 7.



**Рис. 6.** Трёхмерная численная модель водослива с профилем WES с граничными условиями в среде программного комплекса FLOW-3D

**Fig. 6.** 3D numerical model of a WES profiled weir with boundary conditions in the FLOW-3D software



**Рис. 7.** Картина течения через водослив с профилем WES в пост-процессоре FLOW-3D (разрез по продольной оси численной модели). Цветом показано давление в Па

**Fig. 7.** Pattern of the flow through a WES profiled weir in the FLOW-3D post-processor (cross section along the longitudinal axis of the numerical model). The color shows the pressure distribution in Pa

Ошибка в величине расхода, полученного в результате численного моделирования  $(Q)_{num}$ , и рассчитанного по формуле (1)  $(Q)_{calc}$ , не превысила 2%:

$$\Delta = \frac{(Q)_{num} - (Q)_{calc}}{(Q)_{calc}} \cdot 100\% = \frac{2.20 - 2.17}{2.17} \cdot 100\% = 1.4\% .$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого численного моделирования и сопоставления результатов с расчётами по нормативным формулам было получено:

- пропускная способность водосливов не отличается более, чем на 2%, что соответствует точности определения коэффициента расхода;
- при моделировании водослива с острым гребнем, координаты профиля струи соответствуют нормативным и экспериментальным координатам;
- при моделировании водослива с длинным гребнем на горизонтальном участке водослива наблюдается участок с, практически, горизонтальной свободной поверхностью;
- при моделировании безвакуумного водослива с профилем WES давление на свободной поверхности потока и под струёй равно атмосферному, т.е водослив безвакуумный.

Таким образом, сравнивая результаты численного моделирования водосливов с результатами расчётов по общепринятым нормативным формулам можно сделать вывод о возможности использования программного ПО FLOW-3D при моделировании водосливов любой конфигурации. Также следует отметить, что успешная верификация расчётного ПО FLOW-3D позволяет использовать его для кросс-верификации альтернативных расчётных программных средств при моделировании аналогичных задач.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватин Н.И., Гиргидов А.А., Стрелец К.И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 5(23). С. 5-9. EDN NYDSNN.
2. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1984. 392 с.
3. Гиргидов А.А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D как средство его реализации // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3(21). С. 21-27. EDN NTLXPX.
4. FLOW-3D® User's Manual, Version 12, Flow Science, Inc., 2019.
5. Гиргидов А.Д., Румянцев И. С., Штеренлихт Д. В. Предложения по терминологии и классификации прямых водосливов // Гидротехническое строительство. 2009. № 3. С. 51-53. EDN JWWEWF.
6. John, James E.A. Introduction to fluid mechanics / James E.A. John, William L. Haberman. 3rd ed. 609 p.
7. Справочник по гидравлическим расчетам. Под редакцией П.Г. Киселева. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1972. 312с.
8. Лаппо Д.Д. и др. Гидравлические расчёты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
9. Hirt C.W. Nicols B.D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol. 39, 1981, pp. 201-225.
10. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов (пер. с англ.). М.: Стройиздат. 1969. 464 с.

### ОБ АВТОРАХ

**Армен Артурович Гиргидов** – доцент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: ardgir@mail.ru

### ABOUT THE AUTHORS

**Armen A. Girgidov** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: ardgir@mail.ru



УДК 692.4

## АРХИТЕКТУРА «ЗЕЛЕННЫХ» КРЫШ И ИХ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

**Е.Д. Чернова, О.С. Гамаюнова**

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

**Аннотация.** Все большую популярность приобретают эксплуатируемые инверсионные кровли, которые позволяют рационально использовать пространство в условиях современного города: здесь можно расположить автостоянки, пешеходные зоны, зеленые площадки. В статье рассматривается вопрос использования озеленения крыш в городах, анализируется их влияние на энергоэффективность зданий и сооружений, разбираются положительные и отрицательные стороны, приводятся различные виды «зелёных» крыш, исследуется возможность решения экологических проблем с помощью «зеленых» кровель. С помощью теплотехнического расчета показано, что рассмотренные в статье конструкции «традиционной» и «зеленой» кровель не соответствуют требованиям по тепловой защите зданий. Для повышения энергоэффективности ограждающих кровельных конструкций предложено использовать теплоизоляционный материал «Пеноплэкс Кровля». Дополнительные расчеты показали, что, для достижения значений, необходимых для обеспечения нормативных требований по тепловой защите зданий и сооружений, потребуется 0,03 м утеплителя для устройства «зеленой» кровли и 0,08 м для «традиционной» кровли.

**Ключевые слова:** крыши, кровли, «зелёные» кровли, экология, энергоэффективность, энергозатраты, теплотехнический расчет, утеплитель, теплоизоляционный материал.

**Ссылка для цитирования:** Чернова Е.Д., Гамаюнова О.С. Архитектура «зеленых» крыш и их энергоэффективность // Инженерные исследования. 2023. №2 (12). С. 33-41. EDN: VRZYPZ

## ARCHITECTURE OF GREEN ROOFS AND THEIR ENERGY EFFICIENCY

**E.D. Chernova, O.S. Gamayunova**

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

**Abstract.** Operable inversion roofs are becoming increasingly popular, which allow rational use of space in a modern city: parking lots, pedestrian zones, and green areas can be located here. The article examines the issue of using green roofs in cities, analyzes their impact on the energy efficiency of buildings and structures, examines the positive and negative aspects, presents various types of “green” roofs, and explores the possibility of solving environmental problems with the help of “green” roofs. Using thermal engineering calculations, it is shown that the designs of “traditional” and “green” roofs discussed in the article do not meet the requirements for thermal protection of buildings. To increase the energy efficiency of enclosing roof structures, it is proposed to use the thermal insulation material “Penoplex Roofing”. Additional calculations have shown that, in order to achieve the values necessary to meet regulatory requirements for thermal protection of buildings and structures, 0.03 m of insulation will be required for a “green” roof and 0.08 m for a “traditional” roof.

**Keywords:** roofs, green roofs, ecology, energy efficiency, energy costs, thermal engineering calculations, insulation, thermal insulation material.

**For citation:** Chernova E.D., Gamayunova O.S. Architecture of green roofs and their energy efficiency // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.2 (12). Pp. 33-41. EDN: VRZYPZ

## ВВЕДЕНИЕ

Озеленение кровли – прекрасное решение для организации пространства как для отдыха, так и для работы, улучшения городской экологии и снижения энергозатрат конкретного здания. «Зеленые» крыши (рис.1.) могут быть прекрасной альтернативой перегруженным общественным пространствам (паркам, пляжам и бульварам). Растения на крышах могут не только улучшить качество воздуха, но и снизить вероятность протечек и количество ливневых стоков, сохраняя лишнюю влагу на самой крыше [1-5].

Современная методика озеленения крыш появились в Германии в 1960-х годах, а позже распространялась по разным странам. В некоторых европейских странах, включая Германию, Швейцарию, Нидерланды, Норвегию, Италию, Австрию, Венгрию, Швецию, Великобританию и Грецию, даже существуют ассоциации, которые активно продвигают концепцию «зеленых» крыш.



**Рис. 1.** Газон на крыше дома в Сиднее, Австралия. Вид на мост Харбор-Бридж<sup>1</sup>  
**Fig. 1.** Lawn on the roof of a house in Sydney, Australia. View of the Harbor Bridge

Целый ряд статей посвящен изучению российского опыта устройства зеленых кровель [6-8]. Однако результаты исследования, приведенные в статье Кадысейвой А.А., Максимовой С.В., Сидоренко О.В. и Миронова В.В., показали, что по количеству теплых дней и объему дождевых вод наиболее благоприятные федеральные округа для устройства «зеленых» кровель – это Центральный и Дальневосточный [6]. Астрахань и Оренбург - регионы, в которых самое малое количество осадков, здесь строительство «зеленых» кровель будет неэффективно из-за необходимости дополнительного полива. В остальных регионах необходимо с особой осторожностью подходить к проектированию и строительству зеленых кровель, так как есть риск гибели растений из-за недостатка влаги или заморозков.

Отдельный интерес представляют научные публикации, где авторы используют различные математические методы и модели применительно к изучению «зеленых» кровель. Так, например, Егоров А.Н. и Тугушев А.А. применяют математические модели для оценки вариантов устройства инверсионных кровель. В исследовании разработаны математические модели трех систематизированных групп возведения инверсионных кровель (на опорах, без опор и кровли-паркинга) по трем укрупненным критериям: технологичность, эффективность использования ресурсов и экологичность [9].

Сысоева Е.В., Гельманова М.О., Слесарев М.Ю. приводят методику обоснования эффективности улавливания пыли «зелеными» крышами, которая имеет практическую значимость и может быть использована при различных градостроительных сценариях, когда необходимо численно оценить эффективность применения «зеленой» крыши на том или ином здании по критерию обеспечения экологической безопасности. [10],

В публикациях [11-16] авторы исследуют влияние «зеленой» кровли на энергоэффективность зданий и сооружений. Корниенко С.В. представил новый взгляд на энергосбережение в производственных зданиях [12, 13]. Автор обосновал необходимость внедрения современных конкурентоспособных импортозамещающих технологий, а также систематизировал градостроительные, архитектурно-конструктивные и инженерно-технические решения производственных зданий, нацеленные на поддержание экологического баланса в окружающей среде.

<sup>1</sup> Самые красивые дома [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.beautiful-houses.net/2016/03/blog-post\\_13.html](https://ru.beautiful-houses.net/2016/03/blog-post_13.html) (дата обращения: 05.06.2023)

В статье [14] авторы привели расчеты энергоэффективности общественных зданий с применением технологии «зеленая» кровля. С помощью теплотехнического расчета на примере высотного бизнес-центра был сделан вывод о том, что «зеленая» кровля способна сократить затраты на отопление в 1,5 раза по сравнению со «стандартной» конструкцией кровли. Дополнительные расчеты показали, что экономическая выгода напрямую зависит от отношения площади покрытия к площади ограждающих наружных стен.

### ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ УСТРОЙСТВА «ЗЕЛЕННЫХ» КРОВЕЛЬ

Недостаток площадей для озеленения мегаполисов требует пересмотра традиционных взглядов на кровлю как на гидроизоляционный слой, защищающий здание от атмосферных осадков. Сильное загрязнение воздуха и его прогревание в летний период, а также неустойчивая экономика – все это стало предпосылками для более широкого использования «зеленых» кровель в нашей стране.

#### Сильное прогревание воздуха летом.

В центре Москвы и в некоторых других районах города ощущается нехватка зелёных зон. При норме на одного человека в 16 кв.м, в районе Арбата этот показатель составляет 1,86 кв.м. Жара ощущается сильнее в таких районах, а плотная застройка не позволяет создавать новые зеленые зоны.

В Санкт-Петербурге еще несколько лет назад Комитету по градостроительству и архитектуре была поставлена задача подготовить обновленный расчет обеспеченности скверами районов перспективной застройки. Такие расчеты обеспеченности районов города зелеными зонами уже делались. В открытых источниках можно найти карту (рис.2), составленную на основе данных закона о зеленых насаждениях по обеспеченности и закона о зеленых насаждениях общего пользования (ЗНОП).

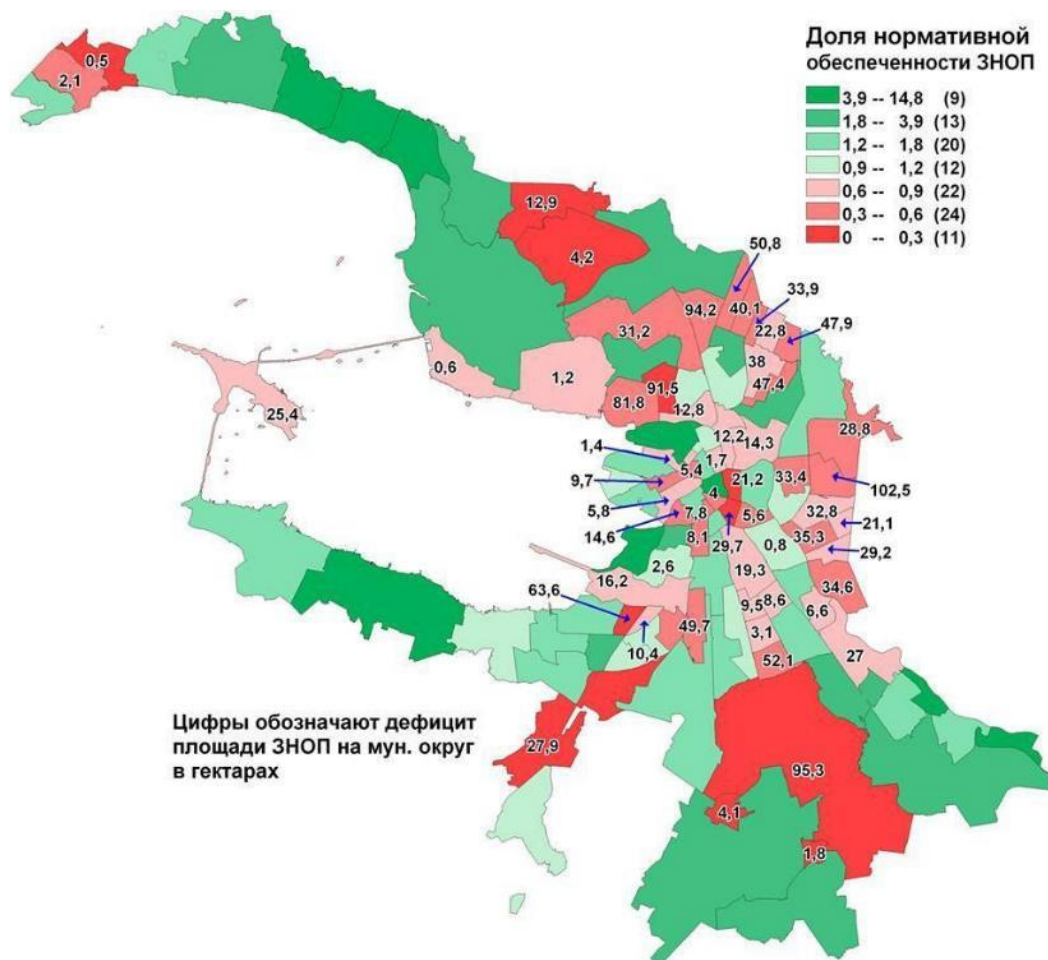


Рис. 2. Обеспеченность зелеными насаждениями общего пользования в г. Санкт-Петербург<sup>2</sup>  
Fig. 2. Provision of public green spaces in St. Petersburg

<sup>2</sup> КГА подготовит расчет обеспеченности скверами районов перспективной застройки [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fontanka.ru/2018/04/13/157/> (дата обращения: 05.06.2023)

### Загрязнение воздуха.

Плотная городская застройка приводит к неправильной конвекции воздуха, ухудшает его качество и приводит к образованию смога. Расходы на энергию для охлаждения и очистку воздуха в помещении также увеличиваются.

Зеленые крыши поглощают часть городского шума и углекислого газа, а также могут снизить температуру по городу на 1-2 градуса. С увеличением площадей «зеленых» кровель эффект усиливается.

В Санкт-Петербурге автомобильные выхлопы выбрасывают в воздух около 500 000 тонн токсичной грязи (рис.3). Здесь это 85% от общего количества выбросов отходов этого города России.



Рис. 3. Загрязнение воздуха в Санкт-Петербурге<sup>3</sup>  
Fig. 3. Air pollution in St. Petersburg

### Неустойчивая экономика.

Устойчивое развитие городской экономики зависит от развития малого и среднего бизнеса. На крыше с озеленением можно открыть ресторан, спортивную или игровую площадку, студию йоги или небольшую библиотеку – всё это новые бизнес-возможности.

Кроме того, «зеленые» крыши снижают расходы на теплоизоляцию ограждающих конструкций, а дождевую воду можно собирать в резервуары для орошения или других технических нужд. Помимо защиты от погодных и климатических воздействий, «зеленые» крыши сохраняются в несколько раз дольше обычных.

### ВИДЫ «ЗЕЛЁНЫХ» КРЫШ

В зависимости от глубины субстрата выделяют три основных типа «зеленых» крыш [17]: экстенсивный, полуинтенсивный и интенсивный (рис.4, рис.5).



Рис. 4. Зеленые крыши и их виды: а – кровля экстенсивного типа; б – кровля интенсивного типа<sup>4</sup>  
Fig. 4. Green roofs and their types: a – extensive type roofing; b – intensive type roofing

<sup>3</sup> Список самых загрязненных городов России [Электронный ресурс]. – URL: <https://ecoblogger.ru/samye-zagryaznennye-goroda-rossii/> (дата обращения: 05.06.2023)

<sup>4</sup> Зеленые крыши и их виды [Электронный ресурс]. – URL: <https://7dach.ru/FrolovaEkaterina/zelenye-kryshi-i-ih-vidy-127875.html> (дата обращения: 05.06.2023)

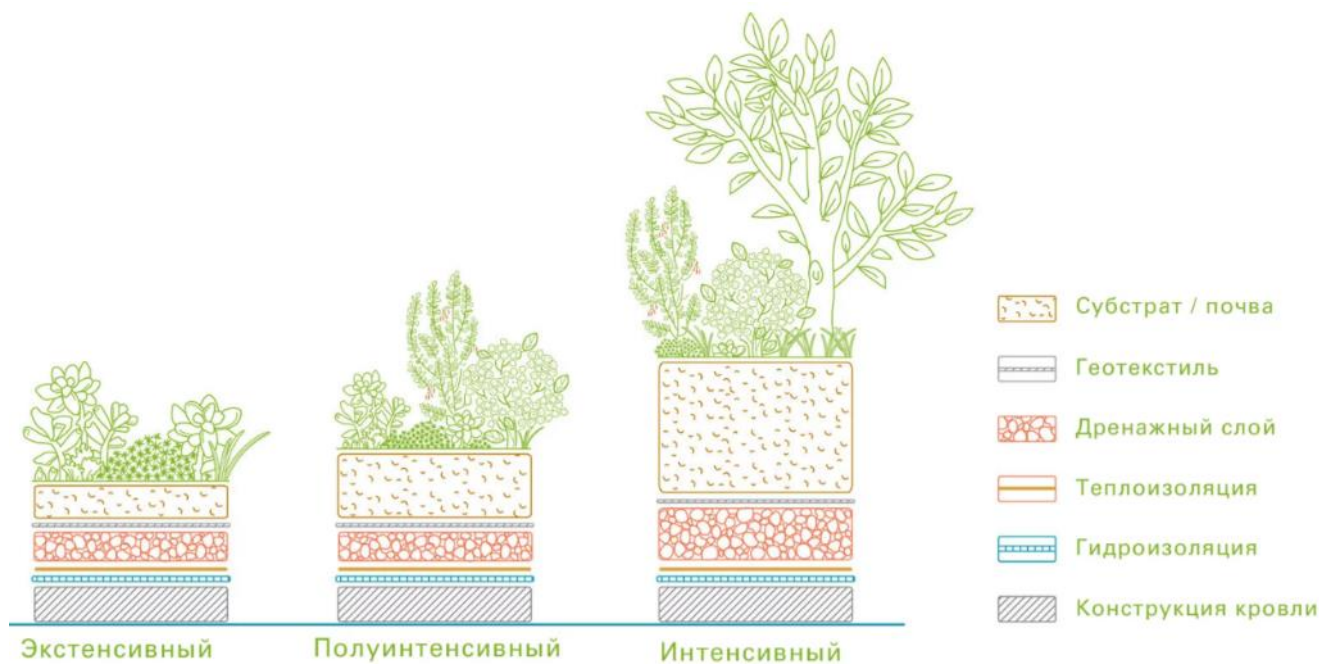


Рис. 5. Виды «зеленых» кровель<sup>5</sup>  
Fig. 5. Types of green roofs

Экстенсивные кровли - самый простой вариант - предполагают создание почти автономной экосистемы с относительно тонким слоем дерна, а также простейших растений, не требующих специального ухода. Средний вес такой крыши обычно 20-35 кг/м<sup>2</sup>, а толщина почвы – 5-15 см.

Интенсивные - гораздо дороже и сложнее. Они предполагают организацию целых садов с возможностью постоянного присутствия людей на крыше. Это, в свою очередь, означает, что основу необходимо значительно укрепить - минимальный слой основания земли для интенсивной «зеленой» крыши составляет 1 м, а вес может достигать 700 кг/м<sup>2</sup>. В результате на таких эксплуатируемых крышах высаживаются небольшие деревья, не говоря уже о кустарниках и других небольших видах растений. Уникальный внешний вид в результате компенсирует любые усилия по дополнительному проектированию, укреплению здания, разработке и установке ирригационных систем.

Конструктивное различие между интенсивной крышей и экстенсивной крышей, как правило, заключается во взаимном расположении утеплителя и гидроизоляции: у интенсивной – гидроизоляция находится под утеплителем; у экстенсивной – наоборот.

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ «ЗЕЛЁНЫХ» КРОВЕЛЬ

Проведем сравнительный теплотехнический расчет «традиционного» кровельного покрытия и «зеленой» кровли в соответствии с требованиями СП 50.1330.2012 «Тепловая защита зданий» и СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» для жилого дома в климатических условиях г. Санкт-Петербурга. Характеристики кровельных материалов представлены в табл. 1 [18].

Градусо-сутки отопительного периода (ГСОП) определяются по формуле (1):

$$ГСОП = (t_{в} - t_{от}) z_{от}, \quad (1)$$

где:  $t_{в}$  - расчетная температура внутреннего воздуха здания, °С;

$t_{от}$ ,  $z_{от}$  - средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, сут/год, отопительного периода, принимаемые по СП 131.13330.2020 для жилых и общественных зданий для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 8°С.

$$ГСОП = (20 - (-1,2)) \cdot 211 = 4473 \text{ °С} \cdot \text{сут/год}$$

<sup>5</sup> Зачем Москве зеленые кровли [Электронный ресурс]. – URL: <https://media.strelka-kb.com/green-roof> (дата обращения: 05.06.2023)

**Таблица 1.** Теплофизические характеристики материала слоев «традиционной» и «зеленой» кровли [18]  
**Table 1.** Thermophysical characteristics of the material of the «traditional» and «green» roof layers

№ слоя	Материал	Толщина слоя ( $\delta$ ), м	Коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	Конструкция
Покрытие «зеленой» кровли				
1	Монолитная ж/б плита перекрытия	0,2	1,92	
2	Пергамин на мастике	0,005	0,17	
3	Дренажная мембрана	0,0085	0,251	
4	Грунт (торф)	0,3	0,1	
Традиционное кровельное покрытие				
1	Железобетонное основание	0,2	1,92	
2	Пергамин на мастике	0,005	0,17	
3	Минераловатная плита	0,07	0,052	
4	Цементно-песчаный раствор	0,02	0,76	
5	Изопласт ЭКП-5.0 2 слоя 8 мм	0,008	0,17	

Требуемое сопротивление теплопередаче ( $R_0^{TP}$ ) определяется по формуле (2):

$$R_0^{TP} = a \cdot \text{ГСОП} + b, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  - коэффициенты, значения которых следует принимать по данным табл.3 СП 50.13330.2012 для соответствующих групп зданий, за исключением графы 6, для группы зданий в строках 1 и 2.

$$R_0^{TP} = 0,0005 \cdot 4473 + 2,2 = 4,4 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт}$$

Нормируемое сопротивление теплопередаче ( $R_0^{\text{норм}}$ ) определяется по формуле (3):

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{TP} m_p, \quad (3)$$

где:  $m_p$  - коэффициент, учитывающий особенности региона строительства (в соответствии с СП 50.13330.2012 значения коэффициента  $m_p$  принимается равным 1).

$$R_0^{\text{норм}} = 4,4 \cdot 1 = 4,4 \text{ (м}^2 \cdot \text{°С)/Вт}$$

Термическое сопротивление конструкции ( $R_0$ ) определяется по формуле (4):

$$R_0 = R_{\text{int}} + \sum_{i=1}^K R_i + R_{\text{ext}}, \quad (4)$$

где:  $R_{\text{int}}$  - термическое сопротивление на внутренней поверхности стеновой конструкции;

$R_{\text{ext}}$  - термическое сопротивление на внешней поверхности стеновой конструкции;

$K$  – количество слоев ограждения;

$R_i$  - термическое сопротивление  $i$ -го слоя ограждающей конструкции,  $i = \overline{1, K}$ .

Термическое сопротивление на внутренней поверхности стеновой конструкции ( $R_{\text{int}}$ ) рассчитывается по формуле (5):

$$R_{\text{int}} = \frac{1}{\alpha_{\text{int}}}, \quad (5)$$

где:  $\alpha_{\text{int}}$  – коэффициент теплопередачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, назначаемый с использованием СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий».

Термическое сопротивление на внешней поверхности ограждающей конструкции ( $R_{ext}$ ) рассчитывается по формуле (6):

$$R_{ext} = \frac{1}{\alpha_{ext}} \quad (6)$$

где:  $\alpha_{ext}$  – коэффициент теплопередачи внешней поверхности ограждающей конструкции, назначаемый с использованием СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий».

С учетом данных, приведенных в табл.1, термическое сопротивление «традиционной» кровельной конструкции будет равно:

$$R_0 = R_{int} + \sum_{i=1}^K R_i + R_{ext} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,2}{1,92} + \frac{0,005}{0,17} + \frac{0,07}{0,052} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,008}{0,17} + \frac{1}{12} = 1,75 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

Термическое сопротивление «зеленой» кровли, соответственно, будет равно:

$$R_0 = R_{int} + \sum_{i=1}^K R_i + R_{ext} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,2}{1,92} + \frac{0,005}{0,17} + \frac{0,0085}{0,251} + \frac{0,3}{0,1} + \frac{1}{12} = 3,37 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$$

Полученные расчеты показывают, что рассмотренные конструкции «традиционной» и «зеленой» кровель не соответствуют требованиям по тепловой защите зданий, т.к. в обоих случаях  $R_0 < R_0^{норм}$ , однако так же, как и для ограждающих стеновых конструкций возможно подобрать теплоизоляционный материал, с помощью которого энергоэффективность кровли будет выше полученных значений.

Так, например, в качестве утеплителя для любых типов кровель отлично подойдет «Пеноплэкс Кровля» (табл.2), состоящий из экструдированного пенополистирола (XPS). Материал не нуждается в дополнительной защите от влаги, устойчив к нагрузке в виде снега.

**Таблица 2.** Теплофизические характеристики утеплителя «Пеноплэкс Кровля»<sup>6</sup>  
**Table 2.** Thermophysical characteristics of Penoplex Roof insulation

№	Показатель	Значение
1	Размеры, мм	1185x585x50
2	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)	0,032
3	Прочность на сжатие (МПа)	0,25
4	Группа горючести	Нормальногорючие (Г3)
5	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	26-34
6	Средняя цена за 1 м <sup>2</sup> , руб.	544

На основании методики, представленной в работе [14], для достижения значений, необходимых для обеспечения нормативных требований по тепловой защите зданий и сооружений, потребуется 0,03 м утеплителя «Пеноплэкс Кровля» для устройства «зеленой» кровли и 0,08 м для «традиционной» кровли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Зеленые» кровли имеют ряд практических преимуществ по сравнению с «традиционными» кровлями: снижение теплотерь в зданиях, улучшение экологии города, увеличение срока службы гидроизоляционных слоев кровли, шумоподавление и т.д. К недостаткам «зеленых» крыш можно отнести стоимость возведения и обслуживания, необходимость контроля состояния крыши во время эксплуатации, а также потребность в кровельщиках специальной квалификации при проведении ремонтных работ на «зеленой» крыше.

Кроме того, отсутствие нормативных требований и методик проектирования «зеленых» крыш затрудняет широкое практическое применение экологически безопасных энергоэффективных, ресурсосберегающих строительных систем и технологий. Поэтому требуется разработка правил проектирования тепловой защиты зеленых крыш и представление их в действующих нормативных документах [12].

<sup>6</sup> Утеплитель Пеноплэкс Кровля [Электронный ресурс]. – URL: [https://tskdiplomat.ru/catalog/izolyatsionnye\\_materialy/heat\\_insulation/extruded\\_penopolisteroll\\_xps/penopleks\\_krovlya\\_1185kh585kh50.html](https://tskdiplomat.ru/catalog/izolyatsionnye_materialy/heat_insulation/extruded_penopolisteroll_xps/penopleks_krovlya_1185kh585kh50.html) (дата обращения: 12.06.2023)

Тем не менее, расчеты, представленные в работе, показали, что «зеленые» кровли имеют более высокий уровень энергетической эффективности, чем крыши с «традиционным» покрытием. Вместе с тем, оба рассмотренных в статье варианта устройства кровель не соответствуют требуемым значениям сопротивления передаче ограждающих конструкций, что возможно исправить добавлением слоя теплоизоляционного материала.

Экономическую оценку предлагаемых решений возможно сделать лишь на основании полных затрат на возведение, утепление и обслуживание обоих вариантов кровель, особенно, с учетом того, что технические характеристики кровельного «пирога» меняются в зависимости от региона, климата, типа здания, дизайна, выбора растений и т.д. [2, 19-21].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сысоева Е.В., Богачев А.В. Влияние «зеленых» крыш на снижение ливневых стоков // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2023. № 2(42). С. 81-89. DOI 10.21869/2311-1518-2023-42-2-81-89. EDN ELQCOQ.
2. Каретникова С. В. «Зеленые» крыши как часть «живой» архитектуры // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 5. С. 14-19. DOI 10.33622/0869-7019.2019.05.14-19. EDN QANACG.
3. Маковецкая-Абрамова О.В., Некрасов Д.И., Лунова С.К. Новые технологии в решении экологических проблем мегаполиса // В сборнике: Инновационные технологии и вопросы обеспечения безопасности реальной экономики. Сборник научных трудов по итогам Всероссийской научно-практической конференции. Под редакцией Г.В. Лепеша, О.Д. Угольниковой, С.Ю. Александровой. 2020. С. 198-204. EDN: EPTICH
4. Zubarev K., Gagarin V. Heat and moisture transfer in building enclosing structures // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Т. 247. С. 257-266. DOI: 10.1007/978-3-030-80946-1\_26 EDN: HSLOOO.
5. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Graphical method for determination of maximum wetting plane position in enclosing structures of buildings // В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Science and Technology Conference «FarEastCon 2019». 2020. С. 022046. DOI: 10.1088/1757-899X/753/2/022046 EDN: MCCAHN
6. Кадысева А.А., Максимова С.В., Сидоренко О.В., Миронов В.В. Зеленые крыши: перспективы развития в России с учетом атмосферных осадков // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15, № 2. EDN SMXKIO.
7. Демьшева А.А., Городишенина А.Ю., Заводнова Е.Б. Энергоэффективность зданий с применением «зеленой кровли» // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 174-176. EDN: DLRZPR.
8. Саматова В.М., Гамаюнова О. С. Энергетическая эффективность зданий с применением технологии «зеленая кровля» // Инженерные исследования. 2021. № 4(4). С. 24-32. EDN WFWTKM.
9. Егоров А.Н., Тугушев А. А. Разработка математических моделей оценки вариантов устройства инверсионных кровель // Инженерный вестник Дона. 2023. № 3(99). С. 361-370. EDN DRACGW.
10. Сысоева Е.В., Гельманова М.О., Слесарев М.Ю. Методика обоснования эффективности улавливания пыли «зелеными» крышами // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17, № 9. С. 1187-1205. DOI 10.22227/1997-0935.2022.9.1187-1205. EDN NTHCCB.
11. Копылова А.И., Богомолова А.К., Немова Д.В. Энергетическая эффективность здания с применением технологии «зеленая кровля» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 10(49). С. 20-34. DOI 10.18720/CUBS.49.2. EDN YGHSJF.
12. Корниенко С.В., Гончаров С.В. Строительство зеленых крыш: проблемы теплозащиты // Социология города. 2020. № 3. С. 62-70. EDN UWUGLT
13. Корниенко С.В. Новый взгляд на энергосбережение в производственных зданиях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 3(88). С. 138-147. EDN AYOZTO.
14. Саматова В.М., Гамаюнова О.С. Энергоэффективность общественных зданий с применением технологии «зеленая кровля» // Инженерные исследования. 2022. № 3(8). С. 20-29. EDN ALXIDF.
15. Шатунова Л.А. Использование зеленых кровель для повышения энергоэффективности здания. Российский опыт // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. 2023. Т. 8, № 1(27). С. 136-139. EDN PUTWWY.
16. Донова Д.И., Терех М.Д. Ключевые показатели и методы оценки качества зеленой инфраструктуры городов России // В сборнике: неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 379-382. EDN: IOSXAW
17. Сысоева Е.В., Москвитина Л.В. Эффективность применения «зеленых» крыш на территории России // Инновации и инвестиции. 2021. № 10. С. 251-259.
18. Шубина В.А. Влияние зеленых кровель на энергоэффективность зданий // Молодой ученый. 2023. №25(472). С. 72-75. EDN JFZVZW.
19. Копылова А.И. Экономическая целесообразность применения зеленых кровель при реконструкции зданий // AlfaBuild. 2017. № 2 (2). С. 18-22. EDN: YEYVFR.



20. Гаевская З.А., Михайловская Л.А. Обзор современных программных средств автоматизации ранней стадии проектирования зданий // В сборнике: Строительство и реконструкция. Сборник научных статей 4-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Курск, 2022. С. 245-253. DOI: 10.47581/2022/PGS-17/Mixailovskaya.01 EDN: IABFLA

21. Гаевская З.А. Принципы ресурсосбережения в строительстве и архитектуре // Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций: сборник научных трудов 3-й Международной научно-практической конференции, Курск, 01 октября 2020 / Юго-Западный государственный университет. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 40-41. EDN ZBSZJK.

#### ОБ АВТОРАХ

**Екатерина Дмитриевна Чернова** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: EDChernova@gmail.com

**Ольга Сергеевна Гамаюнова** – 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: gamayunova\_os@spbstu.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Ekaterina D. Chernova** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: EDChernova@gmail.com

**Olga S. Gamayunova** – Ph.D., 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: gamayunova\_os@spbstu.ru