

№1 (11)
2023

Инженерные --- ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2782-5582

СОДЕРЖАНИЕ

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СВЕТОПРОЗРАЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ М.П. Шарагина	3-10
РАБОТА МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕБРИСТОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПРИОПОРНЫХ УСАДОЧНЫХ ТРЕЩИН В РЕБРАХ А.А. Цветкова, С.А. Агафонов, А.О. Горячева, Т.В. Маслак	11-19
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТИПОВЫХ СЕРИЙ ПАНЕЛЬНЫХ ДОМОВ И.Ю. Воронов	20-30
МОДУЛЬНЫЕ ЗДАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ В.В. Крыжановский	31-37
АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТ ПО УСТРОЙСТВУ КАМЕННОЙ КЛАДКИ Н.Р. Таджиев	38-45

CONTENTS

ENERGY-EFFICIENT TRANSPARENT STRUCTURES FOR HIGH-RISE BUILDINGS M.P. Sharagina	3-10
THE PERFORMANCE OF A MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE RIBBED FLOOR WITH SHRINKAGE CRACKS IN THE RIBS A.A.Tsvetkova, S.A. Agafonov, A.O. Goryacheva, T.V. Maslak	11-19
ENERGY EFFICIENCY OF STANDARD SERIES OF PANEL HOUSES I.Yu. Voronov	20-30
MODULAR BUILDINGS IN MODERN CONSTRUCTION V.V. Kryzhanovsky	31-37
AUTOMATION OF WORK ON THE DEVICE OF MASONRY N.R. Tadzhiyev	38-45

УДК 698.3

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СВЕТОПРОЗРАЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

М.П. Шарагина

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

Аннотация. С каждым годом панорамное остекление зданий все чаще используется в качестве ограждающих конструкций из-за чего приходится решать проблемы, связанные с теплопотерями. при панорамном остеклении важно учитывать не только теплопотери, но и перегрев помещения внутри здания. Особого внимания заслуживает безрамное остекление, которое активно используется, например, при остеклении балконов, в том числе в Северных странах. В статье рассмотрены существующие системы остекления высотных зданий, методы повышения энергоэффективности светопрозрачных конструкций, проведен обзор и сравнение низкоэмиссионных стекол. Также рассмотрено основное требование к ограждающим конструкциям, которое заключается в том, что приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений, и соответственно было вычислено это значение для города Санкт-Петербург. Статья является актуальной для застройщиков высотных зданий при выборе светопрозрачных ограждающих конструкций.

Ключевые слова: остекление, системы остекления, энергоэффективное остекление, низкоэмиссионное стекло, светопрозрачные конструкции, стеклопакет, энергоэффективность.

Ссылка для цитирования: Шарагина М.П. Энергоэффективные светопрозрачные конструкции общественных зданий // Инженерные исследования. 2023. №1 (11). С. 3-10. EDN: NFXCEH.

ENERGY-EFFICIENT TRANSPARENT STRUCTURES FOR HIGH-RISE BUILDINGS

M.P. Sharagina

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

Abstract. Every year, panoramic glazing of buildings is increasingly used as building envelopes, which is why it is necessary to solve problems associated with heat loss. with panoramic glazing, it is important to take into account not only heat loss, but also overheating of the room inside the building. Frameless glazing deserves special attention, which is actively used, for example, for glazing balconies, including in the Nordic countries. The article discusses the existing glazing systems for high-rise buildings, methods for improving the energy efficiency of translucent structures, and reviews and compares low-emission glasses. The main requirement for enclosing structures is also considered, which is that the reduced heat transfer resistance of individual enclosing structures should not be less than the normalized values, and accordingly this value was calculated for the city of St. Petersburg. The article is relevant for developers of high-rise buildings when choosing translucent enclosing structures.

Keywords: glazing, glazing systems, energy-efficient glazing, low-e glass, translucent structures, double-glazed windows, energy efficiency.

For citation: Sharagina M.P. Energy-efficient transparent structures for high-rise buildings // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.1 (11). Pp. 3-10. EDN: NFXCEH.

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом архитекторы все чаще прибегают к панорамному остеклению зданий, то есть используют его в качестве ограждающих конструкций. Таким образом, приходится решать проблемы, связанные с теплопотерями. Ведь именно светопрозрачные и стеновые ограждающие конструкции приводят к максимальным теплопотерям в здании [1-3]. Кроме того, при панорамном остеклении важно учитывать не только теплопотери, но и перегрев помещения внутри здания. Особого внимания заслуживает безрамное остекление, которое активно используется, например, при остеклении балконов, в том числе в Северных странах [4].

Эта проблема является актуальной в России, так как огромная часть страны подвергается холодам в течение всего года, то есть требуется повышенный расход энергии. Затраты на отопление, а также на охлаждение, можно снизить с помощью применения энергоэффективного остекления.

СИСТЕМЫ ОСТЕКЛЕНИЯ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Наиболее распространённые системы остекления высотных зданий: стоечно-ригельная система, структурное остекление, спайдерное остекление, вантовое и модульные фасады.

Стоечно-ригельная система фасада. Содержит горизонтальные и вертикальные металлические профили (ригелей и стоек), которые соединяют стекла. С внешней стороны остекление закрепляется особыми прижимающими планками, закрытыми декоративными накладками (рис. 1). Таким образом, стоечно-ригельная система фасада обладает герметичностью и обладает хорошими теплоизоляционными качествами [5].



Рис. 1. Стоечно-ригельная система фасада¹
Fig. 1. Post-transom facade system

Структурное остекление. По конструкции структурное остекление подобно стоечно - ригельной системе, то есть включает в себя вертикальные и горизонтальные элементы в виде стоек и ригелей. Отличительной чертой этого типа остекления является отсутствие прижимающих планок (рис. 2). Вместо них используется герметик, который заполняет швы и удерживает стеклопакеты [5].



Рис. 2. Структурное остекление²
Fig. 2. Structural glazing

¹ Стоечно-ригельная система. [Электронный ресурс]. – URL: <https://alumsystems.ru/stoechno> (дата обращения: 11.11.2022).

² Витражное остекление. [Электронный ресурс]. – URL: <https://eridan98.ru/alyuminievyy-vitrazh/vitrazhnoe-osteklenie> (дата обращения: 11.11.2022).

По отношению к предыдущему виду системы можно выделить следующие достоинства:

- фасад выглядит легким и современным;
- на поверхности конструкции меньше скапливается грязи из-за отсутствия прижимающих планок и тем самым легче проводится мойка окон.

Спайдерное остекление. Главной отличительной чертой данного типа от других является отсутствие опорных рам между конструкциями. В этом случае крепление стекла происходит точно с помощью рутела, который в свою очередь присоединяется к спайдеру – кронштейну, изготавливаемого из нержавеющей стали высокого качества [6]. Чаще всего в строительстве используется спайдер с четырьмя ответвлениями, то есть связывает четыре стекла (рис. 3, рис.4). Швы между панелями заделываются силиконовым герметиком.



Рис. 3. Спайдер-кронштейн²
Fig. 3. Spider bracket



Рис. 4. Спайдерное остекление³
Fig. 4. Spider glazing

Крепление кронштейна может осуществляться двумя способами: присоединение к металлическим стойкам, прикрепляемых к несущим конструкциям здания, либо напрямую к несущим элементам.

Достоинства спайдерной системы по отношению к рамным конструкциям:

- обеспечивает максимальное естественное освещение помещений;
- легкое обслуживание, при необходимости детали кронштейнов можно быстро заменить или отремонтировать без разбора соседних элементов;
- более быстрая установка;
- большой срок службы благодаря использованию нержавеющей стали высокого качества;
- внешний вид ограждающей конструкции выглядит единым.

Вантовое остекление. Вантовое остекление – это разновидность спайдерного. Отличительным признаком является крепление кронштейна. У спайдерного – кронштейн присоединяется к металлическим стойкам, прикрепляемых к несущим конструкциям здания, либо напрямую к несущим элементам. У вантового – к системе, которая представляет собой прочные тросы (рис. 5).

Вантовая система прикрепляется к несущим элементам здания точно. По этой причине с внешней стороны каркас будет малозаметным. Однако, данный способ присоединения является самым дорогим из рассмотренных выше.

Модульные фасады. Модульные фасады (рис.6) изготавливаются в заводских условиях и доставляются на строительную площадку готовыми блоками, равными высоте этажа. Не смотря на высокую стоимость, этот тип остекления для высотных зданий является оптимальным по всем показателям.

Преимущества использования модульных фасадов для высотных строений [5]:

- высокая скорость монтажа, на 60% выше, чем у стоечно-ригельной системы;
- нет необходимости в применении строительных лесов;
- высокое качество фасадных блоков благодаря усиленному контролю за их производством в заводских условиях;
- возможность ведения монтажных работ в любое время года.

³ Каталог компании «Перегородка LAB». [Электронный ресурс]. – URL: <https://msk.peregorodkalab.ru/catalog/steklyannye-konstrukcii/steklyanniy-fasad> (дата обращения: 11.11.2022).



Рис. 5. Вантовое остекление [6]
Fig. 5. Cable-stayed glazing

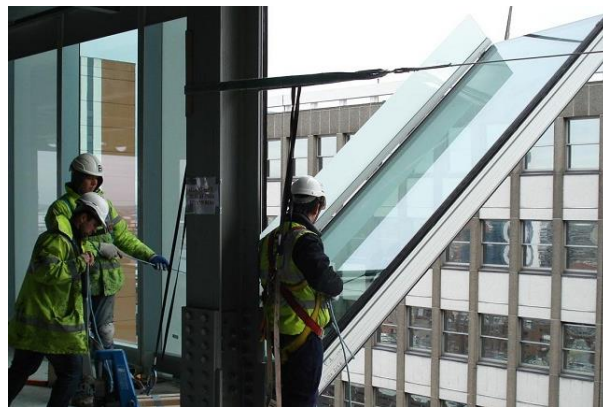


Рис. 6. Модульные фасады [5]
Fig. 6. Modular facades

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С каждым годом все чаще остекление применяют не для заполнения проемов, а в качестве ограждающих конструкций. Таким образом, оно должно обеспечивать не только требуемую продолжительность инсоляции, но и теплоизоляцию.

Методы повышения энергоэффективности светопрозрачных конструкций:

- использование низкоэмиссионных энергосберегающих стекол: твердое энергосберегающее покрытие (К-стекло) и мягкое энергосберегающее покрытие (I-стекло);
- увеличение числа камер;
- заполнение межстекольного пространства инертными газами (рис. 7).

Обычно в качестве инертных газов используют аргон и криптон. Криптон имеет теплопроводность в 1,8 раз меньше, чем у аргона и в 2,6 раз ниже, чем у воздуха [7]. Тем не менее данный газ обладает более высокой стоимостью. Средняя цена криптона – 440 руб/л, а аргона – 280 руб/л⁴. В связи с этим аргон является популярным наполнителем. Повышение энергоэффективности при применении инертного газа в межстекольном пространстве заключается в том, что частицы газа двигаются медленно из-за высокой плотности по сравнению с воздухом и не так быстро переносят тепло.

Также достоинствами стеклопакета, заполненного подобным газом, считаются уменьшение уровня шума с внешней стороны на 40 – 50 дБ и малая вероятность возникновения конденсата в пространстве между стеклами [7].

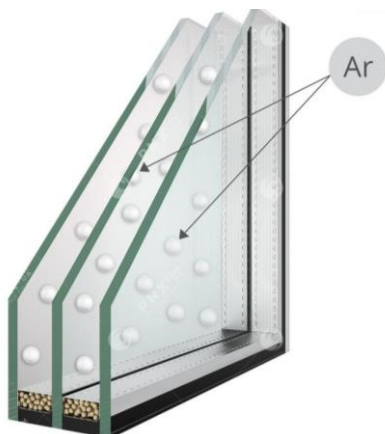
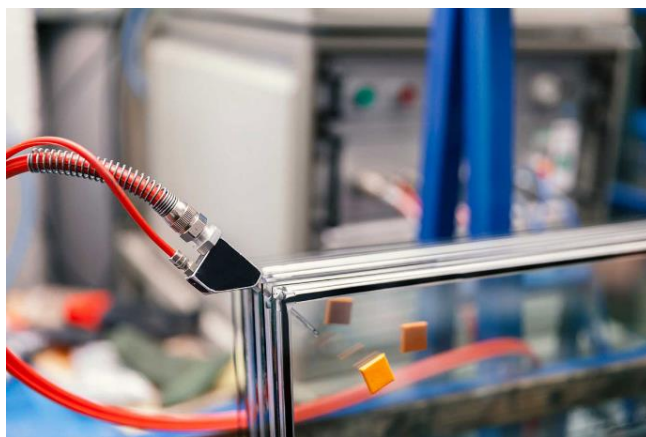


Рис. 7. Заполнение межстекольного пространства инертными газами⁵
Fig. 7. Filling the inter-pane space with inert gases



⁴ Каталог компании «Weifang hengsheng gas» [Электронный ресурс]. – URL: <https://allbuyshop.ru/g/krypton-gas.html> (дата обращения: 15.11.2022).

⁵ Аргон внутри стеклопакета: ещё больше тепла [Электронный ресурс]. – URL: <https://obninskie-okna.ru/blog/argon-vnutri-steklopaketa-esh-bolshe-tepla.html> (дата обращения: 15.11.2022).

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ СТЕКЛА: К-СТЕКЛО И I-СТЕКЛО

Излучение является одной из основных причин теплопотерь через светопрозрачные конструкции. Окна с низким коэффициентом излучения ϵ (коэффициентом эмиссии) выделяют меньше энергии и, следовательно, передают меньше тепла, что значительно повышает их изоляционные свойства [8]. Таким образом, в холодное время года низкоэмиссионные стекла сохраняют в помещении тепло, отражая его от нагревательных приборов внутри помещения. В летнее – они не дают солнечной энергии проникнуть в здание (рис. 8). По светопропускающей способности у них нет никаких значительных отличий от обычных стекол.

Данный эффект достигается за счет нанесения тонкого покрытия – оксидов металлов на поверхность стекла [9]. Этот фильтр ограничивает прохождение инфракрасного излучения (тепла) через светопрозрачные конструкции. Некоторые покрытия также блокируют попадание ультрафиолетового излучения.

Существует два типа низкоэмиссионных стекол:

- К-стекло (твердое энергосберегающее покрытие);
- I-стекло (мягкое энергосберегающее покрытие).

К-стекло. Низкоэмиссионное стекло с твердым покрытием изготавливается с помощью пиролитического процесса. В исходном случае тонкий слой металла наносится на поверхность стекла в процессе его изготовления, когда стекло слегка расплавлено. В результате происходит прочное сцепление.

Коэффициент эмиссии К-стекла равен 0,17. Это значение больше, чем у I-стекла (0,04), и меньше, чем у обычного (0,9) [10]. Данный тип остекления устойчив к механическим воздействиям. Однако у него есть недостаток, который заключается в том, что он пропускает ультрафиолетовое излучение.

I-стекло. Низкоэмиссионное стекло с мягким покрытием получается с помощью напыления слоя металла. Этот процесс производится в вакуумной камере, которая заполняется инертным газом.

За счет равномерного распределения металла I-стекло обладает более высоким теплоотражением, чем предыдущее, тем не менее оно чувствительно к повреждениям.

Если сравнивать низкоэмиссионные стекла и обычные, то можно сделать следующие итоги [9]:

- стеклопакеты с низкоэмиссионным покрытием на 10% дороже стеклопакета с обычным стеклом, но за год применение энергосберегающих стекол окупается из-за уменьшения затрат на отопление/охлаждение;
- вес окна с К или I-стеклом меньше, так как появляется возможность уменьшить количество камер в стеклопакете.

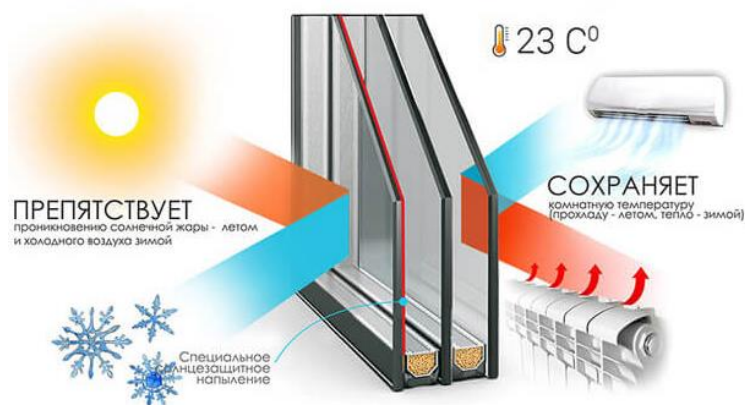


Рис. 8. Принцип работы стеклопакета с низкоэмиссионным покрытием⁶
Fig. 8. The principle of operation of a double-glazed window with a low-e coating

РАСЧЕТ НОРМИРУЕМОГО ЗНАЧЕНИЯ ПРИВЕДЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Расчет представлен для города Санкт-Петербург.

На основании СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» рассмотрено основное требование к ограждающим конструкциям, которое заключается в том, что приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений.

⁶ Услуги компании «Здоровое окно». Замена стеклопакета. [Электронный ресурс]. – URL: <https://zdorovoe-okno.ru/uslugi/zamena-steklopaketa.html> (дата обращения: 18.11.2022).

С помощью пункта 5 данного свода правил вычислим нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции $R_o^{норм}$ и требуемое сопротивление теплопередаче $R_o^{тp}$.

Сначала определим градусо-сутки отопительного периода ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}/\text{год}$) по формуле (1):

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

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

t_b – расчетная температура внутреннего воздуха здания, $^{\circ}\text{C}$, принимаемая при расчете ограждающих конструкций групп зданий, указанных в таблице 3 СП 50.13330.2012 по поз. 2 - согласно классификации помещений и минимальных значений оптимальной температуры по ГОСТ 30494 (в интервале $16-21^{\circ}\text{C}$).

$$\text{ГСОП} = (19 - (-1,2)) \cdot 211 = 4262,2 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}}{\text{год}}.$$

Затем найдем значение требуемого сопротивления теплопередаче $R_o^{тp}$ по формуле (2):

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

где a, b - коэффициенты, значения которых следует принимать по данным таблицы 3 СП 50.13330.2012 ($a = 0,00005, b = 0,2$).

$$R_o^{тp} = 0,00005 \cdot 4262,2 + 0,2 = 0,413 \frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, $R_o^{норм}$, ($\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), определим по формуле (3):

$$R_o^{норм} = R_o^{тp} \cdot m_p, \quad (3)$$

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

$$R_o^{норм} = 0,413 \cdot 1 = 0,413 \frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Из этого следует, что приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемого значения, равного $0,413 \frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$.

В дальнейшем полученное значение необходимо использовать для подбора наиболее подходящего варианта остекления проектируемого здания (по критерию энергетической эффективности).

Из этого следует, что приведенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций общественных зданий должно быть не меньше нормируемого значения, равного $0,413 \frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$.

В табл. 1 представлены характеристики различных видов стеклопакетов и стоимость за 1 м^2 .

Таблица 1. Характеристики стеклопакетов, представленных на строительном рынке [6, 11]
Table 1. Characteristics of double-glazed windows presented on the construction market

№	Наименование	Толщина, мм	Вес 1 м^2 , кг	Сопротивление теплопередаче, $\frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$	Стоимость 1 м^2 , руб.
1	Однокамерный стеклопакет 4М1-16-4М1	24	20	0,37	2500
2	Двухкамерный стеклопакет 4М1-10-4М1-10-4М1	32	30	0,47	3600
3	Однокамерный стеклопакет с I-стеклом с заполнением камеры аргоном 4М1-Ar16-4И	24	25	0,65	3400
4	Двухкамерный стеклопакет с I-стеклом с заполнением камеры аргоном 4М1-Ar14-4М1-Ar14-4И	42	30	0,8	4000

Таким образом, по результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Однокамерный стеклопакет с формулой остекления 4M1-16-4M1 не соответствует основному требованию к ограждающим конструкциям - энергоэффективности, так как его сопротивление теплопередаче меньше нормируемого.

2. Наиболее оптимальным по критерию энергетической эффективности для общественного здания является комбинированный подход, включающий заполнение межстекольного пространства инертным газом и использование низкоэмиссионного стекла (формула остекления 4M1-Ar14-4M1-Ar14-4И).

3. Учитывая рост высотного строительства, а также стоимость и вес светопрозрачных конструкций, рекомендуется использовать однокамерный стеклопакет с I-стеклом с заполнением камеры аргоном (формула остекления 4M1-Ar16-4И). Такой способ является экономически обоснованным, а также позволяет уменьшить количество камер в стеклопакете, что значительно снизит нагрузка на здание в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены существующие системы остекления высотных зданий, такие как стоечно-ригельная система, структурное остекление, спайдерное остекление, вантовое и модульные фасады, в результате анализа которых стало ясно, что для высотных зданий рациональным решением является выбор модульного фасада. Его использование упростит и ускорит монтажные работы.

Также был проведен обзор методов повышения энергоэффективности светопрозрачных конструкций. Повысить энергоэффективность можно с помощью применения низкоэмиссионных стекол, увеличения числа камер или заполнения межстекольного пространства инертными газами. Выявлено, что самым используемым газом является аргон, он же и самый дешевый.

В результате исследования низкоэмиссионных стекол установлено, что они позволяют экономить энергию и сокращать теплопотери в здании за счет тонкого металлизированного покрытия. В холодное время года такое стекло возвращает в помещение тепловые волны от нагревательных приборов, в летнее – не пропускает солнечную энергию. Также при применении К или I-стекла появляется возможность уменьшить количество камер в стеклопакете, поэтому нагрузка на здание значительно снижается.

На основании СП 50.13330.2012 было рассмотрено основное требование к ограждающим конструкциям, которое заключается в том, что приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций должно быть не меньше нормируемых значений, и соответственно было вычислено это значение. Оно получилось равным $0,413 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$. В дальнейшем данная величина будет использоваться для выбора наиболее подходящего варианта остекления для разрабатываемого проекта с учетом требований тепловой защиты зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Galyamichev A. Bearing Capacity of a Glass Facade Systems, Including Stiffness of Nodes and Work of Filling // Proceedings of STCCE: International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022: Lecture Notes in Civil Engineering, Kazan, 21–29 April 2022. Vol. 291. Switzerland: Springer Nature, 2022. P. 43-63. DOI 10.1007/978-3-031-14623-7_4. EDN LRPFXJ.

2. Галямичев А.В., Лысенко Д.А., Титов А. В. Влияние жесткости соединений на напряженно-деформированное состояние безрамного остекления // Светопрозрачные конструкции. 2022. № 1(139). С. 39-44. EDN QEEMFB.

3. Gerasimova E., Galyamichev A., Schwind G., Schneider J. Deflection of a cladding panel of fully tempered glass in curtain wall system // Magazine of Civil Engineering. 2021. No. 4(104). P. 10403. DOI 10.34910/MCE.104.3. EDN HXULQM.

4. Petrichenko M.R., Kotov E.V., Nemova D.V., Tarasova D.S., Sergeev V.V. Numerical simulation of ventilated facades under extreme climate conditions // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 1(77). P. 130-140. DOI 10.18720/MCE.77.12. EDN XPKZPN.

5. Миропольский П.С. Особенности остекления высотных зданий // Инженерные исследования. 2021. № 2. С. 24–30. EDN CXAMRW.

6. Небож Т.Б., Боженко А.М., Шевцова М.А. Аналитический обзор спайдерного остекления // Перспективы науки. 2021. №6. С. 78–80.

7. Семенова Э.Е., Логвинова Е.О. Исследование применения энергосберегающих светопрозрачных конструкций зданий // Высокие технологии в строительном комплексе. 2018. № 1. С. 26–29. EDN XQBRPV.

8. Eleanor S. Lee. Innovative Glazing Materials // Handbook of energy efficiency in buildings. 2019. Chapter 6.3. С. 1–23.

9. Сотникова О.А., Семенова Э.Е., Богай В.А. Исследование энергосберегающих решений при проектировании светопрозрачных конструкций общественных зданий с применением низкоэмиссионного стекла // Сборник научных статей Международной научно-практической конференции. 2019. С. 197–201.

10. Кузнецова Т.В. Низкоэмиссионное стекло - один из современных способов сокращения теплопотери здания // Материалы X Международной молодежной научной конференции. 2020. С. 287–289.

11. Зарипова П. Р., Гамаюнова О. С. Формула энергоэффективного остекления // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 04–10 апреля 2022. Том Часть 2. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 181-184. EDN IXGANK.

12. Юшкова А.Н., Кузьмин А.Д. Повышение энергоэффективности в жилых зданиях при реконструкции // E-Scio. 2019. №4. С. 258–267.

13. Болобан С.А., Гамаюнова О. С. Современные решения в остеклении фасадов общественных зданий // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 04–10 апреля 2022. Том Часть 2. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 153-156. EDN UACAIP.

ОБ АВТОРАХ

Маргарита Павловна Шарагина – студентка. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: sharagina.mp@edu.spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Margarita P. Sharagina – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: sharagina.mp@edu.spbstu.ru

УДК 69.04

РАБОТА МОНОЛИТНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО РЕБРИСТОГО ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ НАЛИЧИИ ПРИОПОРНЫХ УСАДОЧНЫХ ТРЕЩИН В РЕБРАХ

А.А. Цветкова¹, С.А. Агафонов², А.О. Горячева³, Т.В. Маслак⁴

^{1,2} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

³ ООО «ЛОТ», г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

⁴ ООО «5 этажей», г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

Аннотация. В данной статье дано описание и результаты экспериментального исследования характера работы железобетонной конструкции монолитного ребристого перекрытия общественного здания с усадочными трещинами, под нагрузкой. Загружение в 624 кгс/м², соответствующее уровню эксплуатационной нагрузки, прикладывалось ступенчато, на каждом этапе фиксировались прогибы и дефекты конструкции и анализировалась степень влияния усадочных трещин на работу конструкции. В задачи испытаний входила оценка соответствия напряженно-деформированного состояния (НДС) перекрытий проектному НДС, а также анализ поведения усадочных трещин.

Ключевые слова: усадочные трещины, монолитное железобетонное ребристое перекрытие, жесткость, экспериментальное исследование, ползучесть.

Ссылка для цитирования: Цветкова А.А., Агафонов С.А., Горячева А.О., Маслак Т.В. Работа монолитного железобетонного ребристого перекрытия при наличии приопорных усадочных трещин в ребрах // Инженерные исследования. 2023. №1 (11). С. 11-19. EDN: OCVMVQ

THE PERFORMANCE OF A MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE RIBBED FLOOR WITH SHRINKAGE CRACKS IN THE RIBS

A.A.Tsvetkova¹, S.A. Agafonov², A.O. Goryacheva³, T.V. Maslak⁴

^{1,2} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg (Russian Federation)

³ LLC "LOT", Saint-Petersburg (Russian Federation)

⁴ LLC "5 Floors", Saint-Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article describes and presents the results of an experimental study of the nature of the work of a reinforced concrete structure of a monolithic ribbed ceiling with shrinkage cracks, under load. Loading of 624 kgf/m², corresponding to the level of service load, was carried out in several stages, at each stage deflections and structural defects were recorded and the degree of influence of shrinkage cracks on the work of the structure was analyzed. The tasks of the study included an assessment of the compliance of the stress-strain state of the floors with the design stress and strain state, as well as an analysis of the behavior of shrinkage cracks.

Keywords: shrinkage cracks, monolithic reinforced concrete ribbed floor, rigidity, experimental study, creep

For citation: Tsvetkova A.A., Agafonov S.A., Goryacheva A.O., Maslak T.V. The performance of a monolithic reinforced concrete ribbed floor with shrinkage cracks in the ribs // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.1 (11). Pp. 11-19. EDN: OCVMVQ

ВВЕДЕНИЕ

Монолитные ребристые перекрытия нашли широкое применение в практике строительства промышленных и общественных зданий благодаря меньшему по сравнению со сплошными плитами весу при сохранении несущей способности, благодаря чему становится возможна реализация самых разнообразных архитектурных решений.

Процессы, протекающие в процессе твердения бетона таковы, что неизбежно, вследствие испарения воды и других факторов происходит усадка цементного камня и образуются усадочные трещины. Несмотря на то, что коэффициент усадки нормируется, и в настоящее время активно ведется работа по поиску добавок, снижающих усадку бетона [1-3] и оптимизации качества бетонной смеси как обычных [4-6], так и высокопрочных бетонов [7], полностью исключить явление усадки бетона и, как следствие, появление усадочных трещин не представляется возможным.

Большое внимание изучению явлений усадки и ползучести бетона было уделено в 60-80е годы прошлого века. Среди советских ученых, внесших значительный вклад в развитие теории усадки и ползучести бетона в это время, выделяются З.Л. Циолосани [8], В.Н. Шведов [9], д-ра техн. наук Р.Л. Серых [10], В.М. Бондаренко [11], И.Е. Прокопович, П.И. Васильев, А.Б. Гольшев, канд. техн. наук А.В. Яшин, Е.Н. Щербаков, Н.Г. Хубова, В.Г. Назаренко, И.М. Сперанский, М.В. Штейнберг, А.Н. Орлов, В.Я. Бачинский, В.А. Критов.

В это время были изучены механизм усадки цементного камня, взаимосвязь между усадкой и ползучестью, влияние различных факторов на усадочную трещиностойкость бетона, прогнозирование трещиностойкости бетона с помощью математико-статистических методов.

Основные положения по учету ползучести и усадки бетона в железобетонных конструкциях закреплены в соответствующих рекомендациях, разработанных НИИЖБ и изданных в 1988 году.

В это же время проводились отдельные эксперименты по влиянию усадки бетона на деформацию железобетонных элементов, в частности влияния изоляции на деформации от усадки бетона, влияние армирования на деформации от усадки бетона [12].

В 90е-2010е годы большое внимание уделено развитию математического аппарата механики ползучести железобетона как нелинейного материала [13] и рассмотрению усадки совместно с явлением ползучести как явления, возникающего в бетонных конструкциях при приложении статической нагрузки в течение длительного времени.

Некоторое количество современных работ посвящены изучению механизма усадочных деформаций в бетоне [14] и влияние усадочных трещин на напряженно-деформированное состояние (НДС) и жесткость железобетонных конструкций [15, 16] и взаимное влияние усадочных и силовых трещин [17]. Так, автор [17] делает представляющий интерес вывод о том, что усадочные трещины тормозят развитие силовых трещин в бетоне, то есть оказывают не отрицательное, а положительное влияние на работу конструкции. Однако таких работ явно недостаточно, и в связи с недостаточной изученностью проблемы влияния усадочных трещин на прочность и жесткость конструкции, учета усадочных деформаций в расчетных моделях становятся актуальными новые исследования влияния усадочных трещин на работу конструкций под нагрузкой.

Одним из таких исследований является натурное испытание железобетонного монолитного ребристого перекрытия здания общественного назначения, расположенного в Санкт-Петербурге. Испытания проводились научно-исследовательской лабораторией «Политех СКМ тест» в июне 2022 года. В ребрах перекрытия наблюдаются усадочные трещинами как в опорной, так и в пролетной зонах. Трещины проходят строго вдоль арматуры, что косвенно свидетельствует об их происхождении усадочного характера.

Целью экспериментального исследования являлось определить характер работы и перемещения монолитного ребристого перекрытия при действии равномерно распределенной эксплуатационной нагрузки с усадочными трещинами в опорных зонах ребер перекрытия.

В рамках данной цели были решены следующие задачи:

- проведено обследование ребер монолитного перекрытия,
- ступенчато приложена нагрузка 624 кгс/м^2 ;
- после каждого этапа загрузки зафиксированы прогибы конструкции, в том числе после 1-го этапа – непосредственно после приложения нагрузки и через 1 сутки;
- произведен расчет перекрытия в SCAD Office;
- произведен расчет фактического коэффициента ползучести для данной конструкции;
- сделаны выводы о характере работы перекрытия и степени влияния усадочных трещин на работу конструкции.



Рис. 3. Фото обследуемых конструкций а – Конструкция 1 ; б – Конструкция 2
Fig. 3. Photo of examined structures: a – Structure 1 ; b – Structure 2

В задачи испытаний также входила оценка соответствия напряженно-деформированного состояния перекрытий проектному НДС, а также анализ поведения усадочных трещин под эксплуатационной нагрузкой порядка 600 кгс/м^2 .

Испытательные приборы и оборудование. Четыре прогибомера 6-ПАО с точностью показаний $0,01 \text{ мм}$, имеющих действительные сертификаты о поверке.

ХОД ИСПЫТАНИЙ

Перед нагружением конструкций на нижних гранях балок в двух местах – в середине пролета и у места опирания (в $10-15 \text{ см}$ от колонны), были установлены прогибомеры №№1 и 2 на конструкции 1 и №№ 3 и 4 на конструкции 2, замерены ширина раскрытия трещин и зафиксированы все дефекты и повреждения конструкций. Нагружение плиты проводилось в 3 этапа.

1 этап

На поверхность перекрытия на площади 78 м^2 были уложены 15 дорожных плит 2П 30-18-30 по ГОСТ 21924.2-84 размерами $3000 \times 1750 \times 170$ (мм) номинальным весом по 2200 кг каждая (рис. 4, рис.5). Вес всех плит был проконтролирован и составил 32680 кг , уровень нагружения составил 419 кгс/м^2 .

Нагрузка прикладывалась плавно, без ускорения, с коэффициентом динамичности, не превышающим $1,25$.

После окончания приложения нагрузки были сняты показания прогибомеров и зафиксированы имеющиеся дефекты и повреждения конструкции. Под данной нагрузкой конструкции были оставлены на 1 сутки. После выдержки показания прогибомеров были сняты еще раз.

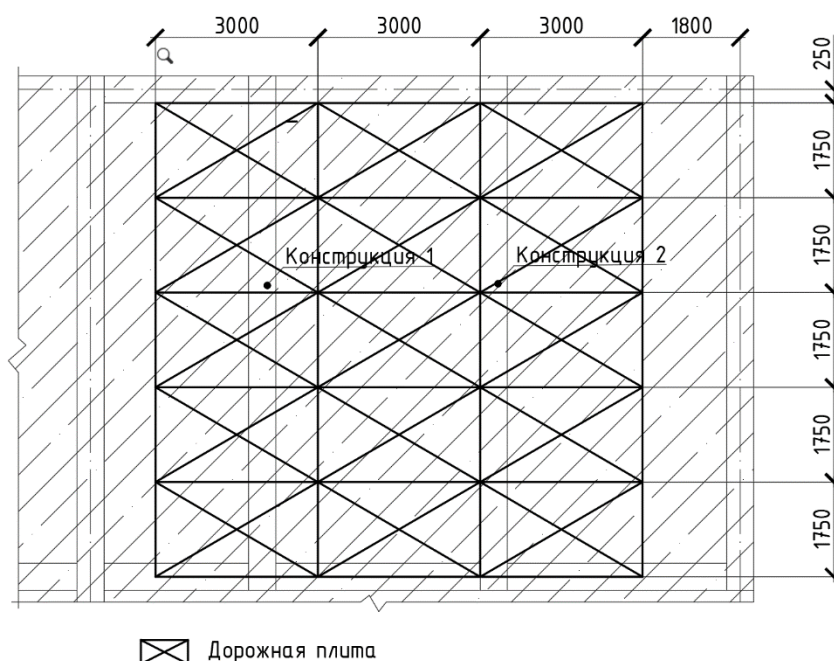


Рис. 4. Схема загрузки дорожными плитами (этап 1)
Fig. 4. The scheme of loading with road slabs (stage 1)

2 этап

На имеющиеся плиты 2П 30-18-30 уложены дополнительно 90 плит П15.5 номинальным весом по 90 кг каждая (рис. 6). Нагрузка прикладывалась ступенчато, за 3 ступеней по 30 плит каждая. Вес плит был проконтролирован и составил 8,19т., общий вес 40,87т. Уровень нагружения составил 524 кгс/м². Зафиксированы показания прогибомеров и имеющиеся дефекты и повреждения конструкций.

3 этап.

На нагружаемую площадь добавлены еще 30 плит перекрытия ПТ 75.120.12-9 номинальным весом по 260 кг каждая (рис. 7), в 2 этапа. Вес этих плит составил 7,8т., общий вес 48,7т. Суммарное нагружение 624 кгс/м². Зафиксированы показания прогибомеров.



Рис. 5. Первый этап нагружения дорожными плитами
Fig. 5. The first stage of loading with road slabs



Рис. 6. Второй этап нагружения дорожными плитами
Fig. 6. The second stage of loading with road slabs



Рис. 7. Третий этап нагружения дорожными плитами
Fig. 7. The third stage of loading with road slabs

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты измерений прогибов контрольных точек на каждом этапе нагружения представлены ниже (табл. 1, рис. 8).

Таблица 1. Результаты определения прогибов конструкций
Table 1. The results of determining the deflections of structures

Этап	Нагрузка, кгс/м ²	Конструкция 1				Конструкция 2			
		Прогибомеры, мм		Прогибы в контрольных точках, мм		Прогибомеры, мм		Прогибы в контрольных точках, мм	
		1	2	середина	у опоры	4	3	середина	у опоры
0	0	74,20	97,30	0	0	33,07	95,29	0	0
1.1	419	73,27	97,26	0,93	-0,04	31,69	95,38	1,38	-0,09
1.2	419+1сут	73,11	97,42	1,09	0,12	31,63	95,16	1,44	0,13
2.1	454	72,90	97,42	1,3	0,12	31,38	95,19	1,69	0,1
2.2	489	72,77	97,41	1,43	0,11	31,21	95,21	1,86	0,08
2.3	524	72,55	97,39	1,65	0,09	30,96	95,27	2,11	0,02
3.1	574	72,46	97,39	1,74	0,09	30,89	95,27	2,18	0,02
3.2	624	72,36	97,39	1,84	0,09	30,73	95,27	2,34	0,02



Рис. 8. Зависимость перемещений в середине пролета от величины нагрузений
Fig. 8. Dependence of deflections in the middle of the span on the amount of loading

Схема нагружения и результаты расчета перемещений плиты перекрытия в SCAD Office представлены ниже (рис. 9-11).

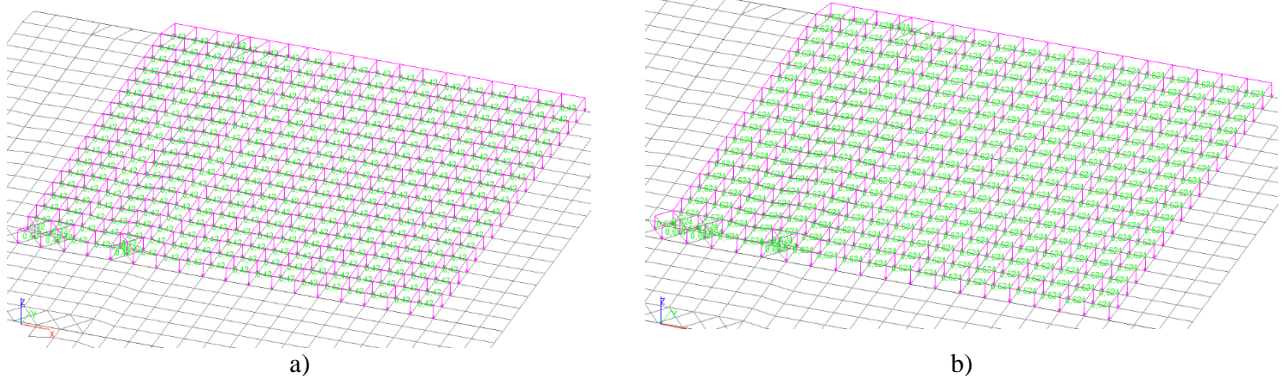


Рис. 9. Схема приложения нагрузки. а – 419 кгс/м² 1; б – 624 кгс/м².
Fig. 9. Load application scheme: а – 419 kgf/m² 1; б – 624 kgf/m²

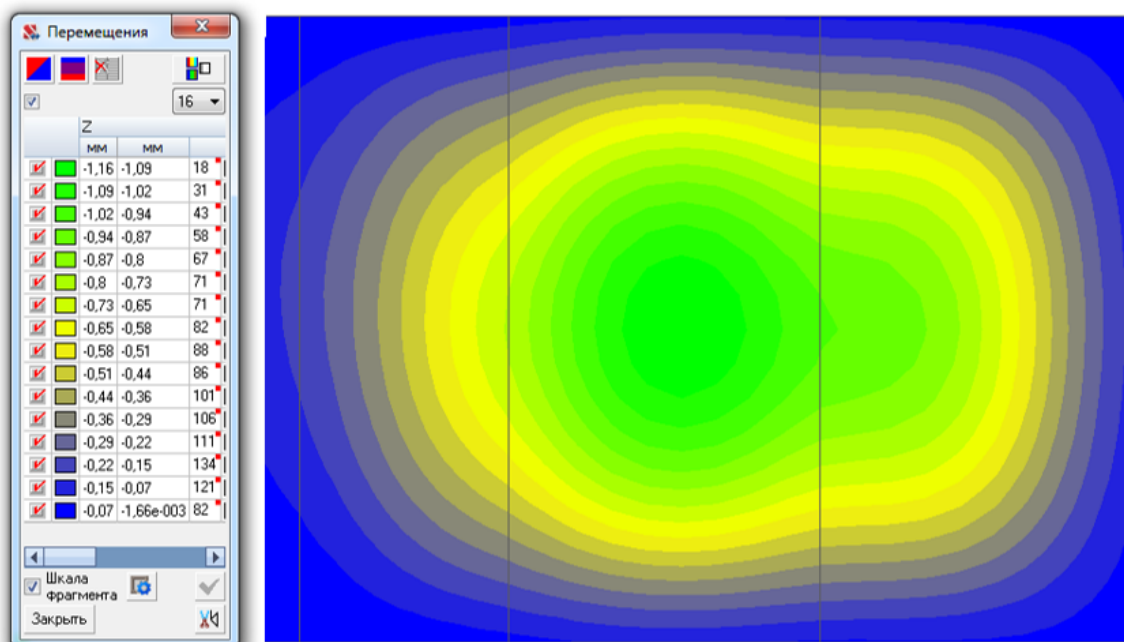


Рис. 10. Вертикальные перемещения от нагрузки 419 кгс/м²
 Fig. 10. Vertical deflection from a load of 419 kgf/m²

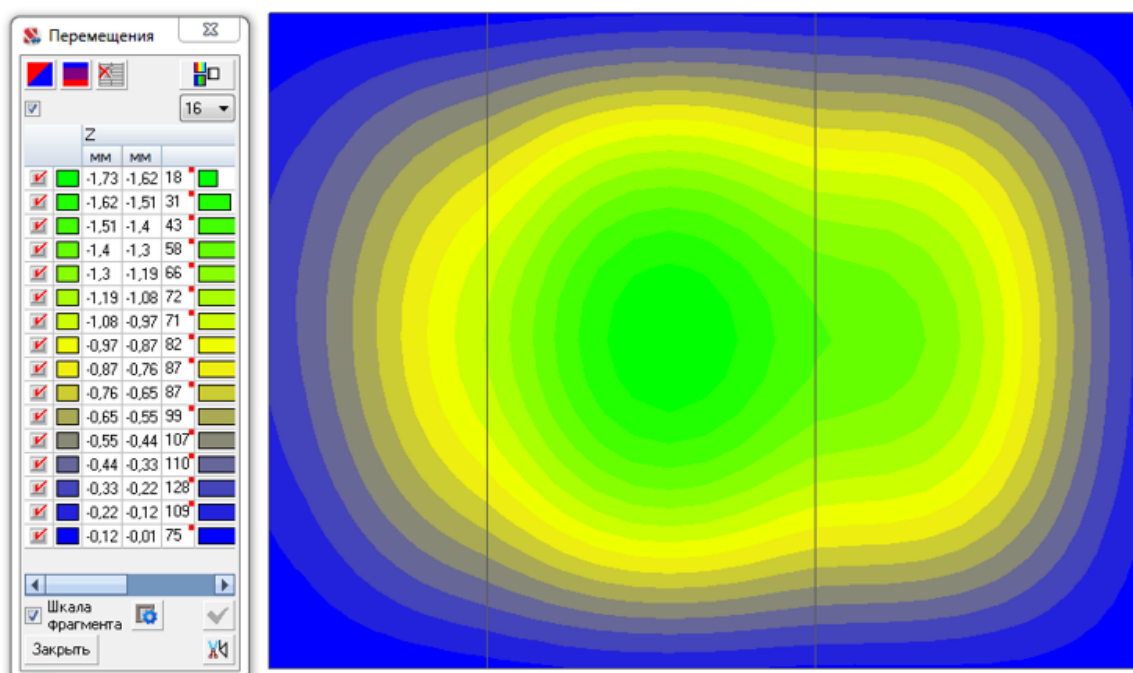


Рис. 11. Вертикальные перемещения от нагрузки 624 кгс/м²
 Fig. 11. Vertical deflection from a load of 624 kgf/m²

На основании полученных результатов было вычислено фактическое значение коэффициента ползучести бетона по зависимости (1):

$$y_{упр} = \frac{y_{факт}}{\varphi_{b,cr} + 1} \rightarrow \varphi_{b,cr} + 1 = \frac{y_{факт}}{y_{упр}} \rightarrow \varphi_{b,cr} = \frac{y_{факт}}{y_{упр}} - 1 \quad (1)$$

где $y_{упр}$ - прогиб в предположении работы конструкции в упругой стадии; $y_{факт}$ - фактический прогиб с учетом ползучести; $\varphi_{b,cr}$ - коэффициент ползучести;

Результаты вычисления фактических значений ползучести и сравнения данных значений со значениями СП 63.13330 представлены ниже (табл. 2).

Таблица 2. Сравнительный анализ фактических и нормативных значений коэффициента ползучести
Table 2. Comparative analysis of actual and normative values of the creep coefficient

Уровень загрузки	Фактическое значение $\varphi_{b,cr}^{\phi}$	Фактический модуль деформации $E_{b,\tau}^{\phi}$, МПа $\cdot 10^{-3}$	Значение $\varphi_{b,cr}^H$ по СП 63.13330 (Бетон В25, относительная влажность >75%)	Нормативный модуль деформации $E_{b,\tau}^H$ (Бетон В25), МПа $\cdot 10^{-3}$	$\frac{E_b^{\phi} - E_b^H}{E_b^H} \cdot 100\%$
419 кгс/м ²	0,24	24,19	1,8	10,7	+126
624 кгс/м ²	0,35	22,22	1,8	10,7	+107

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения эксперимента установлено, что:

1. Максимальные перемещения плиты составляют 2.34 мм и не превышают нормативные, составляющие, в соответствии с табл. Д.1. СП 20.13330 при пролете 4 м 24 мм (по интерполяции), следовательно, характер работы перекрытия и его напряженно-деформированное состояние без изменений относительно проектного.

2. Фактический коэффициент ползучести составляет 0.35 и не превышает коэффициента ползучести 1.8 по табл. 6.12 СП 63.13330, следовательно, усадочные трещины не влияют на деформативность конструкции перекрытия.

3. Коэффициенты ползучести, указанные в табл. 6.12. СП 63.13330 существенно завышены и, применительно к данному исследованию, привели к погрешностям вычисления модуля деформации, составляющим 126% и 107%.

4. Характер работы конструкций –линейный (физическая линейность), что наглядно иллюстрирует график на рис. 8.

5. Взаимное смещение частей монолитной железобетонной конструкции относительно вертикальных трещин не обнаружено; наблюдается постепенное закрытие трещин под действием нагрузки. Кроме того, усадочные трещины не влияют на жесткость;

6. Смещение точек исследованных балок на расстоянии 10-15 см от опор составляет 0,6...0,13мм и носит характер смещение узла стыка колонн и балок как жесткого целого вследствие деформаций сжатия колонн и осадки фундамента под нагрузкой.

Все вышесказанное может говорить о том, что негативный эффект усадочных трещин в современной литературе несколько преувеличен и нивелируется деформациями ползучести. Дальнейшее изучение усталостных трещин может быть продолжено, в том числе, с применением математического аппарата теории ползучести.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность научно-испытательной лаборатории «Политех-СКИМ-Тест» в лице заведующего Акимова Станислава Васильевича и к.т.н., доцента ФГАОУ ВО СПбПУ Рыбакову Владимиру Александровичу за проведение и предоставление результатов эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несветаев Г.В., Тимонов С.А., Чмель Г.В. К оценке эффективности суперпластификаторов// Железобетон, строительные материалы и технологии в третьем тысячелетии. Межкафедральный сборник научных трудов. Второй выпуск, Ростов-на-Дону, 2001. С 429-432.

2. Демьянова В.С. Миненко Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2004. №4(544). С. 31-34.

3. Шмитько Е.И., Макушина Ю.В., Белькова Н.А., Милохин И.В. Влажностная усадка бетона: влияние состава и структуры применяемых пластифицирующих добавок // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2020. №1(42). С. 128-135.

4. Придатко Ю.М. Способ регулирования усадки бетона. Патент на изобретение, Россия, 2007.

5. Барабанщиков Ю.Г., Архарова А.А., Терновский М.В. Бетон с пониженной усадкой и ползучестью // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №7(22). С. 152-165.

6. Макушина Ю.В., Шмицько Е.И., Белькова Н.А. Пути оптимизации качества бетонов по показателю качественной усадки // Химия, физика и механика материалов. 2020. №4 (27). С. 50-65.
7. Дайронас М.В., Ломако А.Л., Капленко О.А. Аутогенная усадка высокопрочных бетонов и пути ее уменьшения // Университетская наука. 2022. №1 (13). С. 31-34.
8. Циловани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси, 1979.
9. Шведов В.Н. Усадка и трещиностойкость бетонов. Кишинев. 1985.
10. Серых Р.Л. Исследование усадки конструктивного железобетона // Труды МАДИ. Мосты и строительная техника: сб. науч. тр. М.: МАДИ. 1972. Вып. 46.
11. Бондаренко В.М., Суровкин Д.Г. Железобетонные и каменные конструкции. М. Высшая школа, 1987.
12. Людковский И.Г., Мизернюк Б. Н., Терехова Г.Б., Ковалев Е.В. Деформации железобетонных элементов от усадки // Прочность и деформативность бетона и специальных железобетонных конструкций. Москва, 1972. С. 33-54.
13. Тамразян А. Г., Есаян С. Г. Механика ползучести бетона: монография. Москва: Изд-во МИСИ - МГСУ, 2012. ISBN 978-5-7264-0664-0. EDN QNQFSB.
14. Каримов И.Ш. Механизм усадочных деформаций бетона и факторы, влияющие на них (обзор) // Технологии бетонов. 2010. №7-8(48-49). С. 20-23.
15. Ерышев В.А., Латышева Е.В., Латышев Д.И. Учет усадочных деформаций на напряженное состояние арматуры и бетона при трещинообразовании // Вестник ВРО РААСН, Нижний Новгород, 2011. №14. С. 191-198.
16. Карпенко Н.И., Ерышев Н.И., Латышева Е.В., Бондаренко А.С. Деформации железобетонного элемента с учетом усадочных деформаций // Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. 2013. №31(50) Ч.2. Строительные науки. С. 344 – 357.
17. Ахмедзянов Ф.Х. К эффекту торможения силовой трещины в цементном камне (бетоне) усадочным трещинообразованием // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. №3(29). С. 14-18.

ОБ АВТОРАХ

Анна Андреевна Цветкова – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. E-mail: annatsvetkova2014@mail.ru

Сергей Александрович Агафонов – ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29. E-mail: agaf50@gmail.com

Анна Олеговна Горячева – главный специалист ООО «ЛОТ», 194156, Россия, г. Санкт-Петербург, Сердобольская ул., д.1. E-mail: vse_zdes@mail.ru

Татьяна Викторовна Маслак – генеральный директор ООО «5 этажей», 196247, Россия, г. Санкт-Петербург, Новоизмайловский пр., д. 63, оф. 72. E-mail: tmaslak@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Anna A. Tsvetkova – the Master degree student of Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: annatsvetkova2014@mail.ru

Sergey A. Agafonov – assistant of the higher school of industrial, civil and road construction of Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 195251, Russia, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: agaf50@gmail.com

Anna O. Goryacheva – shief specialist of LLC «LOT», 194156, Russia, Saint-Petersburg, Serdobolskaya st., 1. E-mail: vse_zdes@mail.ru

Tatiana V. Maslak – general director of LLC «5 Floors», 196247, Russia, Saint-Petersburg, Novoizmajlovskij av., 63, office 72. E-mail: tmaslak@mail.ru

УДК 699.86

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТИПОВЫХ СЕРИЙ ПАНЕЛЬНЫХ ДОМОВ

И.Ю. Воронов

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

Аннотация. До настоящего времени эксплуатируется большое количество серийных панельных домов, построенных еще в советский период. В то время большинство домов типовых серий строилось в качестве временного жилья. В статье рассмотрено девять типовых серийных зданий, произведён теплотехнический расчёт ограждающих стеновых конструкций. На основании проведённого обзора научных публикаций, определены основные пути снижения энергозатрат зданий, рассмотрены энергоэффективные ограждающие конструкции. С помощью теплотехнического расчета дана оценка энергетической эффективности ограждающих стеновых конструкций типовых серий панельных домов: 1-ЛГ-602, 1-ЛГ-504, 1-468, 1-ЛГ-600А (корабль), 137, 1-335, 1-447, 1-528КП, 114-85. Показано, что у всех серий фактическое сопротивление теплопередаче в несколько раз меньше требуемого, что говорит о высоких тепловых потерях в рассматриваемых типовых сериях жилых зданий. При этом у кирпичных зданий сопротивление теплопередаче все же выше, но также не соответствует современным требованиям тепловой защиты.

Ключевые слова: панельные дома, типовые серии, энергоэффективность, энергосбережение, тепловая защита зданий, теплотехнический расчет, ограждающие конструкции.

Ссылка для цитирования: Воронов И.Ю. Энергетическая эффективность типовых серий панельных домов // Инженерные исследования. 2023. №1 (11). С. 20-30. EDN: PEZEV

ENERGY EFFICIENCY OF STANDARD SERIES OF PANEL HOUSES

I.Yu. Voronov

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

Abstract. To date, a large number of serial panel houses built in the Soviet period are in operation. At that time, most of the standard series houses were built as temporary housing. The article considers nine typical serial buildings, made a thermal calculation of enclosing wall structures. Based on the review of scientific publications, the main ways to reduce the energy consumption of buildings are identified, and energy-efficient building envelopes are considered. With the help of thermal engineering calculation, an assessment of the energy efficiency of enclosing wall structures of typical series of panel houses is given: 1-LG-602, 1-LG-504, 1-468, 1-LG-600A (ship), 137, 1-335, 1-447, 1-528KP, 114-85. It is shown that for all series the actual resistance to heat transfer is several times less than the required one, which indicates high heat losses in the considered typical series of residential buildings. At the same time, in brick buildings, the resistance to heat transfer is still higher, but also does not meet modern requirements for thermal protection.

Keywords: panel houses, standard series, energy efficiency, energy saving, thermal protection of buildings, thermal engineering calculation, enclosing structures.

For citation: Voronov I.Yu. Energy efficiency of standard series of panel houses// Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.1 (11). Pp. 20-30. EDN: PEZEV

ВВЕДЕНИЕ

Проблема типовых панельных домов, построенных в конце XX века стоит остро, так как дома за прошедшие несколько десятилетий значительно устарели и требуют модернизации под современные стандарты и нормы энергетической эффективности [1, 2]. В работах современных авторов можно найти обоснование различных конструктивных решений по увеличению энергоэффективности ограждающих стеновых конструкций [3, 4, 5]. Кроме того, авторы предлагают и другие направления: использование светодиодных лампочек, использование современных теплоизоляционных наноматериалов (аэрогель, вакуумная теплоизоляция, жидкая теплоизоляция и др.) [8], использование энергосберегающих окон [11] и даже внедрение системы «умный дом» [12]. Отдельное внимание уделяется при этом влажностному режиму ограждающих конструкций [13, 14, 16]. Встречаются научные публикации, где авторы рассматривают принципы проектирования энергоэффективных зданий, основанные на применении оптимизационного моделирования [17, 18, 20, 22].

Проблема низкой энергоэффективности домов типовых серий советской постройки актуальна также и для Санкт-Петербурга. В городе девятки разных типовых серий домов еще советской постройки. Так, для определения энергетической эффективности типовых серий панельных домов были выбраны: 1-ЛГ-602 (рис.1), 1-ЛГ-504 (рис.2), 1-468 (рис.3), 1-ЛГ-600А (рис.4), 137 (рис.5), 1-335 (рис.6), 1-447 (рис.7), 1-528КП (рис.8), 114-85 (рис.9).



Рис. 1. Дом серии 1-ЛГ-602¹
Fig. 1. House series 1-LG-602



Рис. 2. Дом серии 1ЛГ-504¹
Fig. 2. House series 1LG-504



Рис. 3. Дом серии 1-468¹
Fig. 3. House Series 1-468



Рис. 4. Дом серии 1-ЛГ-600А
(корабль)²
Fig. 4. House series 1-LG-600A (ship)



Рис. 5. Дом серии 137¹
Fig. 5. House series 137



Рис. 6. Дом серии 1-335¹
Fig. 6. House series 1-335



Рис. 7. Дом серии 1-447¹
Fig. 7. House Series 1-447



Рис. 8. Дом серии 1-528КП¹
Fig. 8. House series 1-528KP



Рис. 9. Дом серии 114-85¹
Fig. 9. House series 114-85

¹ Типовые серии домов [Электронный ресурс]. – URL: https://www.kvmeter.ru/information/homes_series/ (дата обращения: 07.01.2023).

² 1-ЛГ-600 [Электронный ресурс]. – URL: <https://tipdoma.com/2009/07/zhilye-doma-serii-600-korabl/> (дата обращения: 07.01.2023).

Все расчёты будут производиться для природно-климатических условий Санкт-Петербурга (климатический район - ПВ, ветровой принимается - II, снеговой район - III). Необходимо провести теплотехнический расчёт ограждающих стеновых конструкций указанных выше типовых серий панельных домов, чтобы проверить, соответствуют ли они требованиям к минимально допустимому термическому сопротивлению ограждающих конструкций $R_{\text{треб}}^0$ [15].

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 1ЛГ-602

Серия 1ЛГ-602 (рис.1, табл.1, табл.2) является одной из наиболее распространённых серий в Санкт-Петербурге. Первый дом по данному типовому проекту был построен в 1966 г. в Ленинграде. Производством занимался Обуховский ДСК.

Таблица 1. Основные характеристики домов серии 1ЛГ-602
Table 1. The main characteristics of houses of the 1LG-602 series

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	1ЛГ-602
2	Период строительства	С 1966 по 1983 год
3	Тип дома	Панельный
4	Этажность	5, 9
5	Количество комнат в квартире	1,2,3,4
6	Высота жилых помещений	2,51 м

Таблица 2. Основные характеристики стеновой панели домов серии 1ЛГ-602
Table 2. The main characteristics of the wall panel of houses of the 1LG-602 series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Панели заводского изготовления
2	Материал	Керамзитобетон на кварцевом песке
3	Толщина	300 мм

По карте зон влажности (Приложение В СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП23-02-2003»), Санкт-Петербург относится к влажной зоне. Тогда по таблице 2 принимаем условия эксплуатации ограждающих конструкций в зависимости от влажностного режима помещений и зон влажности района строительства «Б».

Определим приведённое сопротивление теплопередаче многослойной конструкции по формуле (1):

$$R_0 = \frac{1}{a_{\text{в}}} + R_K + \frac{1}{a_{\text{н}}}, \quad (1)$$

где R_K – термическое сопротивление многослойной конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$;

$a_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий теплоотдачу внутренней поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ принимаемый по СП 50.13330.2012;

$a_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий теплоотдачу наружной поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ принимаемый по СП 50.13330.2012;

Термическое сопротивление многослойной конструкции R_K определяем по формуле (2):

$$R_K = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (2)$$

где i – порядковый номер слоя конструкции;

δ_i – толщина i -го слоя, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя, $\text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{°C}$.

Воспользуемся приведёнными выше формулами и рассчитаем фактические значения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций рассматриваемого здания.

Наружные стены представляют собой сборные панели заводского изготовления. Материал стен – керамзитобетон на кварцевом песке, толщина – 300 мм. Состав конструкции наружных стен до утепления приводится в табл. 3. При это следует учесть, что допустимое термическое сопротивление стеновых конструкций – $2,99 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$.

Таблица 3. Состав конструкции наружных стен до утепления
 Table 3. The composition of the structure of the outer walls before insulation

№	Материал	Плотность	Толщина слоя	Коэффициент теплопроводности
-	-	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\delta, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$
1	Плиты из керамзитобетона на кварцевом песке	1200	0,3	0,58

Отделочные материалы внешних и внутренних поверхностей в состав расчётной конструкции стены не включаются в связи с незначительным влиянием их на суммарное термическое сопротивление стены. Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_0^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,3}{0,58} + \frac{1}{23} = 0,68 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 1ЛГ-504

Дома серии 504 (рис.2, табл.4 - табл.6) отличаются тем, что имеют наименьшую площадь квартир среди панельных домов других серий. При этом, дома данной серии ценятся немного выше первых «хрущёвок», но меньше других панельных домов. Основным преимуществом домов серии 504 перед сериями «Корабль» и «хрущёвками» – паркетные полы и чуть большая кухня.

Таблица 4. Основные характеристики домов серии 1ЛГ-504
 Table 4. The main characteristics of houses of the 1LG-504 series

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	1ЛГ-504
2	Период строительства	С 1969 по 1972 год
3	Тип дома	Панельный
4	Этажность	5, 9, 10, 12
5	Количество комнат в квартире	1,2,3,4
6	Высота жилых помещений	2,35

Таблица 5. Основные характеристики стеновой панели домов серии 1ЛГ-504
 Table 5. The main characteristics of the wall panel of houses of the 1LG-504 series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Панели заводского изготовления
2	Материал	Керамзитобетон М50
3	Толщина	400 мм

Таблица 6. Состав конструкции наружных стен домов серии 1ЛГ-504
 Table 6. The composition of the construction of the outer walls of houses of the 1LG-504 series

№	Материал	Плотность	Толщина слоя	Коэффициент теплопроводности
-	-	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\delta, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$
1	Керамзитобетон М50	800	0,4	0,36

Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_0^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,4}{0,36} + \frac{1}{23} = 1,27 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 1-468

Дома серии 1-468 (рис.3, табл.7 - табл.9) относятся к классическим представителям «хрущёвок». В домах этажностью от 5 до 9 этажей отсутствуют мусоропроводы и лифты в 5-этажных домах, в некоторых двухкомнатных квартирах, за исключением торцевой секции, смежные комнаты.

Таблица 7. Основные характеристики домов серии 1-468
Table 7. The main characteristics of houses of the 1-468 series

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	1-468
2	Период строительства	С 1960 по 1980 год
3	Тип дома	Панельный
4	Этажность	5, 9
5	Количество комнат в квартире	1,2,3
6	Высота жилых помещений	2,5-2,52

Таблица 8. Основные характеристики стеновой панели домов серии 1-468
Table 8. The main characteristics of the wall panel of houses of the 1-468 series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Панели заводского изготовления
2	Материал	Ячеистый бетон М50
3	Толщина	350 мм

Таблица 9. Состав конструкции наружных стен домов серии 1-468
Table 9. The composition of the construction of the outer walls of houses of the 1-468 series

№	Материал	Плотность	Толщина слоя	Коэффициент теплопроводности
		$\rho, \text{кг/м}^3$	$\delta, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$
1	Ячеистый бетон М50	1000	0,350	0,24

Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_0^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,35}{0,24} + \frac{1}{23} = 1,62 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 1-ЛГ-600А (КОРАБЛЬ)

«Корабли» (рис.4, табл.10 – табл.12) – наиболее типичные и узнаваемые дома первой половины 1970-х годов, которые относятся к третьему после «хрущёвок» и ранних «брежневок» градостроительному поколению панельных домов. Квартиры в этих домах на сегодняшнем квартирном рынке наряду с жильём в хрущёвских пятиэтажках считаются самым доступным городским жильём.

Таблица 10. Основные характеристики домов типовой серии 1-ЛГ-600А
Table 10. The main characteristics of houses of a typical series 1-LG-600A

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	1-Лг-600А
2	Период строительства	С 1969 по 1982 год
3	Тип дома	Панельный
4	Этажность	5-15
5	Количество комнат в квартире	1,2,3
6	Высота жилых помещений	2,5

Таблица 11. Основные характеристики стеновой панели домов серии 1-ЛГ-600А
Table 11. The main characteristics of the wall panel of houses of the 1-LG-600A series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Панели заводского изготовления
2	Материал	Газобетон
3	Толщина	240 мм

Таблица 12. Состав конструкции наружных стен домов серии 1-ЛГ-600А
Table 12. The composition of the construction of the outer walls of houses of the 1-LG-600A series

№	Материал	Плотность	Толщина слоя	Коэффициент теплопроводности
		$\rho, \text{кг/м}^3$	$\delta, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$
1	Газобетон	1000	0,240	0,29

Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_0^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,24}{0,29} + \frac{1}{23} = 0,99 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 137

Крупнопанельные дома серии 137 (рис.5, табл.13 – табл.15) в житейском обиходе всегда считались самыми престижными и качественными из всех панельных построек.

Таблица 13. Основные характеристики домов серии 137
Table 13. The main characteristics of houses of a typical series 137

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	137
2	Период строительства	С 1973 по 1995 год
3	Тип дома	Панельный
4	Этажность	9-16
5	Количество комнат в квартире	1,2,3,4,5
6	Высота жилых помещений	2,7

Таблица 14. Основные характеристики стеновой панели домов серии 137
Table 14. The main characteristics of the wall panel of houses of the 137 series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Панели заводского изготовления
2	Материал	Газобетон
3	Толщина	285 мм

Таблица 15. Состав конструкции наружных стен домов серии 137
Table 15. The composition of the construction of the outer walls of houses of the 137 series

№	Материал	Плотность	Толщина слоя	Коэффициент теплопроводности
-	-	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\delta, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$
1	Газобетон	1000	0,285	0,29

Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_0^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,285}{0,29} + \frac{1}{23} = 1,14 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 1-335

Серия 1-335 (рис.6, табл.16 – табл.18) является одной из первых общесоюзных серий. Они легко узнаваемы по большим панелям (во всю высоту), широким окнам, торцам из четырёх панелей с двумя рядами окон. Дома серии 1-335 полукаркасного типа на сегодня исчерпали надёжность конструктивной схемы и находятся в предаварийном состоянии.

Таблица 16. Основные характеристики домов серии 1-335
 Table 16. The main characteristics of houses of a typical series 1-335

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	1-335
2	Период строительства	С 1956 по 1968 год
3	Тип дома	Панельный
4	Этажность	2-5
5	Количество комнат в квартире	1-3
6	Высота жилых помещений	2,55

Таблица 17. Основные характеристики стеновой панели домов серии 1-335
 Table 17. The main characteristics of the wall panel of houses of the 1-335 series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Панели заводского изготовления
2	Материал	Шлакобетон
3	Толщина	300 мм

Таблица 18. Состав конструкции наружных стен домов серии 1-335
 Table 18. The composition of the construction of the outer walls of houses of the 1-335 series

№	Материал	Плотность	Толщина слоя	Коэффициент теплопроводности
-	-	ρ , кг/м ³	δ , м	λ , Вт/м ² · °С
1	Ячеистый бетон М50	1100	0,300	0,36

Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_{0 \text{ стены}}^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,3}{0,36} + \frac{1}{23} = 0,99 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}.$$

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 1-447

Типовой проект дома 1-447 (рис.7, табл.19 – табл.21) является общесоюзной серией и присутствует практически во всех районах Москвы и в большинстве других регионов. Пятиэтажные дома серии 1-447 легко узнаваемы по необлицованным внешним стенам, двум рядам окон в торцевых сторонах (в основном без балконов), а также по прямоугольной форме корпуса при отсутствии выступов и угловых секций. Модификаций данной серии очень много.

Таблица 19. Основные характеристики домов серии 1-447
 Table 19. The main characteristics of houses of a typical series 1-447

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	1-447
2	Период строительства	С 1958 по 1964 год
3	Тип дома	Кирпич
4	Этажность	4-5
5	Количество комнат в квартире	1-3
6	Высота жилых помещений	2,48

Таблица 20. Основные характеристики стеновой панели домов серии 1-447
 Table 20. The main characteristics of the wall panel of houses of the 1-447 series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Кирпичные стены
2	Материал	Кирпич пустотелый
3	Толщина	380 мм

Таблица 21. Состав конструкции наружных стен домов серии 1-447
 Table 21. The composition of the construction of the outer walls of houses of the 1-447 series

№	Материал	Плотность	Толщина слоя	Коэффициент теплопроводности
		$\rho, \text{кг/м}^3$	$\delta, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$
1	Кирпич пустотелый	1100	0,380	0,3

Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_0^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,38}{0,3} + \frac{1}{23} = 1,43 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 1-528КП

Серию 1-528КП (рис.8, табл.22 – табл.24) спроектировал ЛенЗНИИЭП для северной климатической зоны, эти дома встречаются практически во всех районах Санкт-Петербурга (даже в Петроградском и Центральном), а также в пригородах (Пушкине, Павловске) и в других регионах бывшего СССР.

Таблица 22. Основные характеристики домов серии 1-528КП
 Table 22. The main characteristics of houses of a typical series 1-528KP

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	1-528КП
2	Период строительства	С 1957 по 1972 год
3	Тип дома	Кирпичный
4	Этажность	2-5
5	Количество комнат в квартире	1,2,3
6	Высота жилых помещений	2,7-2,8

Таблица 23. Основные характеристики стеновой панели домов серии 1-528КП
 Table 23. The main characteristics of the wall panel of houses of the 1-528KP series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Здание из кирпича
2	Материал	Кирпич силикатный
3	Толщина	510 мм

Таблица 24. Состав конструкции наружных стен домов серии 1-528КП
 Table 24. The composition of the construction of the outer walls of houses of the 1-528KP series

№	Материал	Плотность	Толщина слоя	Коэффициент теплопроводности
		$\rho, \text{кг/м}^3$	$\delta, \text{м}$	$\lambda, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$
1	Кирпич пустотелый	1100	0,510	0,26

Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_0^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,51}{0,26} + \frac{1}{23} = 2,12 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ОГРАЖДАЮЩИХ СТЕНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ СЕРИИ 114-85

114-85 или просто 85 (рис.9, табл.25 – табл.27) - общесоюзная типовая серия многоквартирных кирпичных жилых домов в СССР. Серия была разработана ЦНИИЭП Жилища в 1969 году на основе серии 1-447С. Дома серии 85 возводились с 1974 года по середину 2000-х годов. Дома данной серии относятся к «брежневкам» позднего периода («улучшенные» или «новая планировка»).

Таблица 25. Основные характеристики домов серии 114-85
Table 25. The main characteristics of houses of a typical series 114-85

№	Характеристика	Значение
1	Типовая серия	114-85
2	Период строительства	С 1974 по 2000 год
3	Тип дома	Кирпичный
4	Этажность	5-10
5	Количество комнат в квартире	1,2,3,4
6	Высота жилых помещений	2,48

Таблица 26. Основные характеристики стеновой панели домов серии 114-85
Table 26. The main characteristics of the wall panel of houses of the 114-85 series

№	Характеристика	Значение
1	Конструктивное исполнение	Здание из кирпича
2	Материал	Кирпич силикатный
3	Толщина	510 мм

Таблица 27. Состав конструкции наружных стен домов серии 114-85
Table 27. The composition of the construction of the outer walls of houses of the 114-85series

№	Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Толщина слоя δ , м	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м ² · °С
1	Кирпич силикатный	1300	0,510	0,5

Таким образом, сопротивление теплопередаче существующих наружных стен будет равно:

$$R_0^{\text{факт}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,51}{0,5} + \frac{1}{23} = 1,18 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°С}}{\text{Вт}}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расход тепловой энергии напрямую зависит не только от потребления энергоресурсов потребителем, но также от качества проектирования и монтажа различных конструкций и элементов здания. Для обеспечения высокого уровня энергосбережения необходим комплексный подход к решению данной проблемы. Основными решениями, направленными на энергосбережение, являются конструктивные и архитектурные решения, закладываемые на этапе проектирования и строительства зданий.

В настоящее время в России большинство зданий по своим теплотехническим характеристикам не соответствуют современным требованиям строительной теплотехники. В зданиях старого фонда потери тепла значительны.

В табл.28 сведены результаты теплотехнического расчёта ограждающих стеновых конструкций типовых серий панельных жилых домов. Расчёты показали, что у всех серий фактическое сопротивление теплопередаче в несколько раз меньше, чем требуемое (3,08 м² · °С/Вт), что говорит о высоких теплопотерях в рассматриваемых зданиях. При этом у кирпичных зданий сопротивление теплопередаче все же выше, но все так же не соответствует современным требованиям тепловой защиты.

В связи с несоответствием теплотехническим нормам необходимо проводить мероприятия по увеличению энергетической эффективности. Основным направлением повышения энергоэффективности существующих жилых многоквартирных домов и снижения затрат на тепловую энергию является утепление ограждающих конструкций.

Таблица 28. Теплотехнические характеристики типовых серий панельных домов
 Table 28. Thermal characteristics of typical series of panel houses

Серия дома	Тип дома	Этажность	Материал стен	Толщина стены, м	Кэф-т теплопроводности материала стен, Вт/(м ² · °С)	Сопротивление теплопередаче стен, м ² · °С/Вт
1ЛГ-602	Панельный	5, 9	Керамзитобетон на кварцевом песке	0,3	0,58	0,68 ▼
1ЛГ-504	Панельный	5, 9, 10, 12	Керамзитобетон	0,4	0,36	1,27 ▼
1-468	Панельный	5, 9	Ячеистый бетон	0,35	0,24	1,62 ▼
1-ЛГ-600А	Панельный	5-15	Газобетон	0,24	0,29	0,99 ▼
137	Панельный	9-16	Газобетон	0,285	0,29	1,14 ▼
335	Панельный	2-5	Шлакобетон М100	0,3	0,36	0,99 ▼
1-447	Кирпичный	4-5	Кирпич пустотелый	0,38	0,3	1,43 ▼
1-528КП	Кирпичный	2-5	Кирпич пустотелый	0,51	0,26	2,12 ▼
114-85	Кирпичный	5-10	Кирпич силикатный	0,51	0,5	1,18 ▼

Самые большие теплопотери у домов типовой серии 1-468. Отмечено превышение теплопотерь в сериях 1-ЛГ-600А, 137, 1-447, 1-528КП в 4 раза. В сериях 114-85, 1ЛГ-602 превышение в два раза, в сериях 1ЛГ-504, 335 - в три.

Дальнейшие этапы исследования предполагают расчет срока окупаемости мероприятий по теплозащите, которые направлены на повышение уровня тепловой защиты за счет дополнительной теплоизоляции стен существующих зданий рассмотренных типовых серий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давидюк А. Н., Несветаев Г.В. Крупнопанельное домостроение – важный резерв для решения жилищной проблемы в России // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 24-25. EDN OHWLXE.
2. Денисова Е. Г., Птухина И. С. Проблемы современной застройки в историческом центре Санкт-Петербурга // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2021: Сборник докладов Второй Национальной научной конференции, Москва, 08 декабря 2021. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2022. С. 817-820. EDN VYBMOA.
3. Musorina T., Gamayunova O., Petrichenko M., Soloveva E. Boundary Layer of the Wall Temperature Field // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1116. P. 429-437. DOI 10.1007/978-3-030-37919-3_42. EDN XOQVUE.
4. Musorina T. A., Gamayunova O. S., Petrichenko M. R. Thermal regime of enclosing structures in high-rise buildings // Vestnik MGSU. 2018. Vol. 13, No. 8(119). P. 935-943. DOI 10.22227/1997-0935.2018.8.935-943. EDN XZHZN.
5. Talipova L., Shonina E., Strelets K., Lapteva S. Reconstruction of the gray belt objects based on energy efficiency clusters // E3S Web of Conferences: 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018, St. Petersburg, 10-12 December 2018. Vol. 110. St. Petersburg: EDP Sciences, 2019. P. 01021. DOI 10.1051/e3sconf/201911001021. EDN YWTKYI.
6. Павлов М.В., Карпов Д.Ф., Гудков А.Г. Анализ результатов тепловизионного обследования гражданского здания общественного назначения // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. № 2(136). С. 35-39. EDN PLFDQH.
7. Карпов Д.Ф., Павлов М.В. Оценка теплозащитных свойств ограждающих конструкций строительных объектов по анализу термограмм // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021. Т. 48, № 2. С. 92-102. DOI 10.21822/2073-6185-2021-48-2-92-102. EDN TMTRBG.
8. Шакирова А., Терех М. Д. Использование аэрогеля в фасадных и светопрозрачных конструкциях // Неделя науки ИСИ: сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 04-10 апреля 2022. Том Часть 1. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ИРЕСС, 2022. С. 184-185. EDN BRYHQZ.
9. Зубарев К.П., Зобнина Ю.С. Анализ применения фазопереходных материалов для повышения энергосбережения зданий // Перспективы науки. 2022. № 10(157). С. 91-95. EDN VKPXUP.
10. Зубарев К.П., Зобнина Ю.С. Обзор энергосберегающих решений в странах с теплым климатом // Перспективы науки. 2022. № 7(154). С. 48-52. EDN QWICNU.
11. Gamayunova O., Gumerova E., Miloradova N. Smart glass as the method of improving the energy efficiency of high-rise buildings // E3S Web of Conferences, Samara, 04–08 сентября 2017. Vol. 33. Samara: EDP Sciences, 2018. P. 02046. DOI 10.1051/e3sconf/20183302046. EDN LYYGDB.

12. Вавилова А.М. Эффективность внедрения технологии "умный дом" при проектировании объекта // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. В 3 ч., Санкт-Петербург, 18–23 ноября 2019. Том Ч. 2. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019. С. 23-26. EDN YPMJWR.

13. 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. Vol. 33. Samara: EDP Sciences, 2018. P. 02045. DOI 10.1051/e3sconf/20183302045. EDN YUMGLC.

14. Gagarin V.G., Akhmetov V.K., Zubarev K.P. Mathematical Model Using Discrete-Continuous Approach for Moisture Transfer in Enclosing Construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vladivostok, 02-04 October 2018. Vol. 463, Part 2. Vladivostok: Institute of Physics Publishing, 2018. P. 022023. DOI 10.1088/1757-899X/463/2/022023. EDN LLWZOX.

15. 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.

16. 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.

17. Радаев А.Е., Гамаюнова О.С., Бардина Г.А. Использование средств оптимизационного моделирования для обоснования характеристик энергоэффективного конструктивного решения // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 27(79). С. 5-25. EDN EXVSFS.

18. Радаев А.Е., Гамаюнова О.С. Обоснование характеристик многослойной стеновой конструкции с использованием средств квадратичного программирования // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22(74). С. 111-127. DOI 10.37279/2413-1873-2021-22-111-127. EDN ORVFEG.

19. Radaev A.E., Gamayunova O.S., Bardina G.A. Optimization of energy efficiency design characteristics for construction projects // AlfaBuild. 2021. No. 5(20). P. 2003. DOI 10.57728/ALF.20.3. EDN RZOJPY.

20. Каримова А. А., Терех М. Д. Оптимизационная модель обоснования уровня тепловой защиты зданий // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 04–10 апреля 2022. Том Часть 2. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 391-393. EDN LLYIGL.

21. Терех М.Д., Демиденко А.К. Оптимизация уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий при различных критериях оптимальности // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25–26 сентября 2019. Санкт-Петербург: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2019. С. 164-168. EDN EZMPYA.

22. Гаевская З.А., Вафаева Х.М. Энергомоделирование в проектах реконструкции объектов культурного наследия // Наука молодых - будущее России: сборник научных статей 6-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 09–10 декабря 2021. Том 4. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 201-204. EDN NVWZOA.

ОБ АВТОРАХ

Иван Юрьевич Воронов – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: voronov.iyu@edu.spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Ivan Yu. Voronov – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: voronov.iyu@edu.spbstu.ru

УДК 693.98

МОДУЛЬНЫЕ ЗДАНИЯ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

В.В. Крыжановский

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

Аннотация. Модульные конструкции позволяют значительно сократить время строительства зданий, что позволяет сократить сроки окупаемости инвестиционно-строительных проектов, а также увеличить вариативность модификаций зданий и возможность быстрого изменения проекта строительства без особых рисков. Особая важность этой технологии обусловлена решением проблем обеспечения населения доступным и комфортным жильем по государственным программам; высокоскоростном строительстве и восстановлении домов, разрушенных в случае стихийных бедствий. В статье рассматривается важность применения блочных модулей в строительстве, включая организацию временных строительных городов. Были рассмотрены и проанализированы примеры модульных зданий в России и за рубежом, сформулированы основные преимущества и недостатки использования этой технологии. На основании теплотехнического расчета был подобран наилучший по критерию энергоэффективности теплоизоляционный материал для модульных конструкций. Сделан вывод о том, что наилучшим является PIR-утеплитель. Определены основные проблемы на пути более широкого использования модульного строительства в России, в частности, необходимость совершенствования нормативно-технической базы.

Ключевые слова: модульное строительство, модульные здания, модульная система, модуль-контейнеры, сборно-разборная конструкция, утеплители, теплоизоляционные материалы, PIR, пенополистирол, минеральная вата, стеновое ограждение, теплотехнический расчет, ограждающие конструкции.

Ссылка для цитирования: Крыжановский В.В. Модульные здания в современном строительстве // Инженерные исследования. 2023. №1 (11). С. 31-37. EDN: PQCATC

MODULAR BUILDINGS IN MODERN CONSTRUCTION

V.V. Kryzhanovsky

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

Abstract. Modular structures can significantly reduce the construction time of buildings, which reduces the payback period for investment and construction projects, as well as increase the variability of building modifications and the ability to quickly change the construction project without any special risks. The particular importance of this technology is due to the solution of the problems of providing the population with affordable and comfortable housing under government programs; high-speed construction and reconstruction of houses destroyed in the event of natural disasters. The article discusses the importance of using block modules in construction, including the organization of temporary construction cities. Examples of modular buildings in Russia and abroad were considered and analyzed, the main advantages and disadvantages of using this technology were formulated. Based on the heat engineering calculation, the best heat-insulating material for modular structures was selected in terms of energy efficiency. It is concluded that the PIR insulation is the best. The main problems on the way to the wider use of modular construction in Russia are identified, in particular, the need to improve the regulatory and technical base.

Keywords: modular construction, modular buildings, modular system, module-containers, prefabricated structure, insulation, heat-insulating materials, PIR, expanded polystyrene, mineral wool, wall fencing, thermotechnical calculation, enclosing structures.

For citation: Kryzhanovsky V.V. Modular buildings in modern construction// Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.1 (11). Pp. 31-37. EDN: PQCATC

ВВЕДЕНИЕ

Большое значение строительства зданий и сооружений из модульных конструкций различной заводской готовности приобрело в связи с большими преимуществами этих конструкций, которые позволяют заказать строительные системы различного функционального назначения в кратчайшие сроки.

Преимущества модульной конструкции описаны в публикациях [1-5], где отмечается высокая технологичность и безопасность строительных работ; экологичность работ за счет сокращения количества самих технологических процессов и сокращения строительных отходов; высокое качество работ; сокращение количества трудовых ресурсов на строительной площадке.

Помимо жилищного строительства, модульные конструкции активно используются в энергетической, нефтяной и газовой промышленности. Наиболее широко в России используются мобильные (временные) здания и сооружения с блок-контейнерами, которые имеют простую и быструю сборку стандартными инструментами, которые используются для строительства бытовых городков, вахтовых поселков, временных складов, контрольно-пропускных пунктов и так далее.

Большое количество научных публикаций посвящено использованию современных утеплителей для ограждающих конструкций модульных зданий [6-8]. Пронин В.Е. и Тимохин Д.К. с помощью теплотехнического расчета показали, что для условий Крайнего Севера наиболее эффективным по сравнению с минеральной (каменной) ватой и пенополистиролом является утеплитель на основе полиизоцианурата, также известный как PIR [3]. Абрамян С.Г. и Улановский И.А. предлагают использовать объемные блок-модули в качестве одного из перспективных вариантов энергоэффективной реконструкции [7].

Фирсова Т.Ф. и Хохлов А.В. дали оценку пожарной безопасности модульных зданий [9]. Вопросы повышения пожарной безопасности модульных зданий рассмотрены и в работах [10, 11].

Грановский А.В., Смирнов В.А., Федоров М.В., Сазонов А.С., Елутин А.М., Эр-очир А. представили результаты экспериментальных исследований по оценке сейсмостойкости модульных зданий при действии динамических нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия при землетрясениях [12]. Влияние параметров модульных зданий на коэффициенты динамичности при сейсмическом воздействии представлено в работе [13].

Ряд авторов предлагают использовать модульное строительство в качестве инженерных решений при развертывании военных баз и возведении военных городков [14, 15].

ТРАНСФОРМИРУЕМЫЕ ОБЪЕМНЫЕ БЛОК-МОДУЛИ

Концепция трансформации объемных блочных модулей (рис. 1) состоит в увеличении их полезной площади и улучшении эксплуатационных характеристик за счет трансформации в разные направления с помощью скользящих механизмов. Монтаж модульного здания состоит из следующих этапов: подъем крыши; разворачивание пола, боковых и торцевых стен; подъем фронтонов (при условно снятой крыше) и т.д. Все панели вводятся в эксплуатацию и собираются обратно с помощью отдельных блоков системы автоматического управления. Особое значение такие модули имеют в отдаленных и труднодоступных местах. Поэтому большое значение имеет разработка портативных блок-модулей, которые можно было бы доставлять на платформе или воздушным транспортом.



Рис. 1. Трансформируемый объемный блок-модуль¹
Fig. 1. Transformable volume block module

¹ Транспаки, блок-контейнеры сборно-разборные [электронный ресурс]. – URL: <https://tsk38.ru/modulnye-zdaniya/transpaki-blok-kontejnery> (Дата обращения 03.05.2022)

УНИФИЦИРОВАННЫЕ МОДУЛЬНЫЕ БЛОКИ

Унифицированные модульные блоки часто включают в себя элементы различной степени сложности, такие как железобетонные изделия (панельное строительство), дымоходы, фасадные панели, готовые к сборке металлоконструкции в комплекте с инженерными сетями и отделкой, мусоропроводы и т.д. Зарубежный опыт свидетельствует о более широком внедрении модульных конструкций в строительстве жилых и общественных зданий [16, 17]. Широко известно строительство небольших домов, особенно, в Японии и Америке. В Москве, в аэропорту Шереметьево, в 2009 г. был построен отель капсульного типа, где были созданы комфортные условия для временного отдыха пассажиров (рис. 2).



Рис. 2. Отель капсульного типа в Шереметьево²

Fig. 2. Capsule-type hotel in Sheremetyevo

Интересным примером использования модульной технологии является пятизвездочный отель в китайской провинции Хунань на берегу озера Дунтин (рис. 3). Его высота составляет 30 этажей, общая площадь - 17 тысяч квадратных метров. Этот отель был построен всего за 15 дней. В то же время для установки здания потребовалась очень небольшая группа строителей (200 человек) и только один башенный кран. Большая часть работ по прокладке коммуникаций была проделана на заводе. Во всех деталях были предусмотрены штифты и канавки для облегчения процесса сборки. В результате во время строительства здания строителям просто нужно было соединить части, которые были закончены и идеально подогнаны друг к другу, затем, после установки напольной плитки, поставить стены на место протянуть электросеть и другие коммуникации, и фундамент здания был готов. Технология отделки наружных стен была максимально упрощена. Также имелась сборная конструкция: на опорных колоннах располагались крепежные элементы для утепления, нагревательных конструкций и т. д. В данном случае модульные блоки представляют собой отдельные элементы каркаса, которые изготавливаются на заводе и полностью готовы к монтажу на строительной площадке.



a)



b)

Рис. 3. Отель T30 в провинции Хунань, Китай, BROAD Group: а - На этапе строительства; b – Готовой проект³

Fig. 3. T30 Hotel in Hunan Province, China, BROAD Group: a - Under construction; b – Finished project

² Капсульный отель в аэропорту Шереметьево [электронный ресурс]. – URL <https://www.svo.aero> (дата обращения: 03.05.2022)

³ Модульный пятизвёздочный отель T30 в Китае [электронный ресурс]. – URL: <https://inhabitat.com> (дата обращения: 03.05.2022)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЬ-КОНТЕЙНЕРОВ

В России с 2008 года также растет популярность модульных зданий. Российские проектировщики и производители быстровозводимых модульных зданий полагаются на ГОСТ 22853-86 "Мобильные (инвентарные) здания". Модульные здания в России - это универсальные быстровозводимые конструкции различного назначения. Модульные здания завоевали популярность среди строителей благодаря тому, что позволяют в короткие сроки оборудовать любой строительный объект временными жилыми и хозяйственными постройками по характеристикам, не уступающим капитальным сооружениям. Основой для производства модульных зданий являются стандартные модульные контейнеры, представляющие собой контейнеры стандартного размера с каркасом из металлических профилей и стенами из сэндвич-панелей с наполнением из минеральной ваты толщиной от 50 до 200 мм в зависимости от климатического региона сооружения (рис. 4).

Современные модульные здания в России используются в различных качествах: административные офисы, общежития, временное жилье на промышленных и строительных площадках, казармы, гостиницы, столовые, офисы, выставочные площади, спортивные раздевалки, торговые павильоны, кафе с панорамным видом, летние домики на дачных участках, мастерские, склады, медицинские учреждения, посты охраны, модули промышленного производства (телекоммуникации, распределительные щиты, релейные блоки, электрические подстанции, котельные, компрессорные, распределительные станции, автомойки, гаражи и т.д.). Модульные контейнеры могут использоваться для строительства быстровозводимых зданий высотой до 3 этажей, а также для сборки складных мобильных площадок и строительных штабов. Здания из них украшены навесами, фасадными рамами, второстепенными крышами, лестницами и другими архитектурными элементами. В настоящее время металлические модульные контейнеры представляют собой сложную конструкцию, использующую европейские ноу-хау, но с возможностью использования современных отечественных материалов в отделке при покупке базового модуля без отделки. Количество контейнерных модулей от отечественных производителей в России только растет.



Рис. 4. Пример модульных построек на базе контейнеров⁴
Fig. 4. Example of modular buildings based on containers

СОВРЕМЕННЫЕ УТЕПЛИТЕЛИ ДЛЯ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ МОДУЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

Чтобы подобрать подходящий наилучшим образом для модульного здания теплоизоляционный материал необходимо сделать теплотехнический расчет ограждающих конструкций. Все расчеты будут сделаны для природно-климатических условий г. Санкт-Петербурга.

По СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» градусо-сутки отопительного периода, °С · сут/год, определяют по формуле (1):

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

где $t_{от}$, $Z_{от}$ - средняя температура наружного воздуха, °С, и продолжительность, сут./год, отопительного периода, принимаемые по СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более 8 °С;

t_b – расчетная температура внутреннего воздуха здания, °С, 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 °С).

⁴ Пример модульных зданий на базе контейнеров [электронный ресурс]. – URL <https://www.metallstroy38.ru> (дата обращения 03.05.2022)

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

Определим требуемое сопротивление теплопередаче R_0^{TP} ограждающей конструкции в зависимости от градусо-суток района строительства по формуле (2):

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

где a и b – коэффициенты, значение которых следует принимать по данным таблицы 3 СП 50.13330.2012 для соответствующих групп зданий.

$$R_0^{\text{TP}} = 0,00035 \cdot 4537 + 1,4 = 2,99 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче $R_0^{\text{норм}}$ ограждающей конструкции определяем по формуле (3):

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

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

$$\text{Тогда: } R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{TP}} = 2,99 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

Теплотехнический расчет ограждающих стеновых конструкций будем проводить для модельного здания, представленного в работе [6], характеристики которого представлены в табл.1.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики ограждающей стеновой конструкции модульного здания
Table 1. Thermal characteristics of the enclosing wall structure of a modular building

Номер п/п	Материал	Толщина слоя (δ), м	Коэффициент теплопроводности (λ), Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)	Плотность (ρ), кг/ м^3
1	Алюминий	0,008	237	2700
2	Пароограничивающая мембрана	0,0001	0,30	110
3	Утеплитель	?	?	?
4	Фанера (лиственные породы деревьев)	0,01	0,15	750

Определим условное сопротивление теплопередаче $R_0^{\text{усл}}$, $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, ограждающей конструкции по формуле (4):

$$R_0^{\text{усл}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum R_s + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для условий холодного периода года, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, принимаемый по таблице 6. R_s – термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$, определяется по формуле (5):

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

где δ_s – толщина слоя, м; λ_s – теплопроводность материала слоя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, принимается по таблице 8, в зависимости от условия эксплуатации.

$$R_0^{\text{усл}} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,008}{237} + \frac{0,0001}{0,30} + \frac{0,01}{0,15} + \frac{1}{23} = 0,228 \left(\frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}} \right)$$

Таким образом, требование по тепловой защите здания не выполняется, т.к. $0,228 \leq 2,99$.

Чтобы подобрать теплоизоляционный материал, рассмотрим три вида утеплителя от компании «ТЕХНОНИКОЛЬ»: минеральную (каменную) вату, пенополистирол и пенополиизоцианурат (PIR).

На основании теплоизоляционного материала ТЕХНОНИКОЛЬ Штукатурный фасад ($\lambda = 0,037$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)) определим требуемую толщину утеплителя для обеспечения минимальных требований теплозащиты (6).

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

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

$$R_{\text{т. arg}} = R_0^{\text{норм}} - R_0^{\text{учт}} \quad (7)$$

Таким образом, требуемая толщина утеплителя ТЕХНОНИКОЛЬ Штукатурный фасад составляет:
 $\delta_{\text{ут}}^{\text{req}} = 0,037 \cdot (2,99 - 0,228) = 0,01 \text{ м}$

Таблица 2. Теплотехнические характеристики теплоизоляционных материалов
Table 2. Thermal characteristics of thermal insulation materials

Номер п/п	Теплоизоляционный материал (утеплитель)	Коэффициент теплопроводности (λ), Вт /($\text{м}^2 \text{ C}$)	Требуемая толщина утеплителя для обеспечения минимальных требований теплозащиты, м	Стоимость утеплителя, руб./ м^2
1	Минеральная (каменная) вата: Утеплитель ТЕХНОНИКОЛЬ Штукатурный фасад	0,037	0,010	647
2	Пенополистирол: Экструзионный пенополистирол ТЕХНОПЛЕКС	0,033	0,009	258
3	Пенополиизоцианурат (PIR): ТЕХНОНИКОЛЬ LOGICPIR Ф/Ф L	0,022	0,006	675

Таким образом, полученные расчетные данные и основные характеристики теплоизоляционных материалов в конструкции стенового ограждения для быстровозводимых модульных зданий показывают, что наиболее эффективным по критерию энергоэффективности является утепление стеновых ограждающих конструкций пенополиизоциануратом (PIR), который имеет наименьший коэффициент теплопроводности ($\lambda = 0,022 \text{ Вт /}(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$) и за счет того, что его по этой причине потребуются меньше, общие затраты на утепление будут невысокими.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая существующий российский и зарубежный опыт модульного строительства, можно выделить преимущества и недостатки использования данной технологии.

Основными преимуществами является снижение трудоемкости работ на строительной площадке за счет максимальной механизации всех работ в заводских условиях, снижение общей трудоемкости и затрат на рабочую силу, сокращение продолжительности строительства и, следовательно, более быстрая окупаемость инвестиционно-строительного проекта, снижение загрязнения окружающей среды и т.д.

Среди недостатков: сложность транспортировки модульных блоков, особенно в городских условиях, недостатки и пробелы в техническом регулировании, касающиеся производства модульных блоков в заводских условиях и строительства модульных зданий в целом и др.

Также на основании проведенного анализа научных публикаций в сфере модульного строительства позволяет сделать следующие выводы:

1. Модульное строительство может быть использовано в качестве базовой концепции строительной технологии при возведении малоэтажного и высотного жилого фонда, общественных зданий независимо от исходных параметров и заданных технических условий.

2. В целях оптимизации и минимизации необходимых ресурсов, соблюдения установленных сроков строительства (включая изготовление модулей) и, как следствие, срока окупаемости строительного проекта в целом, необходимо разработать методы поэтапного многомерного планирования строительного цикла строительства модульного здания.

3. Технология модульного строительства, особенно в России, может быть определена для федеральных строительных программ, которые включают строго определенные сроки реализации проектов.

4. Необходимо совершенствовать нормативно-техническую базу для проектирования и производства строительно-монтажных работ модульного строительства, для производства и контроля качества модульных блоков на производственных предприятиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курманова Е.Е., Таратута В.Д. Модульные здания: преимущества и недостатки // Вестник науки. 2020. Т. 3, № 6(27). С. 158-160. EDN VTHZBQ.
2. Боровская С.Г., Козинская Д.О. Проблемы и преимущества модульного строительства // Молодежный исследовательский потенциал 2023: Сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 23 февраля 2023. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2023. С. 374-379. EDN MASKKG.
3. Абрамян С.Г., Оганесян О.В., Галда З.Ю., Дикмеджян А. А. Преимущества, недостатки и перспективы применения объемных блок-модулей в строительстве: обзор зарубежной научной литературы // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса: сборник трудов Международной научно-практической конференции: в 2 ч., Волгоград, 01-02 декабря 2020. Том Часть 1. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. С. 138-142. EDN YDXMBP.
4. Аушева К.В., Петроченко М.В. Определение алгоритма оценки эффективности модульного строительства // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, 2022. С. 143-145. EDN AGTCGZ.
5. Шевцов С.В., Астафьева Н.С. Концепция модульного строительства на примере использования легких металлических конструкций // Инженерные исследования. 2022. № 3(8). С. 30-37. EDN BGGOMA.
6. Пронин В.Е., Тимохин Д.К. Современные утеплители для быстровозводимых модульных зданий в условиях крайнего севера // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2019. № 6(39). С. 317-322. EDN XXVKGR.
7. Абрамян С. Г., Улановский И. А. Модульное строительство и возможность применения модульных конструкций при надстройке зданий // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4(51). С. 238. EDN VEIPRB.
8. Кынева А. И., Никонова О. Г., Скворцова О. С. Проектирование модульного здания в условиях Крайнего Севера // Неделя науки СПбПУ: Материалы научной конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 19-24 ноября 2018. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. С. 186-188. EDN YTEIZF.
9. Фирсова Т.Ф., Хохлов А.В. Огнестойкость модульных зданий пожарных депо // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 3. С. 43-47. DOI 10.25257/FE.2019.3.43-47. EDN BRHMPU.
10. Гафарова К. Ю. Повышение пожарной безопасности модульных зданий // Современная школа России. Вопросы модернизации. 2021. № 2-1(35). С. 99-100. EDN VRKXGU.
11. Tachkov M.A., Shcherbatyuk P.A., Kirik E.S., Gravit M.V., Kotlyarskaya (Vasileva) I.L. Design solutions for residential multi-storey steel modular building // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. No. 3(101). P. 10102. DOI 10.4123/CUBS.101.2. EDN MPKKIB.
12. Грановский А.В., Смирнов В.А., Федоров М.В., Сазонов А.С., Елутин А.М., Эр-очир А. К оценке сейсмостойкости зданий, изготовленных по объемно-модульной технологии фирмы «КНАУФ» // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 34-39. DOI 10.33622/0869-7019.2020.02.34-39. EDN GHPONM.
13. Широков В. С. Коэффициент динамичности модульных зданий при сейсмическом воздействии // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 4. С. 23-33. DOI 10.37153/2618-9283-2022-4-23-33. EDN XTWSSW.
14. Олехнович Я. А., Шуршилилин Е. А. Энергоэффективные модульные сооружения при развертывании военных баз // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения: материалы всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 30 марта 2021. Санкт-Петербург: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2021. С. 103-107. EDN OLVWWI.
15. Гамаюнова О. С., Радаев А. Е. Энергоаудит и энергоэффективность модульных военных городков // Проблемы обеспечения функционирования и развития наземной инфраструктуры комплексов систем вооружения: Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 25-26 сентября 2019. Санкт-Петербург: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2019. С. 63-67. EDN DENVML.
16. Захарова М.В., Пономарев А.Б. Опыт строительства зданий и сооружений по модульной технологии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8, № 1. С. 148-155. DOI 10.15593/2224-9826/2017.1.13. EDN YLXSPN.
17. Захарова М.В., Пономарев А. Б. Опыт объемно-модульного строительства зданий и сооружений // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2017. Т. 2. С. 190-198. EDN XQHWRP.

ОБ АВТОРАХ

Владислав Витальевич Крыжановский – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: sqpaskal@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Vladislav V. Kryzhanovsky – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: sqpaskal@gmail.com

УДК 69.002.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТ ПО УСТРОЙСТВУ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

Н.Р. Таджиев

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

Аннотация. Одним из важнейших вопросов в строительстве является срок возведения зданий. Ускорить строительство зданий можно с помощью роботизированной техники. В статье описаны строительные роботы и манипуляторы зарубежного производства (SAM100, HADRIAN X, In-Situ Fabricator, FlyBrick, KUKA), а также приведено описание российского робота-каменщика "Виктория Brick" и мобильного роботизированного комплекса для автоматизации процесса кирпичной кладки, разработанного учеными из Брестского государственного технического университета (Республика Беларусь). На основании теплотехнического расчета была определена энергоэффективность каменной кладки, выполненной в два с половиной кирпича ручным способом на основе цементно-песчаного раствора и роботизированным способом с использованием клея Polynor Thermo Block российского производства. В условиях необходимости импортозамещения необходимо обратить внимание на отечественные разработки в сфере робототехники. Дальнейшие исследования предполагается дополнить оценкой долговечности рассмотренных видов кирпичной кладки (на цементно-песчаном растворе и клею для каменной кладки Polynor Thermo Block).

Ключевые слова: автоматизация, роботизация, роботизированная техника, робототехника, роботы-строители, роботы-каменщики, строительные роботы, кирпичная кладка, каменная кладка, мобильные роботизированные комплексы, SAM100, HADRIAN X, In-Situ Fabricator, FlyBrick, KUKA, энергоэффективность, теплотехнический расчет, ограждающие конструкции, Polynor Thermo Block.

Ссылка для цитирования: Таджиев Н.Р. Автоматизация работ по устройству каменной кладки // Инженерные исследования. 2023. №1 (11). С. 38-45. EDN: TWMVKR.

AUTOMATION OF WORK ON THE DEVICE OF MASONRY

N.R. Tadzhiyev

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

Abstract. One of the most important issues in construction is the term of construction of buildings. You can speed up the construction of buildings with the help of robotic technology. The article describes foreign-made construction robots and manipulators (SAM100, HADRIAN X, In-Situ Fabricator, FlyBrick, KUKA), as well as a description of the Russian robot mason "Victoria Brick" and a mobile robotic complex for automating the brickwork process, developed by scientists from Brest State Technical University (Republic of Belarus). Based on the heat engineering calculation, the energy efficiency of masonry, made in two and a half bricks manually based on a cement-sand mortar and robotically using Russian-made Polynor Thermo Block glue, was determined. In the context of the need for import substitution, it is necessary to pay attention to domestic developments in the field of work equipment. Further studies are supposed to be supplemented with an assessment of the durability of the considered types of brickwork (on cement-sand mortar and Polynor Thermo Block masonry adhesive).

Keywords: automation, robotics, robotic technology, robotics, construction robots, masonry robots, construction robots, brickwork, masonry, mobile robotic complexes, SAM100, HADRIAN X, In-Situ Fabricator, FlyBrick, KUKA, energy efficiency, thermal design, enclosing designs, Polynor Thermo Block.

For citation: Tadzhiyev N.R. Automation of work on the device of masonry // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.1 (11). Pp. 38-45. EDN: TWMVKR.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает потребность в малоэтажном строительстве промышленных и гражданских объектов. Такие объекты в многие корпуса выполнены из кирпичной или газобетонной кладки [1]. За рубежом объем такого строительства превышает объем строительства панельных зданий. Аналогичная тенденция ожидается и на территории Российской Федерации.

Одним из важнейших вопросов в строительстве является срок возведения зданий. Ускорить строительство зданий можно с помощью роботизированной техники, однако на данный момент очень мало исследований и разработок, связанных с внедрением роботов в строительную отрасль. Кроме того, исследования в основном проводятся в сфере проектирования роботов, а исследования с точки зрения гражданского строительства практически не ведутся [1].

Использование роботизированной техники имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными технологиями [2]:

- роботы позволяют минимизировать количество ошибок, обеспечивают точность установки;
- сокращают сроки возведения, гарантируют экологичность в процессе строительства.

Применению технологий автоматизации и роботизации в строительстве посвящен целый ряд работ [1-5]. Михеев Г.В. обосновал использование роботизированной техники в строительной отрасли и выявил показатели, препятствующие использованию автоматизации и роботизации в России [3]. Турчанинов Г.Е. и Волкова С.В. изучили вопрос необходимости использования современных BIM-технологий и робототехники на всех этапах возведения строительных объектов [2]. Хабиров Т.Т. рассмотрел перспективы развития роботизации строительства в России, проанализировал ее возможные последствия, среди которых - сокращение количества наемных рабочих, исчезновение некоторых видов профессий за счет их неактуальности [4]. Отдельная группа работ посвящена использованию робототехники в дорожном строительстве [6-8]. Зарубежный опыт разработок роботов для применения в строительстве представлен в статье [9, 10]. Артеменко М.Н., Корчагин П.А., Тетерина И.А. описали основные тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов [10].

СТРОИТЕЛЬНЫЕ РОБОТЫ ДЛЯ КЛАДКИ КИРПИЧА

На данный момент небольшое количество компаний занимается созданием специальных роботов, позволяющих автоматизировать работы по каменной кладке. Наиболее известные компании, разработавшие роботов-каменщиков - Fastbrick Robotics и Construction Robotics.

SAM100 (Construction Robotics, США)

Робот SAM100 (рис.1) стал первым автоматизированным роботом-каменщиком, доступным для коммерческого использования. Он работает совместно с обученными каменщиками. Один каменщик должен маневрировать роботом, загружать его кирпичами и раствором, а другой - скрывать стяжки, удалять излишки раствора и укладывать кирпичи в углах и других труднодоступных местах.

SAM100 оснащен множеством датчиков для измерения и отслеживания скорости, угла наклона, ориентации, температуры снаружи и в корпусе, влажности, времени работы, GPS, безопасности и многого другого. Кроме того, он также может измерять уровень просадки и качество раствора.

Через несколько лет после выпуска робота SAM100 австралийская компания Fastbrick Robotics выпустила автоматизированную машину для укладки кирпича под названием Hadrian X. Этот робот технологически усовершенствован и обладает рядом новых характеристик.

HADRIAN X (Fastbrick Robotics, Австралия)

Робот Hadrian X (рис.2) был запатентован в 2008 году, а первое здание было построено с его помощью в 2019 году [1]. На создание модели было собрано более \$36 млн. Проблема этого робота - в невозможности кладки кирпича с помощью стандартного раствора.

В Hadrian X вместо традиционного раствора используется промышленный клей, который увеличивает прочность конструкции в 4-5 раз. Это также повышает тепловую и акустическую эффективность здания на 70%. Использование клея сокращает время строительства, так как время схватывания значительно меньше по сравнению с цементным раствором.

Hadrian X управляет автоматической загрузкой, резкой, маршрутизацией и укладкой кирпича; он использует CAD для выполнения сквозной кладки. Он построен из стали, алюминия и композитных материалов из углеродного волокна. Hadrian X управляется сетью компьютеров, камерами технического зрения, серводвигателями и лазерным трекером, который контролирует положение укладки.

Hadrian X способен возвести дом всего за 48 часов, укладывая по 1000 кирпичей в час. Строительство ведется по чертежам в 3D CAD, загруженным в его операционную систему. До начала работы робот анализирует данные проекта, определяя положение каждого кирпича. После того, как чертеж ему будет

полностью «понятен», Hadrian X приступает к работе. Он способен при необходимости нарезать кирпичи, используя для этого специальный захват с резаком. В процессе кладки робот оставляет промежутки определенного размера, необходимые для монтажа бетонных и деревянных конструкций, труб и электропроводки.



Рис. 1. Робот-каменщик SAM100¹
Fig.1. Mason robot SAM100



Рис. 2. Укладка каменных блоков роботом HADRIAN X²
Fig. 2. Stone block laying with the HADRIAN X robot

Сам робот в ходе работ остается неподвижным – двигается только его многометровый манипулятор, который одновременно играет роль конвейера для подачи кирпичей. Клеевой раствор изготавливается в центральной части робота и подается под давлением к узлу манипулятора, в котором смесь наносится на кирпичи.

In-Situ Fabricator (ETH Zurich, Швейцария)

Робот In-Situ Fabricator (рис.3) имеет сравнительно небольшую массу и оснащен двумя компьютерами, один из которых отвечает за движения механической «руки»-манипулятора, а другой - за ориентирование.



Рис. 3. Робот-каменщик In-Situ Fabricator³
Fig.3. Mason Robot In-Situ Fabricator

¹ Робот-каменщик: как это работает [электронный ресурс]. - URL: <https://t-magazine.ru/pages/sam100/> (дата обращения: 13.02.2023)

² Робот - строитель Hadrian X построил здание всего за 3 рабочие смены [электронный ресурс]. - URL: <https://building-tech.org/> (дата обращения: 13.02.2023)

³ Роботы-каменщики: автоматизация процесса кирпичной кладки [электронный ресурс]. - URL: <https://os1.ru/event/9411-roboty-kamenshchiki-avtomatizatsiya-protssesa-kirpichnoy-kladki> (дата обращения: 13.03.2023)

Манипулятор оборудован лазерным дальномером. При перемещении манипулятора дальномер сканирует пространство вокруг робота и строит трехмерную схему окружающего пространства. Также в бортовую систему управления загружена цифровая модель постройки. Благодаря этим данным робот постоянно определяет свое положение в изменяющейся обстановке и ориентируется при выполнении строительных операций, что создает возможности для его автономной работы, которую он выполняет с точностью до миллиметра. Еще одним преимуществом In-Situ Fabricator является способность самостоятельно перемещаться по строительной площадке без помощи человека. Робот оснащен датчиками и камерами, которые позволяют ему не наткнуться на препятствия и людей во время движения.

Главным его достоинством, как считают разработчики, является способность адаптироваться и решать задачи при внезапных нестандартных изменениях обстановки на строительном объекте. Они считают, что это одна из первых машин, которая способна возводить нестандартные постройки, то есть проект которых может изменяться и адаптироваться к окружающим условиям непосредственно в процессе строительства. Исследователи продолжают работу по совершенствованию In-Situ Fabricator, т.к. по словам разработчиков действия робота пока «примитивны», он как бы «работает вслепую». Робот пока еще неуверенно и медленно ориентируется в обстановке после совершения каждого действия, чтобы полноценно выполнять работу с необходимой точностью, в будущем он должен ориентироваться с большой скоростью и прямо в процессе движения.

FlyBrick® fasad (ООО «Фасадные роботы и перцептроны», Россия)

В 2019 произведен действующий прототип робота FlyBrick (рис.4), в 2020 году доработка прототипа и опытная облицовка на объекте в Москве 5000 м², в 2021 году запуск продаж и аренды, продолжение подрядов.

Действующая модель FlyBrick предназначена для автономной работы по выполнению простых, цветных и рельефных видов облицовочной кладки стен зданий. Кладка выполняется на цементную клей-пену. Для автономной работы FlyBrick использует техническое зрение, манипулятор для перекладки кирпича со стандартных заводских поддонов на площадку высотного грузового подъемника, сам робот-укладчик, устройство для нанесения цементной клей-пены, и автомат для укладки армирующей сетки. Мачты подъемника крепятся к колоннам каркаса здания или опорам.

Преимущества перед аналогами:

- 1) Меньший вес, полный цикл, высотные здания, встроенность в технологически, цепочку поставок материала и его переработки.
- 2) Фигурная декоративная кладка. Система технического зрения, использование системы искусственного интеллекта для распознавания и корректировки кладки.
- 3) Приемлемая для строительных организаций стоимость аренды и покупки устройства, окупаемость и выгода применения

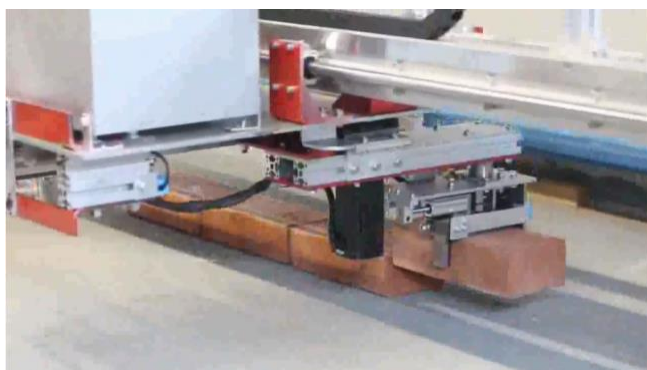


Рис. 4. Робот FlyBrick⁴
Fig. 4. FlyBrick Robot



Рис.5. Выполнение работ по кирпичной кладке роботом KUKA⁵
Fig. 5. Bricklaying with a KUKA robot

⁴ Робот-каменщик Flybrick [электронный ресурс]. - URL: <https://ru.startup.network/projects/406847.html> (дата обращения: 13.02.2023)

⁵ Строительный робот KUKA для укладки кирпичных блоков [электронный ресурс]. - URL: <https://www.youtube.com/watch?v=69ZzgCmboh8> (дата обращения: 13.02.2023)

Робот KUKA KR 10 (KUKA, Германия)

Разделение промышленных роботов по категориям у KUKA достаточно условное, модели из разных классов могут с одинаковым успехом использоваться для выполнения одной и той же задачи.

При выборе марки строительного робота-каменщика нужно учитывать следующие критерии: производитель, стоимость робот, скорость выполнения работ, функциональность, радиус досягаемости стрелы и т.д. В рамках исследования мы сравним характеристики и функциональность следующих марок строительных роботов-каменщиков: SAM100, Hadrian X, In-Situ Fabricator, Flybrick, KUKA KR 10.

Есть еще две разработки, которые могут с успехом стать успешными аналогами зарубежных роботов-каменщиков в условиях импортозамещения.

Виктория Vrick (Екатеринбург, Россия)

В 2020 году стартап из Екатеринбурга «Виктория BRICK» представил робота-каменщика (рис.6), который уже используется на стройках ГК «Виктория» в Екатеринбурге. За основу РТК взят промышленный манипулятор зарубежного производства. Захват идет с помощью вакуумного насоса, также в комплекте есть дозатор для строительного раствора.

Робот-каменщик из БрГТУ (Брест, Белоруссия)

В 2021 году ученые Брестского государственного технического университета представили опытный образец мобильного роботизированного комплекса для автоматизации процесса кирпичной кладки (рис.7).

Разработчикам удалось соединить грузовую тележку с коллаборативным роботом-манипулятором и обучить (запрограммировать) комплекс для выкладывания фрагмента кирпичной кладки в ½ кирпича с имитацией нанесения растворного шва при помощи дозатора раствора.

Комплекс предназначен для автоматизации процесса кладки, снижения трудозатрат, повышения качества каменных работ. Комплекс оснащен встроенным техническим зрением, глубоко интегрированным в программное и аппаратное обеспечение, что позволяет обучать комплекс для реализации различных задач.

В настоящий момент ведутся работы по проектированию и конструированию дозатора раствора и подбора необходимых составов растворных смесей.



Рис.6. Робот-каменщик «Виктория BRICK»⁶
Fig. 6. Robot mason "Victoria BRICK"



Рис.7. Робот-каменщик из БрГТУ⁷
Fig. 7. Robot mason from BrGTU

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ КАМЕННОЙ КЛАДКИ, ВЫПОЛНЕННОЙ РОБОТИЗИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

Нормируемое значение приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей стеновой конструкции для природно-климатических условий г. Санкт-Петербурга составляет:

$$R_0^{\text{норм}} = R_0^{\text{тр}} = 2,99 (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) / \text{Вт} .$$

⁶ В Екатеринбурге представили стартап, заменяющий мигрантов на стройках [электронный ресурс]. - URL: https://eanews.ru/news/v-yekaterinburge-predstavili-startap-zamenyayushchiy-migrantov-na-stroykakh_20-10-2020 (дата обращения: 13.02.2023)

⁷ Робот-каменщик из БрГТУ [электронный ресурс]. - URL: <https://news.bstu.by/2021/03/28/робот-каменщик-из-бргту> (дата обращения: 13.02.2023)

Для определения энергоэффективности каменной кладки, выполненной в два с половиной кирпича (табл. 1) роботизированным способом, вместо цементно-песчаного раствора будет использоваться клей Polynor Thermo Block (Россия) со следующими характеристиками⁸:

- Основа: полиуретановый преполимер;
- Время отверждения (при +22°C) – 35 минут;
- Время полного отверждения – 12 часов;
- Термостойкость: от -60°C до +100°C;
- Цена: 690 рублей за 1 шт.;
- Объем одного баллончика: 850 мл;
- Коэффициент теплопроводности: $\lambda = 0,035$ Вт/(м·К).

Рекомендуемая толщина нанесения клея Polynor Thermo Block - от 3 до 10 мм⁹. Для дальнейших расчетов в качестве допущения примем толщину слоя в 7 мм.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики ограждающей стеновой конструкции
Table 1. Thermal characteristics of the enclosing wall structure

Номер п/п	Материал	Толщина на слой (δ), м	Коэффициент теплопроводности (λ), Вт/(м ² ·°C)	Плотность (ρ), кг/м
1	Кирпич лицевой пустотелый тёмно-коричневый, поверхность гладкая	0,62	0,31	1400
2	Клей для кладки Polynor Thermo Block	0,014	0,35	2000

Определим условное сопротивление теплопередаче $R_0^{усл}$ ограждающей конструкции по формуле (1):

$$R_0^{усл} = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum R_s + \frac{1}{\alpha_{н}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м²·°C), принимаемый по СП 50.13330.2012;

$\alpha_{н}$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для условий холодного периода года, Вт/(м²·°C), принимаемый по СП 50.13330.2012;

R_s – термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, (м²·°C)/Вт, определяется по формуле (2):

$$R_s = \frac{\delta_s}{\lambda_s}, \quad (2)$$

где δ_s – толщина слоя, м;

λ_s – теплопроводность материала слоя, Вт/(м²·°C), принимается в зависимости от условия эксплуатации.

$$R_0^{усл} = \frac{1}{8,7} + \frac{0,62}{0,31} + \frac{0,014}{0,35} + \frac{1}{23} = 0,115 + 2 + 0,04 + 0,0435 = 2,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$$

Аналогичные расчеты были выполнены для ручного и роботизированного способа производства работ для трех видов кладки, представленных на рис.8. Все результаты сведены в табл. 2.

⁸ Клей Polynor Fixo Pro [электронный ресурс]. - URL: https://www.polynor.ru/ru/products/fixo_pro (дата обращения: 13.03.2023)

⁹ Клей для блоков и кирпича Стимул К-63 [электронный ресурс]. - URL: <https://krasnodar.leroymerlin.ru/product/kley-dlya-blokov-i-kirpicha-stimul-k-63-13219925/> (дата обращения: 13.03.2023)

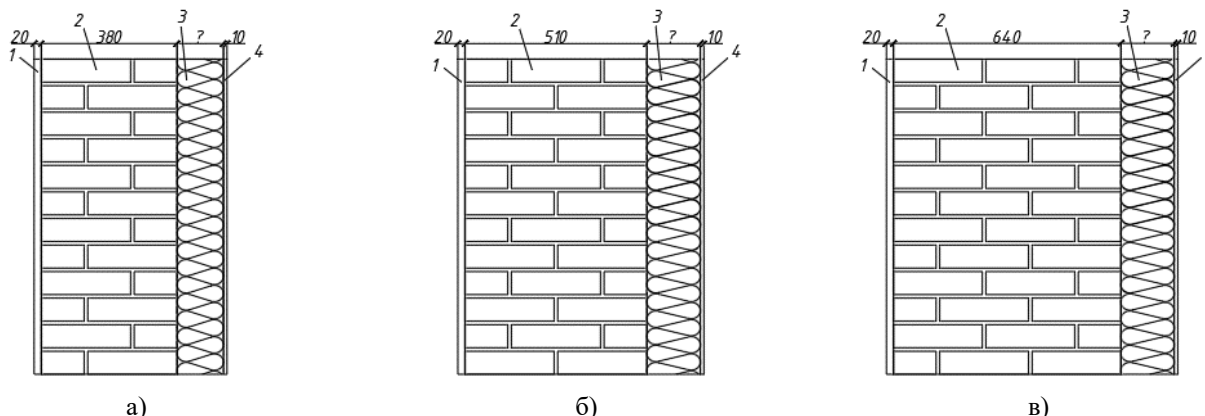


Рис.8. Виды кирпичной кладки: а - в полтора кирпича, б - в два кирпича, в - в два с половиной кирпича;

1 - внутренний слой штукатурки, 2 - кирпичная кладка, 3 - утеплитель, 4 - наружный защитно-декоративный слой штукатурки

Fig. 8. Types of brickwork: a - one and a half bricks, б - two bricks, в - two and a half bricks;

1 - inner layer of plaster, 2 - brickwork, 3 - insulation, 4 - outer protective and decorative layer of plaster

Таблица 2. Условное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций из кирпичной кладки на цементно-песчаном растворе и клее Polynor Thermo Block

Table 2. Conditional resistance to heat transfer of enclosing structures made of brickwork on cement-sand mortar and Polynor Thermo Block glue

Вид кладки	Толщина кладки (только кирпич), м	Кол-во слоев раствора/клея	Материал	Толщина, м	$R_0^{усл}$
Кладка в полтора кирпича (1,5) – 380мм (250+10+120мм)	0,37	1	Раствор	0,001	1,35
			Клей Polynor Thermo Block	0,003	1,36
				0,004	1,36
				0,005	1,37
				0,006	1,37
				0,007	1,37
				0,008	1,37
				0,009	1,38
0,010	1,38				
Кладка в два кирпича – 510 мм (250+10+250мм)	0,5	1	Раствор	0,001	1,77
			Клей Polynor Thermo Block	0,003	1,78
				0,004	1,78
				0,005	1,79
				0,006	1,79
				0,007	1,79
				0,008	1,79
				0,009	1,80
0,010	1,80				
Кладка в два с половиной кирпича (2,5) – 640 мм (250+10+250+10+120мм)	0,62	2	Раствор	0,001	2,16
			Клей Polynor Thermo Block	0,003	2,18
				0,004	2,18
				0,005	2,19
				0,006	2,19
				0,007	2,20
				0,008	2,20
				0,009	2,21
0,010	2,22				

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам анализа роботизации процесса каменной (кирпичной) кладки, можно сделать следующие выводы:

1. Наименьшее значение условного сопротивления теплопередаче ограждающих стеновых конструкций имеют конструкции из кирпичной кладки на цементно-песчаном растворе (1,35-2,16 (м²·°C/Вт).

2. Стеновые конструкции из кирпичной кладки на клеевой основе (клей Polynor Thermo Block) показали лучший результат по теплотехническим характеристикам. В зависимости от толщины клеевой основы (3-10 мм) условное сопротивление теплопередаче оказалось выше на 1,5-2,6%.

3. Выбор строительного рóбота-каменщика определяется по нескольким критериям: технико-экономические показатели, скорость и качество работ, функционал рóбота, стоимость работ и т.д.

4. В условиях необходимости импортозамещения необходимо обратить внимание на отечественные разработки в сфере робототехники, такие, например, как «Виктория Brick» (Екатеринбург, Россия).

Дальнейшие исследования предполагается дополнить оценкой долговечности рассмотренных видов кирпичной кладки (на цементно-песчаном растворе и клее Polynor Thermo Block).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grigorian E. A., Surovenko V. B., Semenova M. D., Kormalova K. D. Automated masonry method with evaluation of its productivity and quality characteristics // Construction of Unique Buildings and Structures. 2019. No. 3(78). P. 7-22. DOI 10.18720/CUBS.78.1. EDN OGAQSO.

2. Турчанинов Г.Е., Волкова С.В. Цифровые инновационные технологии и роботизация в строительстве // Университетская наука. 2022. № 2(14). С. 200-202. EDN NUVOEH.

3. Михеев Г.В. Применение технологий автоматизации и роботизации в строительстве // Высокие технологии в строительном комплексе. 2022. № 1. С. 209-214. EDN QHJAMQ.

4. Хабиров Т.Т. Переход от ручного труда к роботизации в строительстве // Аллея науки. 2017. Т. 2, № -9. С. 645-649. EDN YULBZN.

5. Лаборов В.А., Гамаюнова О.С. Робототехника и BIM-технологии в строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 5(5). С. 15-22. EDN FDKMVM.

6. Ерохин Я.С., Габдуллин Т.Р. Робототехника в дорожном строительстве // Техника и технология транспорта. 2019. № 2(12). С. 8. EDN LFTTYF.

7. Андреев Н.Ю., Горобец В.В., Османов Э.И., Пиндур С.В. Манипуляторы в дорожном строительстве // Вестник магистратуры. 2019. № 6-2(93). С. 90-93. EDN PFVYUJ.

8. Артеменко М.Н. Совершенствование роботизированных дорожных строительных машин // Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных, Омск, 10-11 февраля 2022. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2022. С. 44-49. EDN TVTVZX.

9. Столярова Т.А., Ломиногин А.С., Туковская Л.А., Коротаев В.С. Зарубежный опыт разработок роботов для применения в строительстве // Строительство и недвижимость. 2020. № 2(6). С. 35-40. EDN LNSPFE.

10. Артеменко М.Н., Корчагин П.А., Тетерина И.А. Тенденции развития мобильных беспилотных роботизированных комплексов. опыт отечественных и зарубежных производителей // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 16, № 4(68). С. 416-430. EDN SQKEDM.

ОБ АВТОРАХ

Нурислом Рустамович Таджиев – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: tadzhiev.nr@edu.spbstu.ru

ABOUT THE AUTHORS

Nurislom R. Tadzhiev – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: tadzhiev.nr@edu.spbstu.ru