

№2 (7)  
**2022**

# Инженерные --- ИССЛЕДОВАНИЯ

ISSN 2782-5582

## СОДЕРЖАНИЕ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО УСИЛЕНИЮ ГРУНТОВ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИЕЙ <b>С.С. Зимин, М.В. Мартынов</b> .....	3-10
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ <b>Е.Ю. Чакин, О.С. Гамаюнова</b> .....	11-21
АНАЛИЗ РАСТЯГИВАЮЩИХ УСИЛИЙ ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА СОЕДИНЕНИЯ АРМАТУРЫ <b>Х. Гёркен Ашык</b> .....	22-27
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МОНОЛИТНОГО КАРКАСА ЗДАНИЯ С СИСТЕМОЙ «DIAGRID» <b>С.В. Ли, О.С. Гамаюнова</b> .....	28-41
УНИКАЛЬНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОУРОВНЕВЫХ ПАРКОВОК <b>А.Ю. Билоус</b> .....	42-50

## CONTENTS

NUMERICAL SIMULATION OF A FIELD EXPERIMENT ON STRENGTHENING SOILS BY JET CEMENTATION <b>S.S. Zimin, M.V. Martynov</b> .....	3-10
THE USE OF BIM TECHNOLOGIES FOR THE SELECTION OF ENERGY-EFFICIENT THERMAL INSULATION MATERIALS <b>E.Yu. Chakin, O.S. Gamayunova</b> .....	11-21
ANALYSIS OF TENSILE FORCES ON INNOVATIVE REINFORCEMENT JOINING METHOD <b>H. Gorken Asik</b> .....	22-27
STRESS-STRAIN STATE OF A MONOLITHIC BUILDING FRAME WITH THE «DIAGRID» SYSTEM <b>S.V. Li, O.S. Gamayunova</b> .....	28-41
UNIQUENESS OF THE CONSTRUCTION OF MULTILEVEL PARKING PARKS <b>A.Y. Bilous</b> .....	42-50

УДК 624.159

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО УСИЛЕНИЮ ГРУНТОВ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИЕЙ

С.С. Зимин<sup>1</sup>, М.В. Мартынов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

**Аннотация.** В данной статье рассматривается моделирование в программно-вычислительном комплексе Plaxis 3D серии полевых испытаний по усилению грунтового массива струйной цементацией. Данная технология характерна для усиления слабых грунтовых оснований зданий (в условиях плотной застройки) и линейных сооружений (дамбы, плотины и т.п.). В рамках полевых испытаний проводилось исследование грунтоцементной одиночной сваи, а также куста свай 1\*2 и 2\*2 на нагрузку и фиксация осадки на каждой фазе загрузки. Грунты на площадке испытаний (100 м от р. Евфрат в г. Аль-Насирия) представлены легкими суглинками и глинами с секущим модулем деформации от 0,89 до 10 МПа. Для усиливаемых слоев даны компрессионные испытания. В статье представлена методика численного исследования (от вводимых характеристик до последовательности выполнения расчета) и результаты сравнения осадок в рамках поэтапной нагрузки и разгрузки грунтоцементного элемента (натурные данные). Также дано описание трех способов задания грунтоцементных элементов в ППК Plaxis 3D. Возможность предварительной оценки осадки зданий и сооружений продемонстрирована в рамках сравнения результатов численного и полевого эксперимента. Приведена методика калибровки параметров расчета.

**Ключевые слова:** проблемы грунтовых оснований и фундаментов, укрепление грунта, струйная цементация, осадки грунтового основания, объемные конечные элементы, трехмерная модель.

**Ссылка для цитирования:** Зимин С.С., Мартынов М.В. Численное моделирование полевого эксперимента по усилению грунтов струйной цементацией // Инженерные исследования. 2022. №2 (7). С. 3-10. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/3-10.pdf>

## NUMERICAL SIMULATION OF A FIELD EXPERIMENT ON STRENGTHENING SOILS BY JET CEMENTATION

S.S. Zimin<sup>1</sup>, M.V. Martynov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

**Abstract.** This article discusses modeling in the Plaxis 3D software package complex of a series of field tests to strengthen the soil mass by jet cementation. This technology is characteristic for strengthening weak soil foundations of buildings (in conditions of dense development) and linear structures (dams, weir, etc.). As part of field tests, a single pile of soil cement, as well as a pile bush 1 \*2 and 2\*2 for loading and fixing precipitation at each loading phase was studied. Soils at the test site (100 m from the Euphrates River in Al-Nasiriyah) are represented by light loams and clays with a secant modulus of deformation from 0.89 to 10 MPa. Compression tests are given for the reinforced layers. The article presents the methodology of numerical research (from the input characteristics to the sequence of calculation) and the results of comparing sediments within the framework of phased loading and unloading of a soil-cement element (full-scale data). There is also a description of three ways of setting soil-cement elements in software package complex Plaxis 3D. The possibility of a preliminary assessment of the precipitation of buildings and structures is demonstrated by comparing the results of a numerical and field experiment. A technique for measuring the parameters of the calculation is given.

**Keywords:** Problems of soil bases and foundations; strengthening of soil; «jet grouting»; settlements of soil base; volumetric finite elements; three-dimensional model.

**For citation:** Zimin S.S., Martynov M.V. Numerical simulation of a field experiment on strengthening soils by jet cementation // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.2 (7). Pp. 3-10. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/3-10.pdf>

## ВВЕДЕНИЕ

При залегании слабых грунтов в основании, существует проблема усиления оснований на всех стадиях реализации объекта (проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкции). Слабыми грунтами являются, в частности, заторфованные, водонасыщенные, илистые текучепластичные и текучие супеси и суглинки, а также рыхлые и мелкодисперсные пески. Повреждение конструкций и превышение нормативных осадков, возможно ввиду сильной сжимаемости этих грунтов. Стоит также отметить, что стабилизация осадков в слабых основаниях протекает достаточно длительно, порой достигая 10 лет. Изначально исследованием таких мелкодисперсных грунтовых структур и коллоидных глин занимались специализированные институты [1]. Впоследствии подключились и специалисты инженерной отрасли [2-3]. Прорывом в плане усиления грунтового массива стало появление технологии высоконапорной струйной цементации («jet grouting»), представленной коллективом ученых из Японии на 8-ой международной конференции «Механика грунтов и фундаментостроение», прошедшей в 1973 г. в Москве [4]. Метод струйного цементирования основан на высокоскоростном впрыске одной или нескольких жидкостей (раствора, воздуха, воды) в грунт в рамках обратного хода после бурения скважины до проектной отметки. При инъектировании происходят следующие процессы: дезагрегации грунта и его смешивание с цементирующим раствором и частичная замена им [5-7]. Современные исследования по методу струйной цементации в литературе можно разделить на 4 темы [8]:

1. Контроль качества. Исследование ключевых параметров (процентное отношение цемента, давление впрыска, скорость подъема и т.д.) влияющих на производство грунтоцементных колонн. Произведены испытание на неограниченное сжатие, а также определена несущая способность колонны под действием внешней загрузки [9-10].

2. Подбор оптимальных параметров, влияющих на несущую способность. Изменение прочности на одноосное сжатие в зависимости от характеристик грунта, влияние в/ц отношения, получение проектных значение модуля Юнга колонны в зависимости от н.у. [11-12].

3. Рассмотрение грунтоцементных элементов в качестве подпорных стен. Определение изгибающих моментов, боковых смещений [13-14].

4. Численное моделирование. Сравнение теоретических, полуэмпирических методов с моделированием в геотехнических программных комплексах, подбор грунтовой модели отвечающей упрочнению грунта [15-16].

Ввиду недостаточного раскрытия темы №4 касательно сравнения экспериментальных данных и результатов численного моделирования осадков конструкции, существует необходимость проведения верификационного расчета в специализированном геотехническом комплексе.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных данных была выбрана серия полевых испытаний, проведенных коллективом ученых из Ирана [17-18]. В качестве программного комплекса был выбран лицензируемый и широко используемый на территории Российской Федерации – Plaxis 3D [19].

Грунтовые условия площадки испытаний представлены в (табл. 1-4). Основные характеристики грунтоцементных колонн приведены в (табл. 5) [17].

Таблица 1. Свойства грунта  
Table 1. Soil Properties

Глубина (м)	Тип образца	L.L % Граница текучести ( $w_L$ )	P.L % Граница текучести ( $w_p$ )	P.I% Число пластичности	Gs ( $\gamma_s/\gamma_w$ )	Содержание воды, %
0.0-1.0	DS (нарушенный)	32	15	17	2,61	34,73
1.0-2.5	US (ненарушенный)	34	19	15	2,62	35,26
2.5-3.5	US (ненарушенный)	60	29	31	2,78	37,95
3.5-4.5	US (ненарушенный)	59	30	29	2,76	38,22
4.5-7.5	US (ненарушенный)	35	21	14	2,58	33,71
7.5-8.0	DS (нарушенный)	36	21	15	2,61	34,78

Таблица 2. Описание и классификация грунтов  
 Table 2. Soil description and classification

Глубина (м)	Глубина залегания УГВ (м)	Плотность естественной влажности $\gamma_{wet}$ , кН/м <sup>3</sup>	Глинистые частицы %	Ил %	USCS Единая Система Классификации грунтов
0.0-1.0	0,75	-	-	-	Засыпка (Суглинок легкий)
1.0-2.5		20,48	61	39	Суглинок легкий
2.5-3.5		21,02	70	30	Глина легкая
3.5-4.5		21,98	72	28	Глина легкая
4.5-7.5		21,5	60	40	Суглинок легкий
7.5-8.0		21,4	62	38	Суглинок легкий

Таблица 3. Краткое изложение результатов теста на консолидацию  
 Table 3. Summary of consolidation test results

Глубина (м)	$P_c$ (кПа)	$C_c$	$C_r$	$C_v$ (мм <sup>2</sup> /сек)	$e_0$	$e_f$
0.0-2.0	70	0,529	0,0598	0,02	0,63	0,475

Таблица 4. Зависимость неограниченной прочности на сжатие от глубины залегания  
 Table 4. Dependence of unlimited compressive strength on the depth of occurrence

Глубина (м)	$q_{unconfined}$ (кПа)
1.0-1.5	60
1.5-2.5	73
2.5-3.5	42
3.5-4.5	76
4.5-5.5	86
5.5-7.5	87
7.5-8.0	100

Таблица 5. Параметры грунтоцементной колонны  
 Table 5. Parameters of the soil-cement column

Диаметр (м)	Длина (м)	$q_{unconfined}$ (МПа)	$E$ (МПа)	$C$ (кПа)	$\phi$ (град)
0,150	2,0	4,57	800	680	38

Для численного исследования в ПВК Plaxis 3D использовалась модель упрочняющегося грунта («Hardening soil model») наиболее полно отражающая работу грунтовых оснований при усилении по технологии «jet grouting». Сваи моделировались с помощью конструктивного элемента «Embedded beams». Данный элемент учитывает форму сваи (полное сечение, без полостей), сопротивления по боковой поверхности и сопротивление под нижним концом сваи. Передача нагрузки на грунтоцементный элемент выполнена через моделирование жестких балок высотой 0,5 м из бетона В25. Расстояние между осями свай в кусте составляет  $3d = 450$  мм. Размеры модели в плане приняты 12\*12 м. В связи с выбором модели упрочняющегося грунта появилась необходимость в дополнительном использовании эмпирических зависимостей [20] для получения не представленных авторами полевых испытаний сведений [17-18]. Дополнительные данные, вводимые в ПВК Plaxis 3D приведены в (табл. 6).

Последовательность расчета в ПВК Plaxis 3D сведена в (табл. 7). Стоит отметить, что в фазах 4-5 после каждого этапа нагрузки/разгрузки вводилась подфаза консолидации под внешней силой. Эта подфаза с зависимостью от времени необходима для рассеивания избыточного порового давления в рамках расчета и отражает реальную поэтапность загрузки полевого эксперимента.

Модель грунтового основания приведена на (рис.1). Расположение стержневых элементов для трех конструктивных схем представлено на (рис.2-4).

Таблица 6. Дополнительные данные  
 Table 6. Additional data

Глубина (м)	e	C (кПа)	φ (град)	E <sub>50</sub> (МПа)
0.0-1.0	0,63	30	5	0,89*( по рез-там компрессионного теста)
1.0-2.5	0,53	34,34	7	6,87
2.5-3.5	0,67	21	6	4,2
3.5-4.5	0,5	38	7	7,6
4.5-7.5	0,51	43,34	8	8,67
7.5-8.0	0,51	50	9	10

Таблица 7. Последовательность расчета  
 Table 7. Calculation sequence

№ фазы	Фаза расчета ( <i>Phase ID</i> )	Тип расчета ( <i>Calculation type</i> )	Режим приложения нагрузок ( <i>Loading type</i> )
1	Период до начала строительства – <i>Initial phase</i> (начальная фаза)	<i>K0 procedure</i> (генерирование н.у.)	<i>Staged construction</i> (поэтапное строительство)
2	Погружение сваи/свай	<i>Plastic</i> (пластический)	<i>Staged construction</i> (поэтапное строительство)
3	Консолидация грунтового массива	<i>Consolidation</i> (Консолидация)	<i>Staged construction</i> (поэтапное строительство)
4	Поэтапное нагружение с шагом: 3,75 кН (одиночная свая) До нагрузки 30кН включительно	<i>Plastic (пластический)</i>	<i>Staged construction (поэтапное строительство)</i>
	6 кН (группа свай 1*2) До нагрузки 60кН включительно		
	7,5 кН (группа свай 2*2) До нагрузки 120кН включительно		
	Поэтапное разгружение: С шагом 7,5 кН (одиночная свая) До полной разгрузки		
5	До 36 кН, до 12 кН, затем полное разгружение (группа свай 1*2)	<i>Plastic (пластический)</i>	<i>Staged construction (поэтапное строительство)</i>
	До 97,5 кН, до 75 кН, до 45 кН, затем полное разгружение (группа свай 2*2)		

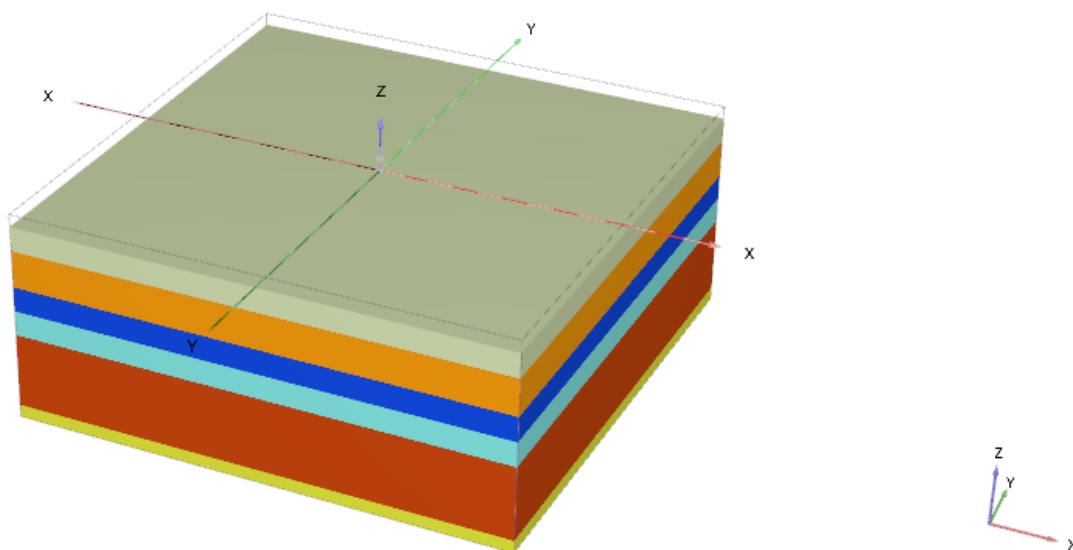
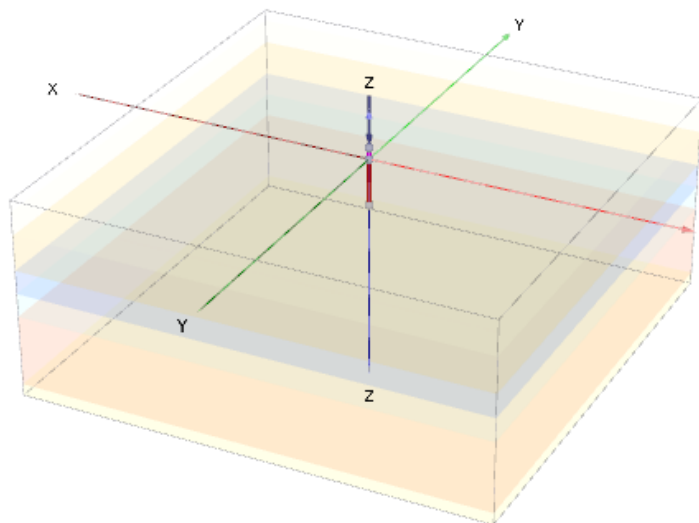
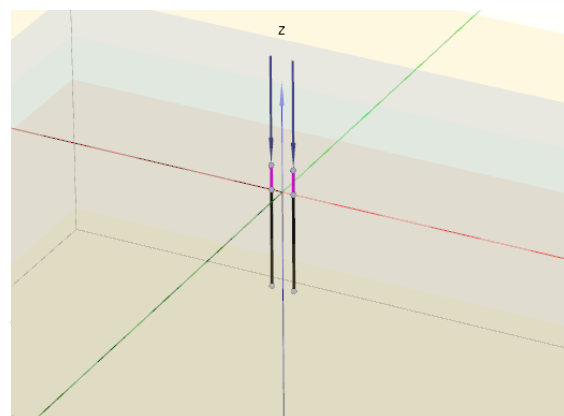


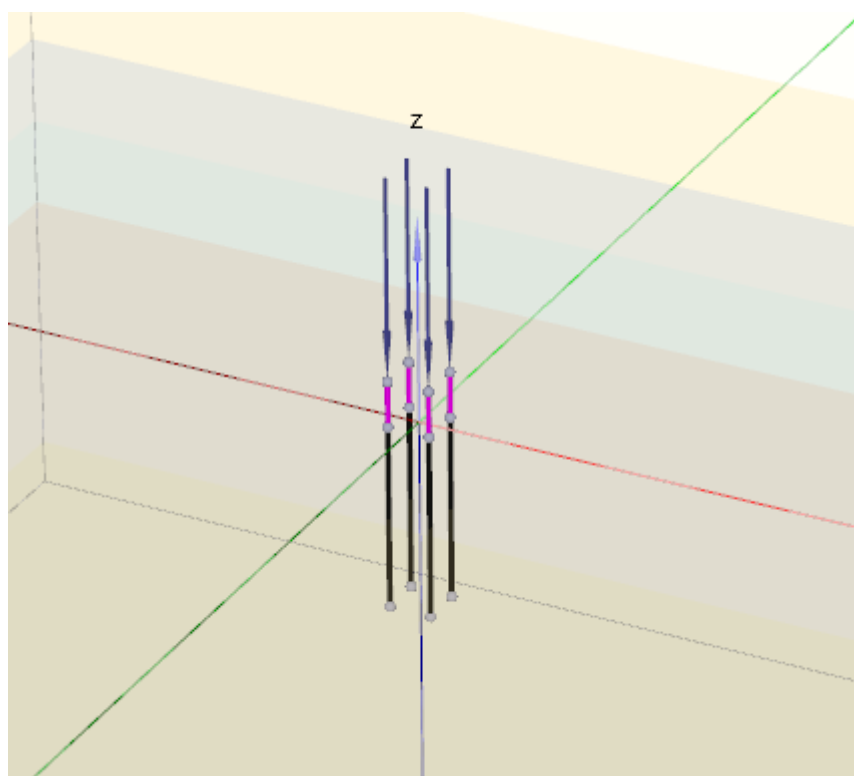
Рис. 1. Общий вид грунтовой модели  
 Fig. 1. General view of the soil model



**Рис. 2.** Эксперимент №1 - одиночная свая  
**Fig. 2.** Experiment No. 1 - single pile



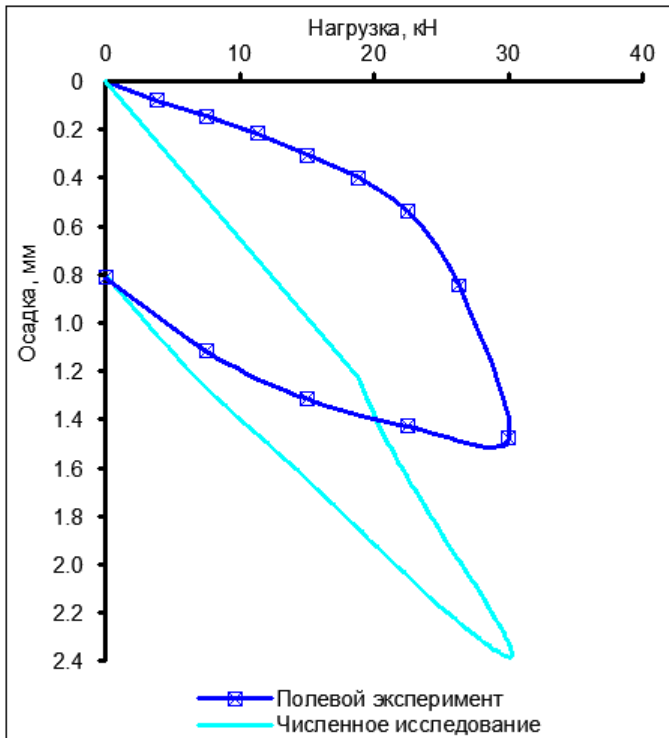
**Рис. 3.** Эксперимент №2 - группа свай 1\*2  
**Fig. 3.** Experiment No. 2 - pile group 1\*2



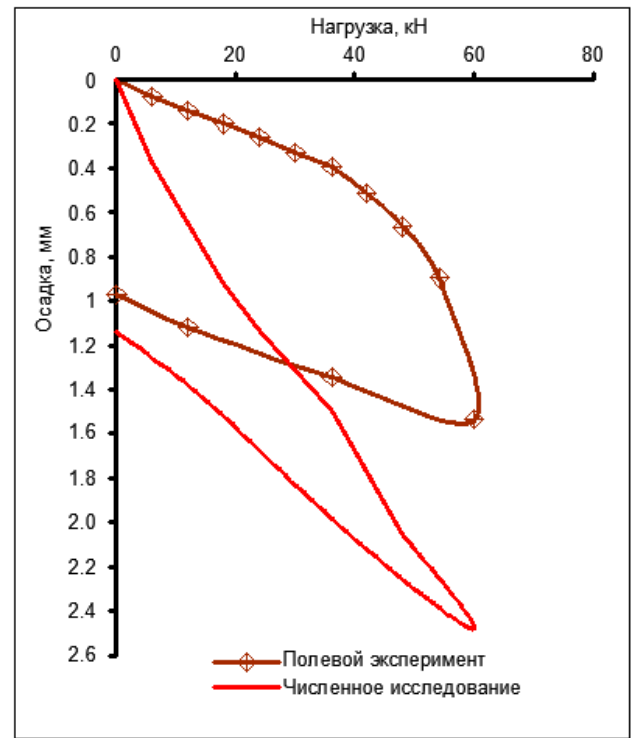
**Рис. 4.** Эксперимент №3 - группа свай 2\*2  
**Fig. 4.** Experiment No. 3 - pile group 2\*2

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

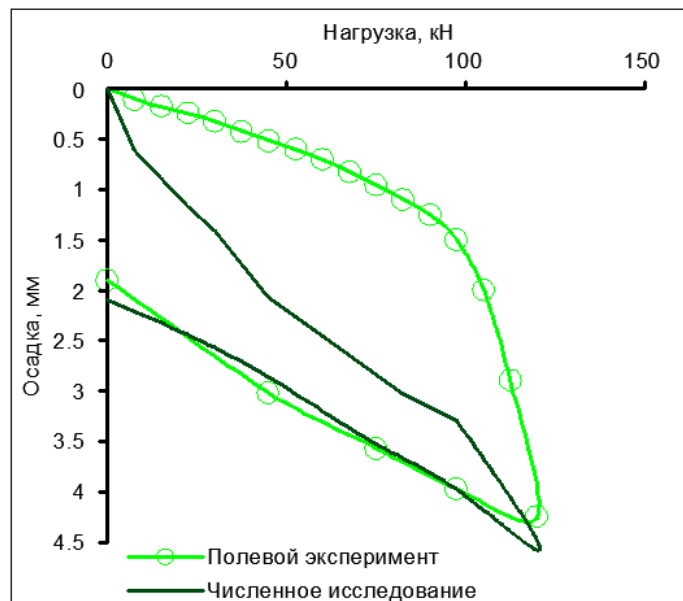
На графиках (рис.5-7) зависимости осадки (мм) грунтоцементного элемента от внешней нагрузки (кН) представлены результаты настоящего численного исследования и полевого испытания [17-18] по одиночной, группе свай 1\*2, группе свай 2\*2 соответственно.



**Рис. 5.** Сравнение численного и полевого исследования.  
Одиночная свая  
**Fig. 5.** Comparison of numerical and field research.  
Single pile



**Рис. 6.** Сравнение численного и полевого исследования. Группа свай 1\*2  
**Fig. 6.** Comparison of numerical and field research.  
Pile group 1\*2



**Рис. 7.** Сравнение численного и полевого исследования. Группа свай 2\*2  
**Fig. 7.** Comparison of numerical and field research. Pile group 2\*2

Из графика (рис.5) видно, что в отличие от полевого эксперимента при численном исследовании отсутствует ярко-выраженная пластичная зона. Наблюдается заметное превышение полевых значений осадки в особенности при малых нагрузках, однако после снятия нагрузки остаточные деформации практически идентичны.

На графике (рис.6) наблюдаются то же поведение грунтового массива, что и в случае с одиночной свайей, но проявляется большее отклонение остаточных деформаций. При сравнении графиков (рис.5) и (рис.6) можно отметить, что при изменении конструкции происходит рост максимальной осадки на 4% как в полевом, так и в численном исследовании.

На графике (рис.3) наблюдается зона пластических деформаций после роста нагрузки свыше 97,5 кН, как в случае численного исследования, так и полевого эксперимента. Тенденция по завышению осадок в упругой зоне аналогична двум предыдущим графикам. Расхождение по остаточным деформациям не превышает 10%.



Завышение нагрузки 97,5 кН более чем на 25% приведет к занижению прогнозируемой численным исследованием осадки.

Следует отметить, что кроме представленного упрощенного способа моделирования в ПВК Plaxis 3D грунтоцементных элементов, который в частности используется при моделировании грунтовых анкеров, существуют еще два способа:

1. Задание объемными элементами с выбором модели поведения «Linear Elastic».

Особенностью модели является задание типа поведения (Non-Porous) и коэффициента Пуассона  $\nu$  (для грунтоцементных элементов варьируется от 0,15 до 0,22). Результаты по осадке при использовании данной модели коррелируют только с теоретическими выкладками [18].

2. Задание объемными элементами с выбором модели поведения «Hardening soil model».

Особенностью модели является задание угла внутреннего  $\varphi$  колонны, сцепления и секущего модуля деформации  $E_{50}$ . Авторы отмечают невозможность адекватного использования данной модели в рамках, представленных в полевом исследовании исходных данных (отсутствуют данные трехосных испытаний).

Для возможности количественной оценки результатов численного исследования при сравнении их с полевым испытанием, ввиду недостаточности исходных данных для расчета в ПВК Plaxis 3D, возможны следующие операции:

1. Калибровка модели путем подбора оптимального сочетания эффективных углов внутреннего трения (в настоящем исследовании показатель принят по объекту аналогу) и сцепления (показатель принят по эмпирической зависимости) подстилающих слоев грунта.

2. Верификация данных полевых компрессионных испытаний в виртуальной лаборатории «Soil test», в виду достаточно низких прочностных показателей, наблюдаемых в первом подстилающем слое.

3. Расчет модели в другом геотехническом расчетном комплексе, более адаптированном под представленные в (табл. 1-6) исходные данные.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей статьи было проведено сравнение результатов полевых испытаний и численного исследования в ПВК Plaxis 3D следующих конструктивных схем:

1. Одиночная свая. Расхождение между полевым экспериментом и моделированием по осадке при максимальной нагрузке – 38%, по остаточным деформациям – 1,12%.

2. Свайное поле 1\*2. Расхождение между полевым экспериментом и моделированием по осадке при максимальной нагрузке – 60,82%, по остаточным деформациям – 14,83%.

3. Свайное поле 2\*2. Расхождение между полевым экспериментом и моделированием по осадке при максимальной нагрузке – 7,81%, по остаточным деформациям – 9,39%.

Упрощенный метод моделирования грунтоцементных элементов значительно завышает осадки при максимальной нагрузке (до 61 %), и зоне остаточных деформаций (до 15%). Однако предварительная качественная оценка осадки, особенно для куста свай 2\*2 (наиболее близкий к инженерной практике случай), вполне возможна, несмотря на неполноту исходных данных так как не происходит негативного занижения значений осадки.

Возможна дальнейшая итерационная калибровка модели до наблюдения приемлемых количественных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребиндер П. А., Серб-Сербина Н.Н. Придание грунтам водонепроницаемости и механической прочности. Л.: Академия наук СССР, 1942. 267 с.
2. Безрук В.М. Теоретические основы укрепления грунтов цементами. М.: Автостройиздат, 1956. 241 с.
3. Безрук В. М., Князюк К. А. Устройство цементогрунтовых оснований и покрытий. М.: Дориздат, 1951. 220 с.
4. Yahiro, T., Yoshida, H. Induction grouting method utilizing high-speed water jet // Proceedings of 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow. 1973. Pp. 402-404.
5. Мангушев Р.А., Осокин А.И., Сотников С.Н. Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. М.: Изд-во АСВ, 2018. 386 с.
6. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов. М.: Стройиздат, 2010. 216 с.
7. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. М.: Стройиздат, 1988. 287 с.
8. Karahan, G.N., Sivrikaya, O. Designing singular jet grouting column for sandy soils // Environ: Earth. Sci. 2018. Pp. 6280-6299. DOI:10.1007/s12665-018-7650-9
9. Makovetskiy O.A. Application of “Jet Grouting” for Installation of Substructures of Estates // Procedia Engineering. 2016. Volume 150. Pages 2228-2231. DOI:10.1016/j.proeng.2016.07.269
10. Garmanov G.V., Sokolov V.A., Strakhov D.A., Sinyakov L.N. Effectiveness of jet grouting method for soil base strengthening. Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. 5(56). Pp. 56-63. DOI: 10.18720/CUBS.56.5
11. Bell K.R., Clemente J.L.M., Gularte F.B. Superjet grouting reduces foundation settlement for La Rosita power plant in Mexicali, Mexico// In: Third international conference on grouting and ground treatment. New Orleans, United State. 10–12 February 2003. Pp. 354–364. DOI:10.1061/40663(2003)112

12. Bzówka J. Analysis of bearing capacity and settlement of jet-grouting columns // *Architecture Civil Engineering Environment*. 2012. Vol. 5. No. 2. Pp. 41–54.

13. Wang Z.-F., Peng X.-B., Liu Y., Cheng W.-C., Wang Y.-Q., Wu C.-J. Evaluation of Ground Displacements Caused by Installing Jet Grouted Columns Using Machine Learning Methods // *Advances in Civil Engineering*. 2020. DOI: /10.1155/2020/8857293

14. Racansky V., Schweiger H.F., Thurner R. FE-Analysis of the behaviour of buttressed jet grouted retaining walls // In: *Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. computer methods and advances in geomechanics*. India. 2008. Pp. 3984–3992.

15. Alkaya D., Yesil B. Design of high-modulus columns (jet grouting) by using tabulation program // In: *Academic Informatics '11-XIII. Academic informatics conference*, Inonu University. 2–4 February 2011. Pp. 749–755 (in Turkish)

16. Juzwa A., Bzowka J. Numerical simulations of settlement of jet grouting columns // *Trans VŠB Tech Univ Ostrava Civ Eng Ser* 16(1). 2016. Pp. 1-6. DOI:10.1515/tvsb-2016-0001

17. Al-Kinani A.M., Ahmed M.D. Field study of the effect of jet grouting parameters on strength based on tensile and unconfined compressive strength // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. DOI:10.1088/1757-899X/737/1/012083

18. Al-Kinani A.M., Ahmed M.D. Comparison of Single and Group Jet Grouting Columns Capacity Based on Field Load Test and Theoretical Methods. *Civil Engineering Journal* 5, no. 6 (June 23, 2019): 1353–1366. DOI:10.28991/cej-2019-03091337

19. Brinkgreve R B., Broere W. PLAXIS 3D foundation manual version 2 (Delft University of Technology and PLAXIS). 2008. Pp.123-144.

20. Fang Y.-S., Liao J.-J., Sze S.-C. An empirical strength criterion for jet grouted soilcrete // *Engineering Geology*. 1994. 37(3-4). Pp. 285–293. DOI:10.1016/0013-7952(94)90062-0

#### ОБ АВТОРАХ

**Сергей Сергеевич Зимин** – доцент, к.т.н. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: zimin\_sergei@mail.ru

**Максим Васильевич Мартынов** – студент магистратуры. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: inextremo1996@gmail.com

#### ABOUT THE AUTHORS

**Sergey S. Zimin** - Associate Professor, Candidate of Technical Sciences. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: zimin\_sergei@mail.ru

**Maksim V. Martynov** – student of the magistracy. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: inextremo1996@gmail.com

УДК 69

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIM-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.Ю. Чакин<sup>1</sup>, О.С. Гамаюнова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

**Аннотация.** Эффективное утепление ограждающих конструкций позволяет значительно сократить затраты на отопление. Так, для того, чтобы создать комфортную среду в помещении, необходимо подобрать подходящий теплоизоляционный материал. При подборе утеплителя нужно обратить внимание на основные технические характеристики теплоизоляционных материалов, а именно: теплопроводность, средняя плотность, огнестойкость, морозостойкость, влагопоглощение, влажность, прочность и долговечность. В настоящее время благодаря BIM-технологиям стали возможны оптимизация и ускорение привычных процессов проектирования объектов строительства. В статье представлен функционал современных BIM-комплексов, а также возможность их использования для работы с теплоизоляционными материалами. С помощью стандартного функционала Revit и созданных в Dynamo скриптов был сделан выбор теплоизоляционных материалов, обеспечивающих нормативные требования к тепловой защите зданий. Сделан вывод о том, что применение современных BIM-технологий при выборе теплоизоляционных материалов позволяет оптимизировать процесс подбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, утеплитель, BIM, BIM-технологии, энергоэффективность, ограждающие конструкции, Autodesk Revit, Dynamo, Temper-3D, ЛИРА-САПР, Autodesk Navisworks, Tekla Structures, Autodesk Green Building Studio, Autodesk Insight.

**Ссылка для цитирования:** Чакин Е.Ю., Гамаюнова О.С. Использование BIM-технологий для выбора энергоэффективных теплоизоляционных материалов // Инженерные исследования. 2022. №2 (7). С. 11-21. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/11-21.pdf>

## THE USE OF BIM TECHNOLOGIES FOR THE SELECTION OF ENERGY-EFFICIENT THERMAL INSULATION MATERIALS

E.Yu. Chakin<sup>1</sup>, O.S. Gamayunova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

**Abstract.** Effective insulation of enclosing structures can significantly reduce heating costs. So, in order to create a comfortable environment in the room, it is necessary to choose the right heat-insulating material. When choosing a heater, you need to pay attention to the main technical characteristics of thermal insulation materials, namely: thermal conductivity, average density, fire resistance, frost resistance, moisture absorption, humidity, strength and durability. At present, thanks to BIM technologies, it has become possible to optimize and accelerate the usual processes of designing construction projects. The article presents the functionality of modern BIM-complexes, as well as the possibility of using them to work with thermal insulation materials. Using standard Revit functionality and scripts created in Dynamo, a selection of thermal insulation materials was made to meet regulatory requirements for thermal protection of buildings. It is concluded that the use of modern BIM technologies in the selection of thermal insulation materials allows optimizing the process of selecting energy-efficient thermal insulation materials.

**Keywords:** thermal insulation materials, insulation, BIM, BIM technologies, energy efficiency, enclosing structures, Autodesk Revit, Dynamo, Temper-3D, LIRA-SAPR, Autodesk Navisworks, Tekla Structures, Autodesk Green Building Studio, Autodesk Insight..

**For citation:** Chakin E.Yu., Gamayunova O.S. The use of BIM technologies for the selection of energy-efficient thermal insulation materials // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.2 (7). Pp. 11-21. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/11-21.pdf>

## ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях невозможно представить привычный процесс проектирования без использования BIM-технологий. Building Information Modeling (BIM) - процесс разработки и использования цифровой модели для проектирования, строительства и эксплуатации объекта [1-3].

Полный жизненный цикл BIM-объекта представлен на рис. 1.

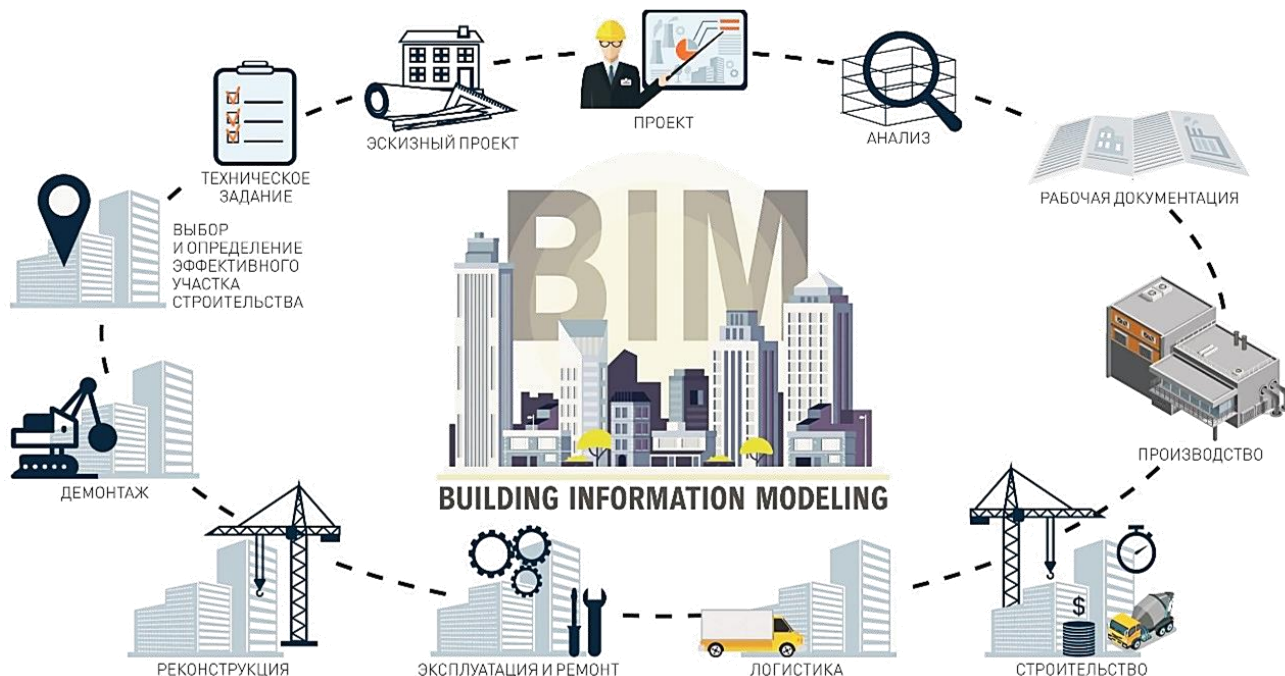


Рис. 1. Жизненный цикл BIM-объекта<sup>1</sup>

Fig. 1. Life cycle of a BIM object

Основные преимущества и недостатки BIM, а также возможности BIM-технологий для поиска решений повышения энергоэффективности зданий приведены в статье [4]. Использование BIM-технологий в строительстве имеет следующие достоинства:

- 3D-визуализация. Выполняется для наглядности состояния объекта проектирования для заказчиков, будущих собственников жилья, инвесторов, подрядчиков, органов проверки.
- 3D-модель. Представляет собой цифровое хранилище информационных данных о здании. Позволяет эффективно и быстро редактировать проектные решения, отслеживая результаты во всех связанных между собой проекциях.
- Применение BIM-подходов в проектировании существенно уменьшают сроки подготовки проектной документации, из-за высокой автоматизации процессов.
- Использование BIM-технологий сокращает вероятность совершенных ошибок, позволяет своевременно выявить коллизии (пересечения) в архитектурных, конструктивных и инженерных системах здания в рамках процесса проектирования.
- Управление режимами работ в реальном времени, контроль над ключевыми показателями и соблюдением сроков выполнения работ.
- Возможность управления цифровыми данными. Изменяя финансовые параметры проекта или трудозатраты в спецификациях, можно оптимизировать стоимостные показатели строительства.

Разработка BIM-модели начинается с создания 3D-модели здания или сооружения с планами, разрезами, 3D-видами. При помощи специальных BIM-комплексов осуществляется расчет всех конструктивных элементов строительного объекта. Большая база данных позволяет разработать все рабочие и проектные чертежи, спецификации, информацию об объемах строительных работ, позволяет подсчитать планируемые затраты. В современных реалиях BIM – комплексы позволяют произвести расчеты инженерных сетей, тепловых потерь, определить уровень естественного освещения, инсоляции с учетом характеристик местности, рельефа, грунта. Моделирование транспортных сетей, социальных

<sup>1</sup> BIM-технологии – приоритет цифре [Электронный ресурс]. – URL: <https://mgsu.ru/news/Universitet/BIMtehnologiiprioritetsifre/> (дата обращения: 25.04.2022)

инфраструктур в районе строительства являются также реальными задачами для BIM. Для заключительного этапа разработки проекта составляется детально разработанный календарный план и график, определяется количество ресурсов и количество рабочей техники для выполнения строительных работ.

Благодаря BIM-моделированию можно отслеживать выполненные работы на строительной площадке, а также своевременно отслеживать все изменения в ходе выполнения работ в реальном времени. На данном этапе возможен контроль стоимостных характеристик, расходных средств, и отслеживать на сколько получается реализовать изначально заложенные бюджетные средства.

Даже после завершения работ по строительству здания или сооружения, информационная модель может собирать необходимые данные о здании с помощью специальных датчиков. Данные датчики позволят контролировать техническое состояние, функциональность и не допустить потенциальных аварийных ситуаций. С помощью BIM – технологий на этапе эксплуатации также возможен учет инженерного оборудования, контроль гарантийных обязательств и главное преимущество возможность потенциального подсчета расходов всевозможных ресурсов. В некоторых зарубежных странах BIM модели используют для учета арендной платы и подсчета стоимости плановых ремонтных работ. При помощи BIM – проектирования на этапе эксплуатации возможно большое количество различных мероприятий, например, разработка плана развития строительного объекта, технический аудит, оценка управления и др.

### ВОЗМОЖНОСТИ BIM-КОМПЛЕКСОВ

BIM-моделирование за последние несколько лет сделало огромный скачок в проектировании, предоставив проектировщикам возможность работать с цифровой копией проекта. Основным программным комплексом BIM на сегодняшний день является Autodesk Revit.

**Autodesk Revit** – программный комплекс, основанный на технологии информационного моделирования зданий (BIM) и объединяющий в рамках единого комплексного решения инструменты для архитектурного, конструктивного и инженерного проектирования. Использование программного комплекса Revit для работы над единым проектом, обеспечивает высокую точность выполнения проектов. Программа помогает правильно сформулировать проектные идеи и придерживаться их на протяжении всех основных этапах проектирования. Существуют и другие программы, работающие на основе BIM-технологий.

**Temper-3D** – программа, ориентированная преимущественно на инженеров и строителей, которым в соответствии с областью деятельности приходится рассчитывать тепловые поля и сопротивление конструктивных элементов зданий. Программа способна с высокой точностью определять: тип утепляющего материала и его толщину, позволяющую исключить промерзание конструкции, вероятность появления конденсата на утепленной поверхности или расположенных рядом элементах, минимальные вероятные температуры на каждом из участков и др. Для большей наглядности результаты расчетов представлены в виде температурных полей, имеющих цветовую градиацию.

**ЛИРА-САПР** - многофункциональный программный комплекс, предназначенный для нахождения прочности и устойчивости конструкций. ЛИРА-САПР работает согласно технологий информационного моделирования зданий (BIM) и ориентирован для проектирования и расчета строительных конструкций.

**Autodesk Navisworks** - программа для комплексного управления BIM-проектами, объединения моделей, поиска коллизий, работы с 4D (учитываются либо финансовые, либо временные характеристики) и 5D (учитываются финансовые и временные характеристики) информацией. Является основной программой при проверке моделей на проектные ошибки, мониторинге строительства, демонстрации объектов и многих других задачах.

**Tekla Structures** - программное обеспечение для конструктивно-информационного моделирования зданий, способное моделировать конструкции из различных видов строительных материалов. Данная программа способна рассчитывать сталь, бетон, дерево и стекло. Tekla позволяет проектировщикам и инженерам строить конструкцию здания и его компоненты с помощью 3D-моделирования, создавать 2D-чертежи и получать доступ к информации о здании. На рис.2 представлена 3D-модель, выполненная в Tekla. Программное обеспечение позволяет пользователям создавать и управлять 3D-моделями конструкций из бетона или стали, а также корректировать их на протяжении всего процесса от концепции до изготовления.



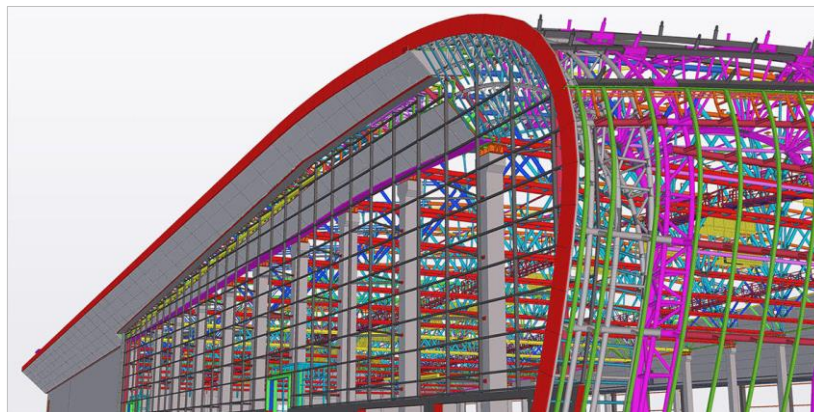


Рис. 2. Модель, выполненная в Tekla Structures<sup>2</sup>  
Fig. 2. Model made in Tekla Structures

**Autodesk Green Building Studio** - онлайн-сервис, который позволяет на ранних стадиях проекта осуществить расчеты, связанные с воздействием здания или сооружения при его эксплуатации. Green Building Studio помогает обеспечить оптимальное использование энергии, а также произвести оценку выбросов углекислого газа в окружающую среду. Главными преимуществами является высокая скорость выполнения расчетов и точный анализ потенциального воздействия на окружающую природную среду проектных решений. Данный комплекс отлично подойдет для архитекторов и конструкторов, которые хотят оценить уровень экологической эффективности объекта на ранних стадиях проектирования.

**Autodesk Insight** - слабо популярный в нашей стране комплекс, позволяет архитекторам и инженерам проектировать энергоэффективные здания с помощью передовых систем моделирования и анализа производительности зданий, интегрированных в Revit.

Ряд источников [5, 6] посвящен исследованию программных комплексов, которые работают по принципу BIM. Практически во всех договорах с заказчиками появляется требование о проектировании полноценной BIM-модели объекта. И если еще несколько лет назад речь шла, в основном, об архитектуре и конструктиве, то сегодня от проектных организаций ждут полностью увязанные модели, включающие все инженерные коммуникации. Так, самым распространённым BIM-комплексом на сегодняшний день является Revit, большинство учреждений используют именно этот программный комплекс для проектирования все возможных разделов проектной и рабочей документации. Как и большинство BIM - программ, Revit имеет возможность автоматизации.

На данный момент существует четыре основных варианта для автоматизации работы в Revit:

1. **Rhino.Inside** (бета-версия). Rhino.Inside - это проект компании Rhino WIP, имеющий открытый исходный код, который позволяет Rhino и Grasshopper запускаться в других 64-битных приложениях Windows, таких как Revit, AutoCAD и т.д. С Rhino Inside Revit вы также получаете все функциональные возможности Rhino, включая Grasshopper for Revit. Grasshopper - это визуальный язык программирования, схожий по своей концепции с Dynamo (хотя есть и принципиальные отличия).

2. **PythonShell** или **pyRevit** (Python с Revit API). RevitPythonShell - предоставляет возможность написания сценариев программного обеспечения Autodesk Revit. Дизайнеры могут интерактивно проектировать и манипулировать элементами Revit, используя алгоритм и вычислительную логику с кодом Python.

3. **C#** (C# с Revit API). C# - Autodesk Revit предоставляет богатый API, который можно использовать для настройки существующих функций продукта или добавления совершенно новых. Вы можете автоматизировать повторяющиеся, отнимающие много времени задачи и расширять основные функции, не выходя из среды Autodesk Revit, создавая различные плагины. #API можно использовать для создания пользовательских инструментов и функций, которые подключаются непосредственно к Autodesk Revit, расширяя его функциональные возможности. Является главным языком программирования для написания плагинов к Revit, на сегодняшний день специалист, обладающий достаточными знаниями C#, пользуется высоким спросом на рынке.

<sup>2</sup> Benefits of Tekla Structures for Steel Detailing Projects - CAD Outsourcing Services [Электронный ресурс]. – URL: <https://cadoutsourcingserviceses.blogspot.com/2021/03/benefits-of-tekla-structures-for-steel.html> (дата обращения: 17.03.2022)

4. **Dynamo** (графическое программирование). Дупато - инструмент визуального программирования, который работает непосредственно с Revit. Дупато расширяет возможности Revit, предоставляя доступ к Revit API (интерфейсу прикладного программирования) более доступным способом. Главными преимуществами использования Дупато по сравнению с применением собственных инструментов Revit являются скорость выполнения процесса и его точность. Возможности Дупато ограничены только возможностями самого проектировщика. Среда визуального программирования поддерживает выполнение внутренних узлов, содержащих фрагменты кода Python, что открывает неограниченные возможности ее применения [7].

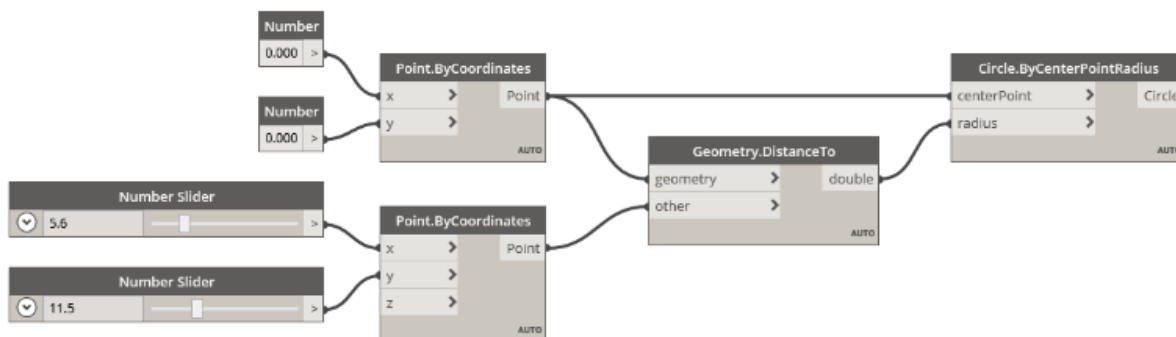
### ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ DYNAMO

Визуальное программирование – это процесс разработки большинства проектов, который включает в себя построение визуальных, системных и геометрических связей между элементами. Процесс разработки визуального программирования строится по алгоритмическому принципу, в основе лежит использование пошаговый набор действий, следующих стандартной логике программы: ввод данных, их обработка, вывод данных [7].

Визуальное программирование - современная альтернатива текстовым форматам программирования. Вместо ввода текста со сложными и строгими алгоритмическими правилами, достаточно соединять предварительно разработанные готовые узлы вместе. Каждый узел уже содержит в себе части кода, которые пришлось бы создавать в процессе классического программирования - получается простой вариант конструктора алгоритма.

Процессы текстового и визуального программирования по сути ничем не отличаются. И там, и там используется одна и та же платформа, но при визуальном программировании инструкции и связи в программе определяются посредством графического (т.е. визуального) пользовательского интерфейса и вместо ввода текста, ограниченного возможностями синтаксиса, создается цепочка из готовых к использованию узлов. На рис.3 представлены примеры визуального и текстового программирования.

#### Визуальная программа



#### Текстовая программа

```
myPoint = Point.ByCoordinates(0.0,0.0,0.0);  
x = 5.6;  
y = 11.5;  
attractorPoint = Point.ByCoordinates(x,y,0.0);  
dist = myPoint.DistanceTo(attractorPoint);  
myCircle = Circle.ByCenterPointRadius(myPoint,dist);
```

Рис. 3. Сравнение визуального и текстового программирования<sup>3</sup>

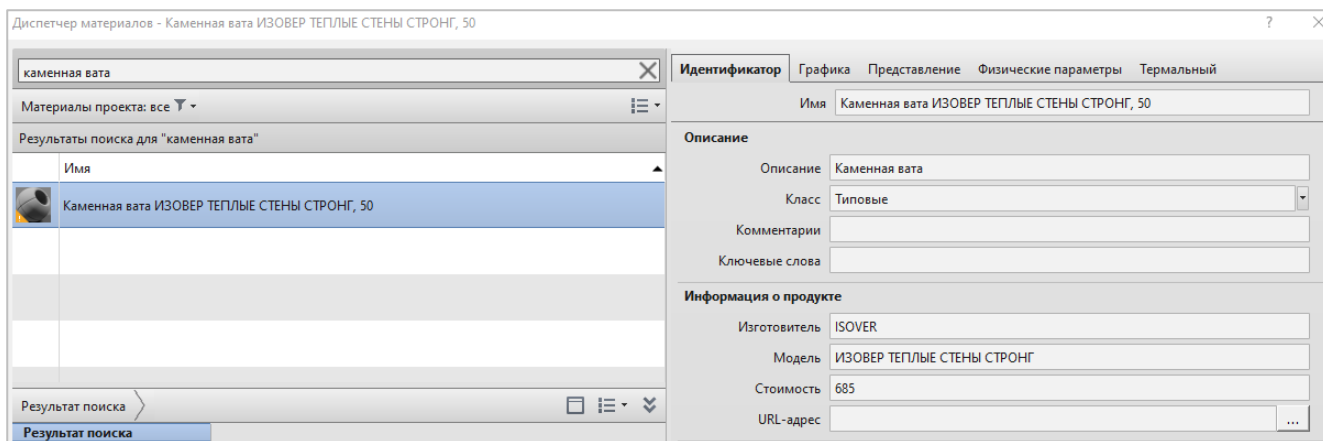
Fig. 3. Comparison of visual and text programming

<sup>3</sup> How to launch AGACAD's Revit add-ons via Dynamo [Электронный ресурс]. – URL: <https://agacad.com/blog/launch-agacad-revit-addons-via-dynamo> (дата обращения: 12.04.2022)

### СКРИПТ DYNAMO ДЛЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Для создания скрипта разработана цифровая модель здания, выполненная в Revit 2021. В качестве примера использована модель двухэтажного жилого дома с площадью стеновых ограждающих конструкций 253,71 м<sup>2</sup>.

Изначально необходимо подготовить Revit-модель к запуску скриптов, для этого нужно создать материалы и внедрить в цифровую модель необходимые параметры для нахождения энергоэффективного утеплителя. Сначала в Revit-проекте создаются теплоизоляционные материалы. Для этого им назначаются параметры плотности, коэффициента теплопроводности и стоимости. На рис.4 показаны некоторые параметры, которые необходимо заполнить в Revit.



**Рис. 4.** Заполнение параметров утеплителя  
**Fig. 4.** Filling in the parameters of the insulation

Для того, чтобы начать оптимизировать расчет приведенного сопротивления теплопередаче стен, необходимо подготовить Revit-модель, для чего нужно внедрить в модели необходимые для теплотехнического расчета параметры. С помощью стандартного ФОП (файл общих параметров), выполненного на основе стандартного ADSK-шаблона, создается нужный комплект параметров таких как:

- коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции;
- коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для условий холодного периода;
- коэффициенты, значения которых следует принимать по данным табл.3 СП 50.13330.2012;
- требуемое и приведённое сопротивление теплопередаче;
- город (параметр в котором будет возможность выбора города, от которого будут зависеть градусо-сутки отопительного периода);
- ГСОП (градусо-сутки отопительного периода).

В результате добавления параметров из ФОП получаем параметры для заполнения в параметрах экземпляра стеновых конструкций в Revit.

Оптимизация расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций в Revit осуществляется с помощью инструмента визуального программирования Dynamo.

Определим требуемое сопротивление теплопередаче. Для этого определим величину градусо-суток в течение отопительного периода (ГСОП) по формуле (1):

$$\text{ГСОП} = (t_{int} - t_{ht}) \cdot Z_{ht} \quad (1)$$

где  $t_{int}$  - расчетная средняя температура внутреннего воздуха здания [табл.1, СП 23-101-2004];  
 $t_{ht}$  - средняя температура наружного воздуха отопительного периода [табл.1, СП 23-101-2004];  
 $Z_{ht}$  - продолжительность отопительного периода [табл.1, СП 23-101-2004].

Так, для г. Санкт-Петербург ГСОП = 4537 °C·сут.

Определим требуемое значение сопротивления теплопередаче  $R_{req}$  по формуле (2):

$$R_{req} = a \cdot \text{ГСОП} + b \quad (2)$$

где  $a = 0,0003$  [табл.3, СП 50.13330.2012];

$b = 1,2$  [табл.3, СП 50.13330.2012];

$R_{req} = 2,65$  (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.



Сопротивление теплопередаче многослойных ограждающих конструкций вычисляется по формуле (3):

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_B} \quad (3)$$

где:

$\alpha_B$  - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), принимаемый по табл. 4 СП 50.13330.2012;

$\alpha_n$  - коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкций для условий холодного периода, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), принимаемый по таблице 6 СП 50.13330.2012;

$R_s$  - термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.

Для примера сформируем типовой вариант стены, состоящей из бетона, изоляции из каменной ваты и облицовки из кирпича. При этом у всех этих элементов проставлены параметры коэффициента теплопроводности и толщины слоя. Revit автоматически считает параметр термического сопротивления слоя однородной части фрагмента. На рис.5 данный параметр составляет 2,969 (м<sup>2</sup>·°C)/Вт.

Редактирование сборки

Семейство: Базовая стена  
 Тип: ADSK\_Внутренняя\_Бетон\_200\_80  
 Общая толщина: 340.0  
 Сопротивление (R): 2.9690 (м<sup>2</sup>·К)/Вт  
 Тепловая нагрузка: 35.52 кДж/К

Высота образца: 3000.0

Слой НАРУЖНАЯ СТОРОНА

	Функция	Материал	Толщина	Огибания	Материал несущих конструкций
1	Отделка 2 [5]	Кирпич, норманнский	60.0	<input checked="" type="checkbox"/>	
2	Термическая/воздушная прослойка	Каменная вата ISOVER ИЗОБЕР	80.0	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	Граница сердцевины	Слой выше огибания	0.0		
4	Структура [1]	ADSK_Бетон_Железобетон	200.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Граница сердцевины	Слой ниже огибания	0.0		

Рис. 5. «Пирог» стены в Revit  
 Fig. 5. "Pie" wall in Revit

Для подсчета приведенного сопротивления теплопередаче создадим скрипт с помощью визуального программирования Dynamo, который способен автоматизировать подсчет требуемого сопротивления теплопередаче в зависимости от выбранного города (климатических условий).

### Шаг 1: Выбор города

С помощью нода (блока или узла, из которых собирается скрипт) Element.SetParameterByName заполняется параметр города. Для того чтобы выбрать город в нод под названием “Выбрать город” вписываем наименование города. Список городов можно расширять, на данный момент скрипт работает со следующими городами: Санкт-Петербург, Москва, Краснодар, Саранск, Нижний Новгород, Новосибирск, Омск, Мурманск, Пермь, Саратов, Смоленск, Сургут, Хабаровск, Астрахань, Владивосток, Казань и Екатеринбург. На рис.6 наглядно показано как устроен выбор города.

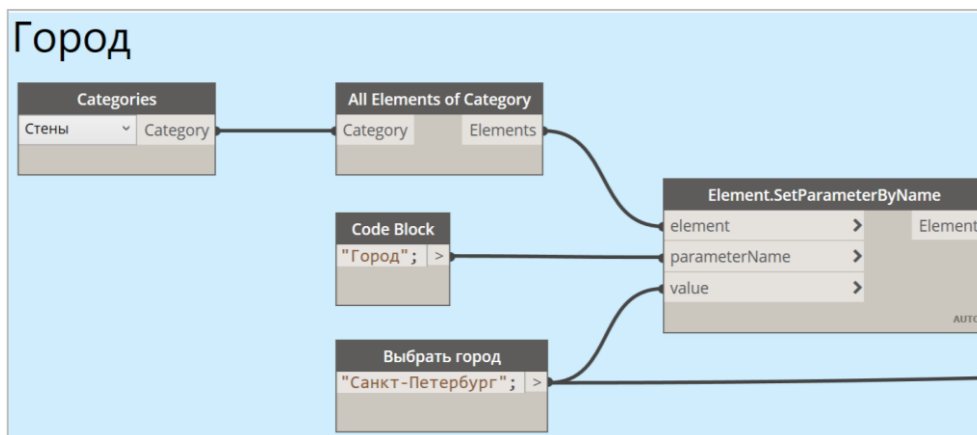


Рис. 6. Выбор города  
 Fig. 6. City selection

### Шаг 2: Подсчет ГСОП

Для заполнения параметра ГСОП необходимо создать Excel-файл, куда занести предварительно рассчитанные по формуле (1) значения ГСОП. Для импорта из файла Excel в Дунато используется нод Data.ImportExcel. На рис.7 показана часть скрипта, которая отвечает за импорт параметров из Excel.

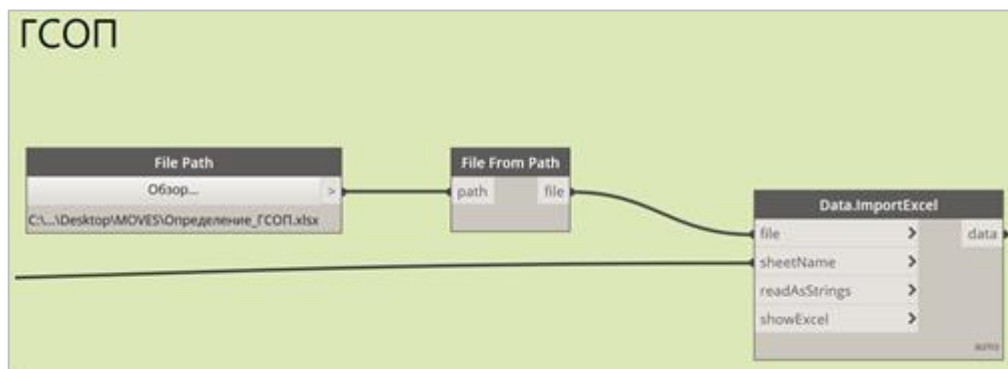


Рис. 7. Выбор параметров из Excel  
Fig. 7. Selecting options from Excel

### Шаг 3: Заполнение коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи

Для заполнения коэффициентов  $\alpha_b$ ,  $\alpha_n$ ,  $a$ ,  $b$  необходимо использовать нод Element.SetParameterByName. Коэффициенты  $a$ ,  $b$  заполняются согласно табл.3 СП 50.13330.2012. Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции определяется по табл. 4 СП 50.13330.2012, а коэффициент теплоотдачи наружной поверхности для условий холодного периода определяется по табл. 6 СП 50.13330.2012.

### Шаг 4: Заполнение требуемого сопротивления теплопередаче

### Шаг 5: Заполнение параметра приведённого сопротивления теплопередаче

На рис.8 показан скрипт, который заполняет параметр требуемого сопротивления теплопередаче.

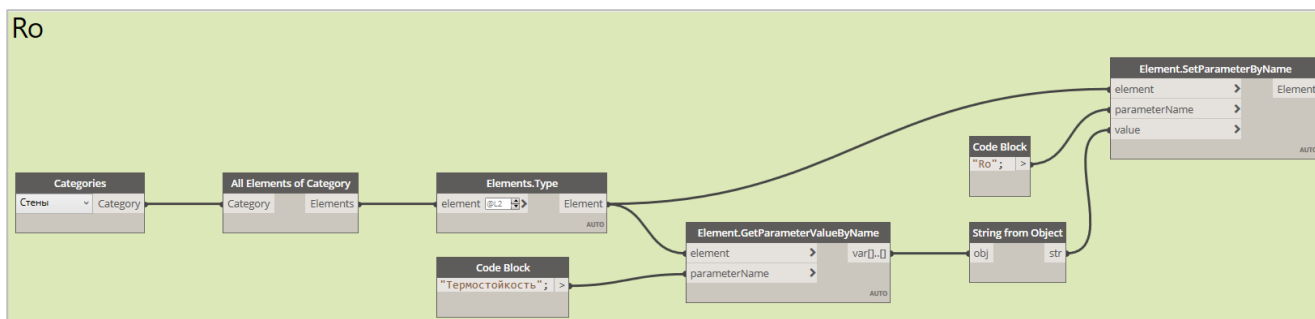


Рис. 8. Скрипт для заполнения приведенного сопротивления теплопередаче  
Fig. 8. Script to fill the reduced heat transfer resistance

В итоге получаем полностью автоматизированный теплотехнический расчет, выполненный в ПК Revit, который автоматически определяет требуемое и приведенное значение сопротивление теплопередаче ограждающей стеновой конструкции. На рис. 9 показан результат работы скрипта.

Данные	
1/αв	8.7
1/αн	23
a	0.0003
b	1.2
Rreq	2.5611
Город	Санкт-Петербург
ГСОП	4537

Рис. 9. Результат работы скрипта  
Fig. 9. The result of the script

### Шаг 6: Подбор толщины утеплителя, согласно требуемого сопротивления теплопередаче

Автоматизированный подбор толщины утеплителя происходит за счет работы второго скрипта, который, в свою очередь, подбирает множество вариантов, а затем с помощью сводной спецификации сравнивает значения требуемого и приведенного сопротивления теплопередаче. Причем значения, не обеспечивающие значение требуемого сопротивления теплопередаче, после настройки фильтрации в таблицу не попадают.

Наименование типоразмеров назначается с помощью таблицы в Excel, откуда же Дунато берет данные наименования и толщины теплоизоляционного материала. Настройки фильтрации в ведомости формируются согласно правилу: приведенное сопротивление теплопередаче ( $R_{req}$ ) должно быть больше или равно требуемому сопротивлению теплопередаче ( $R_0$ ), рис. 10.

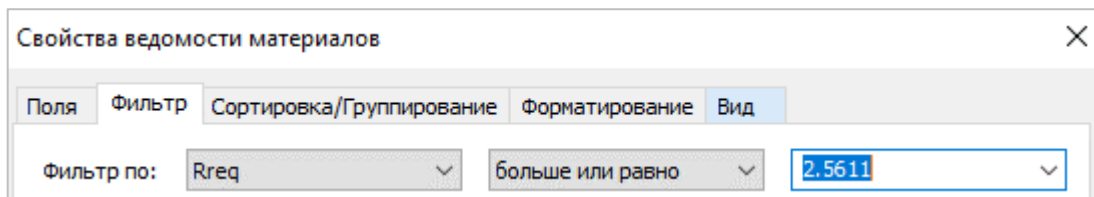


Рис. 10. Фильтр ведомости  
 Fig. 10. List filter

В итоге получаем сводную ведомость из вариаций стеновых конструкций с различными типами утеплителя и толщинами. Пример ведомости вариаций теплоизоляционного слоя для стеновых конструкций показан на рис. 11.

A	B	C	D	E
Tun	ГСОП	Город	Rreq	Ro
ADSK_Внутренняя_Бетон_200_70	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.194208
Tun1_Izovol Л-35	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.302316
Tun1_IZOVOL Cm-50	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.302316
Tun1_NORDECO-400	4537	Санкт-Петербург	2.5611	1.080093
Tun1_Rockwool Лайт Баттс Сканд	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.246760
Tun1_Rockwool Лайт Баттс Экстра	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.302316
Tun1_Rockwool Эконом	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.097187
Tun1_Ursa Geo Лайт	4537	Санкт-Петербург	2.5611	1.893225
Tun1_Ursa Terra	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.246760
Tun1_URSA XPS N-III-G3-L	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.489816
Tun1_URSA XPS N-III-L pro	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.635649
Tun1_URSA XPS СТАНДАРТ N-II-L	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.635649
Tun1_Ursa Универсальная	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.246760
Tun1_ИЗОВЕР ПРОФИ	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.194208
Tun1_ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОИТ	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.361139
Tun1_ИЗОВЕР ТЕПЛЫЙ ДОМ	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.144421
Tun1_КНАУФ НОРД 033 (НОРД)	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.423528
Tun1_ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.361139
Tun1_ТЕПЛОКНАУФ НОРД 032 (НОРД)	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.246760
Tun1_ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON ECO	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.489816
Tun1_ТЕХНОНИКОЛЬ РОКЛАЙТ	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.246760
Tun1_ТЕХНОНИКОЛЬ ТЕХНОФАС ЭФФЕ	4537	Санкт-Петербург	2.5611	2.194208

Рис. 10. Ведомость вариаций теплоизоляционного слоя для стеновых конструкций  
 Fig. 10. List of variations of the heat-insulating layer for wall structures

Благодаря сводной ведомости можно увидеть все подходящие вариации утеплителей, удовлетворяющие теплотехническому расчету согласно СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением N 1).

### Шаг 7. Подбор различных вариаций теплоизоляционных материалов для стеновых конструкций, соответствующих условиям теплотехнического расчета

На данном этапе производится подбор утеплителей, которые соответствуют условиям теплотехнического расчета согласно СП 50.13330.2012. Подбор утеплителя осуществляется с помощью сводной ведомости. Сортировка ведомости устроена таким образом, что сначала выводятся стеновые конструкции с наименьшими значениями стоимости утеплителя за м<sup>3</sup>. Стеновые конструкции со

значениями приведённого сопротивление теплопередаче, наиболее приближенными к значению требуемого сопротивления выводятся в верх ведомости. Наглядно ведомость подбора утеплителя представлена на рис.11. Таким образом сверху ведомости будут выводиться наиболее оптимальные вариации утеплителя.

A	B	C	D	E	F	G
Наименование стены	ГСОП	Город	Rreq	Ro	Наименование утеплителя	Стоимость утеплителя за м3
ИЗОВЕР ПРОФИ 85	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,599613	ИЗОВЕР ПРОФИ	1872.00
Rockwool Эконом 90	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,610008	Rockwool Эконом	2194.44
Ursa Geo Лайт 100	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,575043	Ursa Geo Лайт	2260.00
ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ИЗОВЕР ТЕПЛЫЕ СТЕНЫ СТРОНГ	2262.30
Ursa Универсальная 85	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,663427	Ursa Универсальная	2397.33
Ursa Terra 85	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,663427	Ursa Terra	2566.19
ТЕХНОНИКОЛЬ РОКЛАЙТ 85	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,663427	ТЕХНОНИКОЛЬ РОКЛАЙТ	3023.15
Isoroc Супер Теплый 75	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,646066	Isoroc Супер Теплый	3137.70
Rockwool Лайт Баттс Скандик 85	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,663427	Rockwool Лайт Баттс Скандик	3260.42
Izovol Л-35 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,588030	Izovol Л-35	3461.81
ТеплоКНАУФ Для Кровли и стен 85	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,663427	ТеплоКНАУФ Для Кровли и стен	3625.00
IZOVOL Ст-50 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,588030	IZOVOL Ст-50	3906.25
ТЕХНОНИКОЛЬ Технолайт Оптима 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,588030	ТЕХНОНИКОЛЬ Технолайт Оптима	4039.35
КНАУФ NORD 033 (НОРД) 75	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,575043	КНАУФ NORD 033 (НОРД)	4644.44
Rockwool Лайт Баттс Экстра 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,588030	Rockwool Лайт Баттс Экстра	4700.00
ТЕПЛОКНАУФ NORD 032 (НОРД) 85	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,663427	ТЕПЛОКНАУФ NORD 032 (НОРД)	5392.95
ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ 80	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,655257	ПЕНОПЛЭКС КОМФОРТ	6596.27
ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON ECO 75	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,646066	ТЕХНОНИКОЛЬ CARBON ECO	7029.20
URSA XPS СТАНДАРТ N-II-L 70	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,635649	URSA XPS СТАНДАРТ N-II-L	7204.95
URSA XPS N-III-L pro 70	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,635649	URSA XPS N-III-L pro	7693.55
URSA XPS N-III-G3-L 75	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,646066	URSA XPS N-III-G3-L	8706.71
GreenBoard GB1 145	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,603903	GreenBoard GB1	9922.22
ТЕХНОНИКОЛЬ ТЕХНОФАС ЭФФЕКТ 85	4537	Санкт-Петербург	2,5611	2,599613	ТЕХНОНИКОЛЬ ТЕХНОФАС ЭФФЕКТ	12041.67

Рис. 11. Подбор наиболее экономичных вариаций утеплителя  
 Fig. 11. Selection of the most economical variations of insulation

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение энергоэффективности строительных конструкций с каждым годом становится всё более и более актуальным направлением в строительстве [8-13]. В современной жизни теплоизоляционным материалам отводят важное место, так как повышение стоимости энергоресурсов заставляет серьезно задуматься о решении проблем, связанных с энергосбережением [14, 15].

Анализ современных BIM-комплексов показал, что самым востребованным на сегодняшний день является Revit, а его функционал при использовании визуального программирования Dynamo практически безграничен, его возможности ограничены лишь способностями специалиста, работающего в нем. Исходя из этого, подбор энергоэффективных теплоизоляционных материалов целесообразно производить именно в этом программном комплексе с применением визуального программирования Dynamo.

По итогам работы были созданы два скрипта, используя которые можно подобрать теплоизоляционный материал. Результатом работы первого скрипта является полная автоматизация теплотехнического расчета, выполненного в ПК Revit с помощью визуального программирования Dynamo. Итогом работы второго скрипта является подбор различных вариаций утеплителя (толщина, производитель). Все подобранные вариации посчитаны согласно СП 50.13330.2012. Также создана библиотека теплоизоляционных материалов, которую можно дополнять, и копировать из одного проект в другой с помощью стандартного функционала Revit.

Благодаря BIM-технологиям появилась возможность значительно ускорить и упростить процесс подбора утеплителя, а главное избежать ошибок, но для этого необходимо иметь достаточно высокий уровень понимания функционала и особенностей работы в Revit и Dynamo.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Н.В. Преимущество BIM технологии и ее использование в строительстве // Столица науки. 2018. №3. С. 20-26.
2. Дронов Д.С., Киметова Н.Р., Ткаченко В.П. Проблемы внедрения BIM-технологий в России // Синергия наук. 2017. №10. С. 529-549.
3. Eleftheriadis S., Mumovic D. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol 67. Pp. 811-825.

4. Gourlis G., Kovacic I. Building Information Modelling for analysis of energy efficient industrial buildings // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 68. Pp. 953–963.

5. Гилемханов Р.А., Семенов А.А. ПК SCAD Office и BIM-технологии // САПР и графика. 2015. № 6(224). С. 36–38.

6. Городецкий А.С., Лазарев А.А. ЛИРА-САПР - программный комплекс для расчета и проектирования строительных конструкций различного назначения // Новые компьютерные технологии. 2011. Т. 9. № 1(9). С. 22–26.

7. Смакаев Р.М., Низина Т.А. Применение среды визуального программирования Dynamo при разработке проекта здания в Autodesk Revit // Основы экономики, управления и права. 2020. № 2 (21). С. 48-55.

8. Мусорина Т.А., Гамаюнова О.С., Петриченко М.Р. Обоснование конструктивных мероприятий по увеличению энергоэффективности стеновых ограждений // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 11 (110). с. 1269-1277.

9. Куколев М.И., Петриченко М.Р. Определение температурного поля стенки при периодическом тепловом воздействии // В сборнике: Двигатель - 2007. Сборник научных трудов по материалам Международной конференции, посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007. С. 71-75.

10. Korniyenko, S. Evaluation of thermal performance of residential building envelope // Procedia Engineering. 2015. No. 117. Pp. 191–196.

11. Terekh M., Tretyakova D. Primary energy consumption for insulating // В сборнике: E3S Web of Conferences. Key Trends in Transportation Innovation, КТТИ 2019. 2020. С. 06008.

12. Мусорина Т.А., Наумова Е.А., Шонина Е.В., Петриченко М.Р., Куколев М.И. Теплотехнические свойства энергоэффективного материала на основе растительной добавки (сухой борщевик) // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 12. С. 1555-1571.

13. ерех М.Д., Третьякова Д.В., Морозова Н.М. Энергетическая оценка уровня тепловой защиты зданий // В сборнике: Неделя науки СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт. В 3 ч.. отв. ред. Н. Д. Беляев, В. В. Елистратов. 2019. С. 231-233.

14. Чакин Е.Ю. Энергоэффективные теплоизоляционные материалы для ограждающих стеновых конструкций // Инженерные исследования. 2022. № 1(6). с. 9-18.

15. Чакин Е.Ю., Гамаюнова О.С. Современные тенденции повышения энергоэффективности зданий // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 212-215.

## ОБ АВТОРАХ

**Егор Юрьевич Чакин** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: chakin34@gmail.com

**Ольга Сергеевна Гамаюнова** – к.т.н., доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: gamayunova\_os@spbstu.ru

## ABOUT THE AUTHORS

**Egor Yu. Chakin** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: chakin34@gmail.com

**Olga S. Gamayunova** – Ph.D., Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: gamayunova\_os@spbstu.ru



УДК 69

## АНАЛИЗ РАСТЯГИВАЮЩИХ УСИЛИЙ ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА СОЕДИНЕНИЯ АРМАТУРЫ

**Х. Гёркен Ашык**

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

**Аннотация.** Арматурные стержни диаметром 40 мм наиболее распространены в конструкциях атомных электростанций. Соединение арматуры такого диаметра - дорогостоящая и трудоемкая задача. На сегодняшний день основными способами стыковки арматуры являются сварка, вязка арматуры и муфтовые соединения. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. На сегодняшний день актуальным направлением в области железобетона является совершенствование существующих и разработка новых способов соединения стержневой арматуры. Один из подобных модифицированных соединений с использованием стальных реек и стопорных гаек рассматривается в данной статье.

**Ключевые слова:** атомные электростанции, групповое соединение элементов арматуры, растягивающие усилия, компьютерная программа ANSYS, монтаж, гайки, рейки, арматуры.

**Ссылка для цитирования:** Гёркен Ашык Х. Анализ растягивающих усилий инновационного метода соединения арматуры // Инженерные исследования. 2022. №2 (7). С. 22-27. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/22-27.pdf>

## ANALYSIS OF TENSILE FORCES ON INNOVATIVE REINFORCEMENT JOINING METHOD

**H. Gorken Asik**

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

**Abstract.** Rebar with a diameter of 40 mm can be used in foundations and walls of nuclear power plants. Joining such large fittings is a costly and time-consuming task. Today, the main methods for joining fittings are welding, binding of fittings and couplings. Each of the methods has disadvantages and advantages. At the same time, on the installation of reinforcing modules in the design position, a strong constraint is the need for individual joining of hundreds and thousands of rods of adjacent reinforced blocks. Therefore, today the actual direction in the field of reinforced concrete is the improvement of existing and the development of new methods for connecting bar reinforcement. This new method consists of joining large rebars in block form with a nut and rail. The purpose of this article is to see the effect of tensile forces on group connections of longitudinal reinforcement elements, which is a new method, and to find the maximum tensile force that the system can withstand. The ANSYS computer program was used for the analyses.

**Keywords:** nuclear power plants, group joint of reinforcement members, tensile forces, ANSYS computer program, montage, rails, nuts, rebar.

**For citation:** Gorken Asik H. Analysis of tensile forces on innovative reinforcement joining method // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.2 (7). Pp. 22-27. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/22-27.pdf>

## ВВЕДЕНИЕ

В мире насчитывается более 400 атомных электростанций (АЭС). Конструкции атомных станций рассчитаны, в том числе, на восприятие аварийных воздействий, в связи с чем в них возникают существенные усилия. Поэтому широкое применение в железобетонных конструктивных элементах нашли арматурные стержни диаметром 40 мм.

На сегодняшний день основными способами стыковки арматуры являются сварка, вязка и муфтовые соединения. Каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. Допуски в отклонении диаметра арматуры составляют 2-3 мм, на практике же они гораздо больше, что вызывает некоторую путаницу и ошибки монтажа [4].

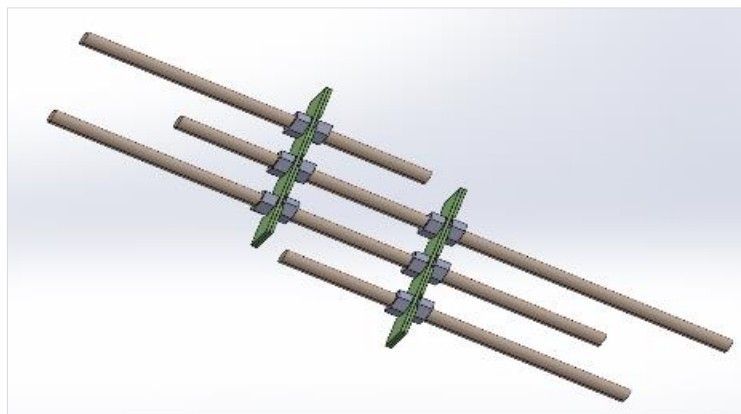
Сварные соединения требуют квалифицированного персонала, вязка арматуры является очень долгим процессом, а в муфтовых соединениях наблюдается снижение прочности ввиду уменьшения площади поперечного сечения арматурных стержней. По всем этим и другим причинам существующие методы соединения арматуры нуждаются в доработке и улучшении [4, 5].

До сегодняшнего дня многие ученые и исследователи работали над модифицированием механических соединений арматурных стержней в конструкциях АЭС [6-8]. Ими, в частности, отмечается, что именно механические соединения являются наиболее прогрессивные из существующих способов соединения арматурных и, в первую очередь, перспективны соединения с резьбовыми и винтовыми муфтами. Их основными достоинствами являются эксплуатационная надежность, равнопрочность с исходным сечением стержней, высокая степень индустриальности, независимость качества от пространственного положения стыка, погодных условий [9, 10].

При строительстве современных АЭС целесообразным является применение индустриальных методов с использованием укрупненных армоопалубочных модулей, изготавливаемых в промышленных условиях, что, кроме прочего, сокращает время сборки и позволяет получить экономический эффект. В настоящей статье представлен новый метод группового механического соединения арматурных стержней в железобетонных конструкциях АЭС.

## МЕТОД СОЕДИНЕНИЯ АРМАТУРНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ПОМОЩИ СТАЛЬНЫХ РЕЕК И СТОПОРНЫХ ГАЕК

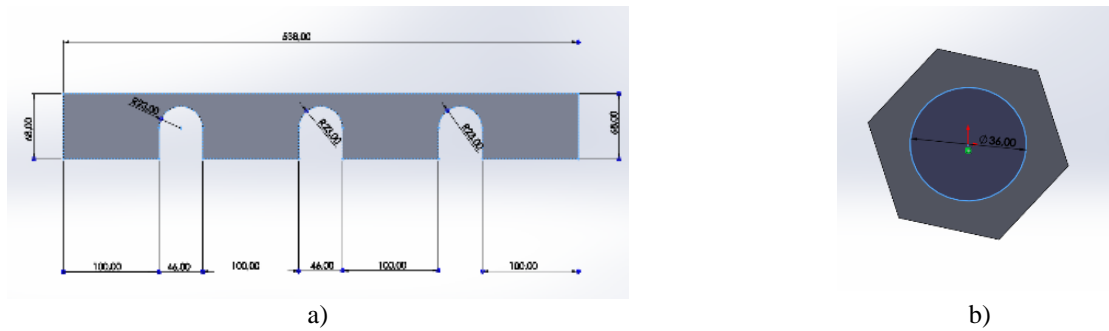
Автором модифицированного метода соединения арматурных стержней с использованием стальных реек и стопорных гаек является Вячеслав Вячеславович Белов. Конструкция соединения включает в себя три основных элемента: продольные стержни арматуры, стальные рейки, стопорные гайки (рис.1).



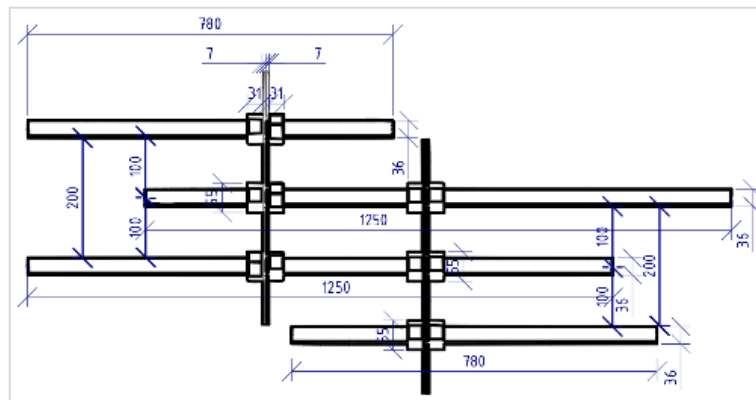
**Рис. 1.** Модель блочной системы  
**Fig. 1.** Block system model

Суть конструкции соединения заключается в том, чтобы зафиксировать концы арматурных стержней и не допустить их смещения, обеспечив при этом равнопрочность, жесткость и надежность соединения как на стадии изготовления, так и при транспортировке и монтаже независимо от изменения температурных условий [4].

Размеры системы были определены на основе анализа и обобщения опыта применения подобных соединений (рис.2, рис.3).



**Рис. 2.** Размеры элементов модели: а – Размеры рейки; б – Размеры гайки  
**Fig. 2.** Model dimensions: a – Dimension of rail; b – Dimension of nut



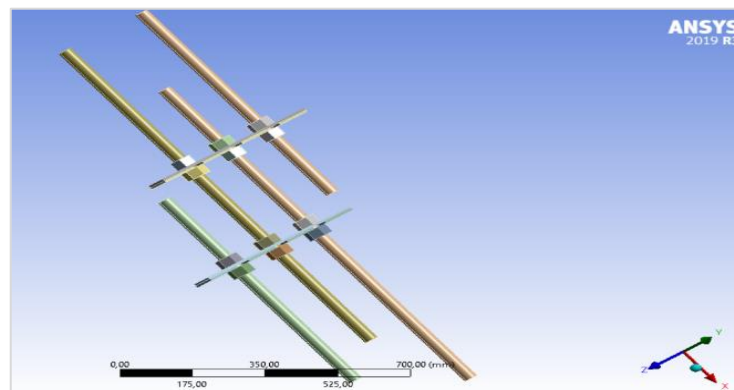
**Рис. 3.** Размеры всей модели  
**Fig. 3.** Model dimensions

В качестве первого приближения были выбраны следующие параметры (рис.4, рис.5):

- толщина рейки: 7 мм;
- высота рейки: 68 мм;
- диаметр отверстия в рейке: 55 мм;
- внешний диаметр стопорной гайки: 55 мм;
- толщина стопорной гайки: 31 мм;
- диаметр арматуры: 36 мм;
- шаг арматуры 200мм;
- расстояние между рейками: 500 мм.

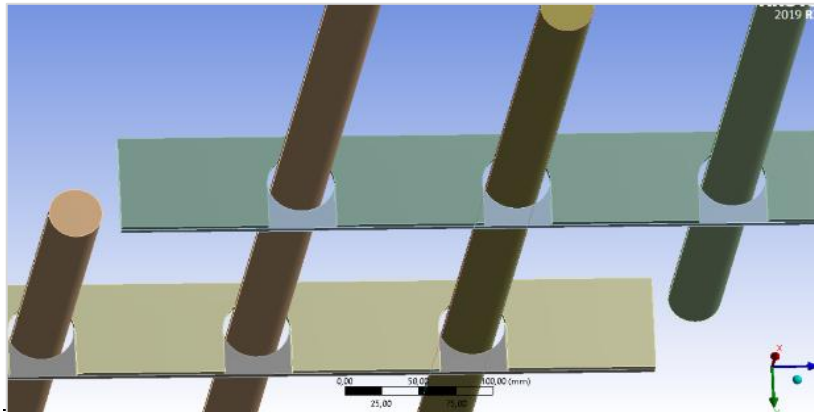
Арматурные стержни приняты класса А500.

Максимальная нагрузка, которую может выдержать система, была найдена путем приложения растягивающей силы к обоим концам каждого из арматурных стержней. Для этого были исследованы растягивающие напряжения и перемещения системы, а также проверено, как система будет деформироваться. Для анализа использовалась комплекс конечноэлементного моделирования ANSYS.



**Рис. 4.** Назначение материалов  
**Fig. 4.** Assigning materials





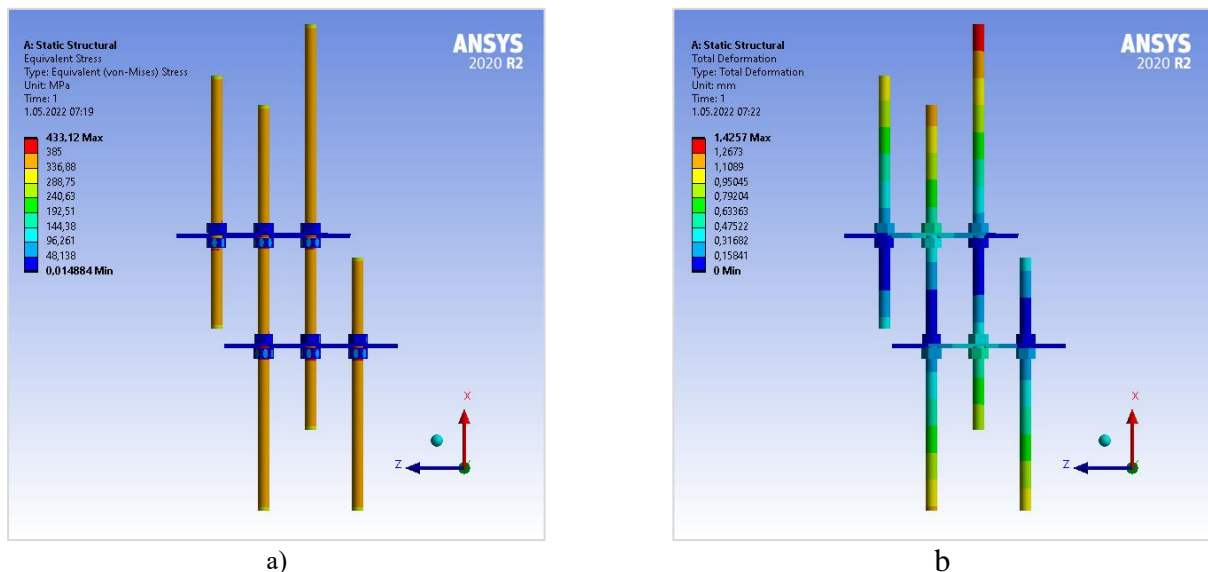
**Рис. 5.** Размещение реек и стержней  
**Fig. 5.** Placement of rails and rebar

Соединение арматурных стержней и стопорных гаек в расчетной модели принято жестким, по контакту арматурных стержня и рейки, и реек между собой, реек и стопорных гаек задавалось трение. Коэффициент трения принят равным 0,15.

Осевая растягивающая сила 155 т приложена к обоим концам каждого из стальных арматурных стержней. Кроме этого, задавалась промежуточная нагрузка 50 т и 100 т

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Выборочные результаты расчета представлены на рис.6 и в табл.1.



**Рис. 6.** Напряжения: а – Растягивающие напряжения: б – перемещения  
**Fig. 6.** Stress: a - Tensile stress: b - Deformation

Таблица 1. Результаты расчета  
 Table 1. Load results

№	Сила F (Т)	Перемещения (mm)	Растягивающее напряжение (МПа)
1	50	0,46	140
2	100	0,91	279
3	155	1,43	433

Напряжения 435 МПа (больше расчетного сопротивления для арматуры А500) будут достигаться при нагрузке 155 Т.

### АНАЛИЗ ПРИ ОТСУТСТВИИ НЕСКОЛЬКИХ ГАЙЕК

Для влияния гаек на систему были выполнены расчеты при отсутствии 4 и 6 гаек. Результаты расчета представлены на рис.7, рис. 8 и сведены в табл. 2. Анализ результатов расчета показывает, что отсутствие 4 и 6 гаек практически не влияет на систему. Однако очевидно, что надежность подобной системы уменьшается.

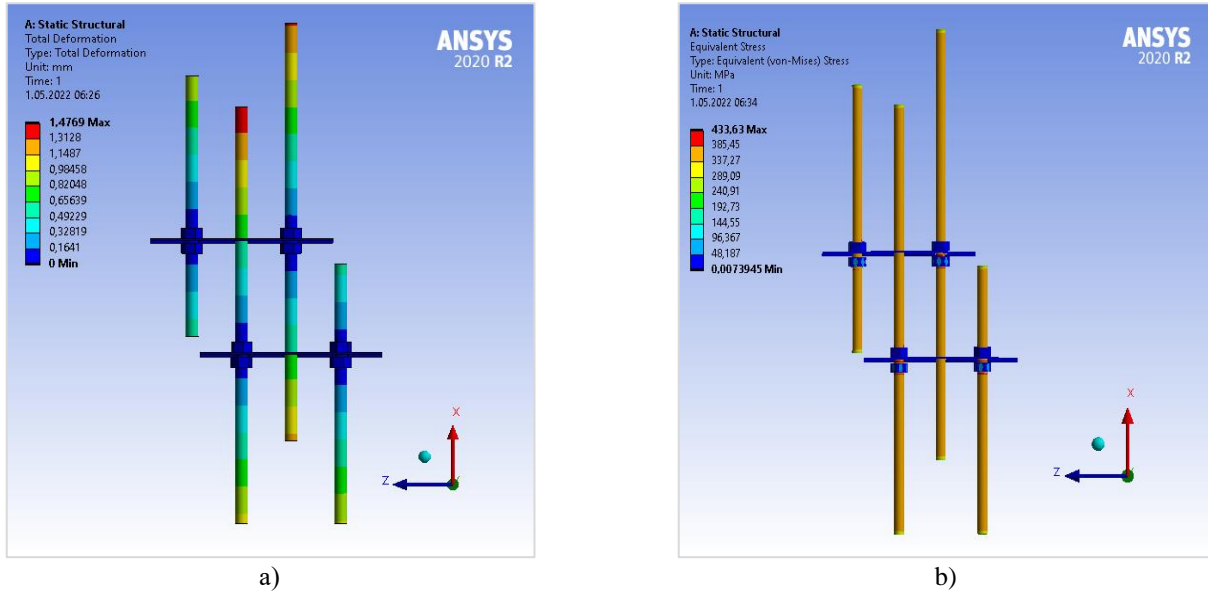


Рис. 7. Результаты анализа: а – Растягивающее Напряжение; б – Перемещение  
 Fig. 7. Analysis results: a – Tensile Stress; b – Deformation

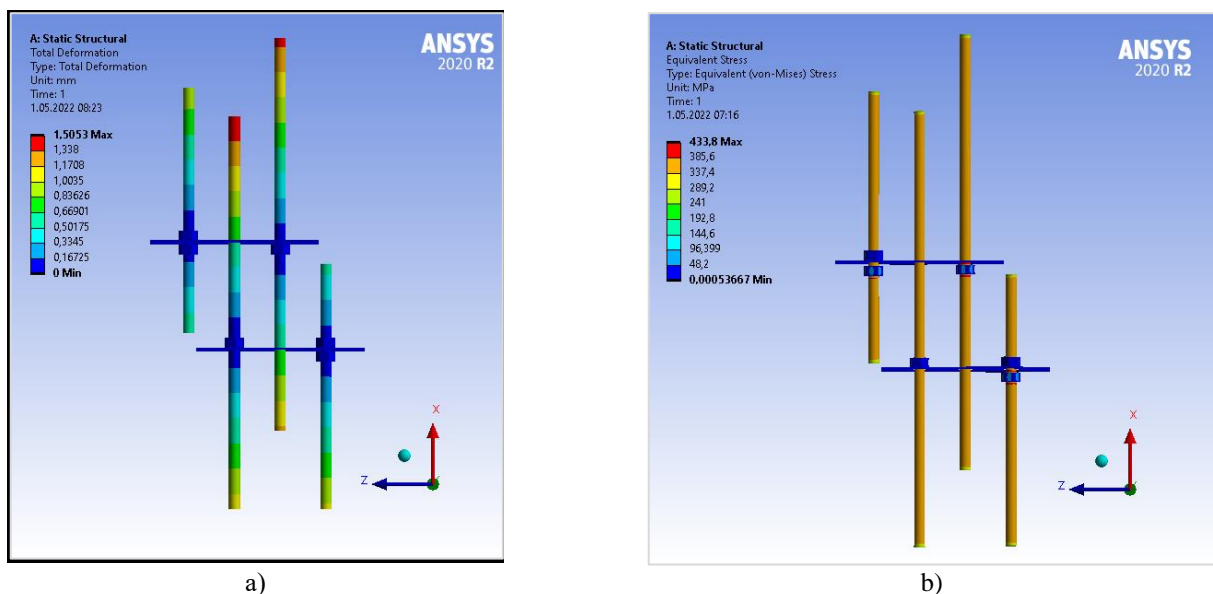


Рис. 8. Результаты анализа: а – растягивающее напряжение; б – перемещение  
 Fig. 8. Analysis results: a – tensile stress; b – deformation

Таблица 2. Результаты расчета при отсутствии гаек  
 Table 2. Results after removing nuts

№	Гайки (штука)	Сила F (Т)	Перемещения (mm)	Растягивающее напряжение (МПа)
1	с 12 гайками	155	1,43	433,12
2	с 8 гайками (удаляем 4 гаек)	155	1,48	433,63
3	с 6 гайками (удаляем 6 гаек)	155	1,51	433,80

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были проведены исследования нового метода соединения продольных арматурных стержней с использованием стальных реек и стопорных гаек элементов в виде блоков. Исследования подтвердили надежность данного вида соединения. Так, отсутствие 4 и 6 гаек практически не повлияло на систему. Однако очевидно, для обеспечения надежности подобной системы требуется полная комплектность элементов, входящих в нее.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mishra U. C. Environmental impact of coal industry and thermal power plants in India // Journal of Environmental Radioactivity. 2004. № 72. С. 35-40.
2. Torjman M., Shaaban H. Nuclear energy as a primary source for a clean hydrogen energy system // Energy Conversion and Management. 1998. № 39. С. 27-32.
3. Harte R., Höffer R., Krätzig W. B., Mark P., Niemann H. Solar updraft power plants: Engineering structures for sustainable energy generation // Engineering Structures. 2013. № 56. С.1698-1706.
4. Прохорова И. Н. Групповой стык продольной арматуры с анкерными рейками и стопорными гайками [электронный ресурс]: выпускная квалификационная работа магистра: 08.04.01 - Строительство; 08.04.01\_20 Проектирование и расчет строительных конструкций и оснований / Санкт-Петербург. 2020. URL: <https://elibr.spbstu.ru/dl/3/2020/vr/vr20-4491.pdf>
5. Прохорова И. Н., Павлов А. А. Сравнительный анализ различных способов соединения арматурных стержней // Journal of Chemical Information and Modeling. 2013. № 53 (9). С. 1689–1699.
6. Афров А. М., Андрушечко С. А., Украинцев В. Ф., Васильев Б. Ю., Косоуров К. Б., Семченков Ю. М., Кокосадзе Э. Л., Иванов Е. А. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность. // Университетская книга. 2006. С. 488-491.
7. Андрушечко С. А., Афров А. М., Васильев Б. Ю., Генералов В. Н., Косоуров К. Б., Семченков Ю. М., Украинцев В. Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 // Логос. 2010. С. 604.
8. Овчинников Ф. Я., Семёнов В. В. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов // Энергоатомиздат. 1988. С. 359.
9. Белов В. В. Способ группового бессварного соединения продольной стержневой арматуры при монтаже укрупненных армопалубочных блоков сложных технических объектов из монолитного железобетона. Пат. 2736587 Российская Федерация, МПК E04B 1/38 (2006.01), E04C 5/18 (2006.01); заявитель и патентообладатель Акционерное общество "Научно-исследовательский и проектно- конструкторский институт энергетических технологий "АТОМПРОЕКТ". № 202011689; заявл. 20.03.20; опубл. 18.11.20, Бюл. № 32. 13 с.: ил.
10. Chiari V. G., Moreno Junior, A. L. Experimental evaluation of coupler behavior for mechanical rebar splices in reinforced concrete structures// Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2018. № 11(6). С 1326-1353.

## ОБ АВТОРАХ

**Хатидже Гёркен Ашык** – студентка. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: [haticegorken@gmail.com](mailto:haticegorken@gmail.com)

## ABOUT THE AUTHORS

**Hatic Gorken Asik** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: [haticegorken@gmail.com](mailto:haticegorken@gmail.com)

УДК 624.07

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МОНОЛИТНОГО КАРКАСА ЗДАНИЯ С СИСТЕМОЙ «DIAGRID»

С.В. Ли<sup>1</sup>, О.С. Гамаюнова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

**Аннотация.** Строительство многоэтажных зданий уже давно перестало быть грандиозным событием. Назрела необходимость придания внешнему облику многоэтажных зданий уникальности и выразительности, которые контрастировали бы с невыразительной застройкой и диктовали архитектурный стиль улицам. Ввиду этого, одним из главных архитектурных вопросов при проектировании и строительстве зданий повышенной этажности является поиск способов достичь динамичности фасадных систем, придерживаясь как архитектурных и конструктивных требований, так и экономических. В статье представлен сравнительный анализ двух вариантов усиления конструкции многоэтажного здания: увеличение сечения стен ядра жесткости и включение в фасадную систему дополнительных металлических профилей, составляющих треугольную систему «Diagrid». Анализируются такие показатели как: экономичность, эффективность работы несущих конструкций и архитектурная составляющая. Объект исследования представляет собой односекционное многоэтажное здание научно-исследовательского института. В статье приведены результаты расчета усилий и деформаций модели с металлическим каркасом, результаты армирования и расчета усилий здания, дана оценка материалоемкости работ по устройству конструкций здания, а также стоимости производства работ для двух вариантов.

**Ключевые слова:** многоэтажные здания, уникальные здания, строительные конструкции, Diagrid, фасадные системы, сетчатая несущая конструкция, железобетонные конструкции, металлические конструкции, SCAD, Revit, предельные перемещения, колонны, балки, плиты перекрытия, ростверк, сваи, деформации, армирование.

**Ссылка для цитирования:** Ли С.В., Гамаюнова О.С. Напряженно-деформированное состояние монолитного каркаса здания с системой «Diagrid» // Инженерные исследования. 2022. №2 (7). С. 28-41. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/28-41.pdf>

## STRESS-STRAIN STATE OF A MONOLITHIC BUILDING FRAME WITH THE «DIAGRID» SYSTEM

S.V. Li<sup>1</sup>, O.S. Gamayunova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

**Abstract.** The construction of high-rise buildings has long ceased to be a grandiose event. There is a need to give the appearance of high-rise buildings uniqueness and expressiveness, which would contrast with the inexpressive buildings and dictate the architectural style of the streets. In view of this, one of the main architectural issues in the design and construction of high-rise buildings is to find ways to achieve the dynamism of facade systems, adhering to both architectural and structural requirements, as well as economic ones. The article presents a comparative analysis of two options for strengthening the structure of a high-rise building: an increase in the section of the walls of the core of rigidity and the inclusion of additional metal profiles in the facade system that make up the triangular Diagrid system. Such indicators as: profitability, efficiency of load-bearing structures and architectural component are analyzed. The object of study is a single-section high-rise building of a research institute. The article presents the results of calculating the forces and deformations of a model with a metal frame, the results of reinforcement and calculation of building forces, an assessment of the material consumption of work on the arrangement of building structures, as well as the cost of work for two options.

**Keywords:** high-rise buildings, unique buildings, building structures, Diagrid, facade systems, mesh load-bearing structure, reinforced concrete structures, metal structures, SCAD, Revit, limit displacements, columns, beams, floor slabs, grillage, piles, deformations, reinforcement.

**For citation:** Li S.V., Gamayunova O.S. Stress-strain state of a monolithic building frame with the «Diagrid» system // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.2 (7). Pp. 28-41. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/28-41.pdf>

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из современных тенденций формирования комфортной городской среды в настоящее время является возведение небоскребов [1-5]. На сегодняшний день город Санкт-Петербург является бурно растущим и развивающимся мегаполисом, несмотря на многие ограничения, связанные с высотой зданий, погодными, грунтовыми и архитектурными условиями. Вследствие этого исторический центр и новые районы города сильно отличаются своими архитектурными стилями: старая итальянская школа архитектуры сменяется на многоэтажную застройку жилыми кварталами, не отличающимися оригинальностью исполнения. Это является поводом для того, чтобы поменять подход к многоэтажному строительству Санкт-Петербурга в пользу лаконичных и уникальных фасадных решений, которые позволят придать новым улицам эстетическое своеобразие.

Новым строительным объектам присущи экологичность, многофункциональность, высотность и оригинальность исполнения, чему, в частности, способствует возведение высотных зданий с использованием диагональных сетчатых несущих конструкций - Diagrid structures [6-11,14-17] или диагонально-сетчатые оболочковые конструктивные системы [12,13,21]. В таких конструкциях привычные вертикальные несущие элементы, колонны, по периметру здания заменяются наклонными элементами, образующими структурную оболочку здания с характерным ромбовидным узором.

В своих работах Panchal N.B., Patel V.R., Pandya I.I., Srisangeerthan S., Hashemi M.J., Rajeev P., Gad E., Fernando S. описали различные особенности строительства высотных зданий с использованием системы «Diagrid» [18, 19]:

1. отсутствие ограничения по высотности для данной конструкции;
2. все элементы системы включены в работу и воспринимают нагрузки как горизонтальные, так и вертикальные, позволяя в некоторых ситуациях вовсе отказаться от ядер жесткости и дополнительных вертикальных диафрагм;
3. эффективность работы оболочки «Diagrid» обеспечена за счет работы конструкций межэтажных узлов, через которые и передается нагрузка на здание, даже при условиях сложной формы и конфигурации небоскреба;
4. устойчивость системы должна быть обеспечена наличием кольцевой балки (затяжки), выполненной в виде горизонтального стержня в уровне узлов соединения элементов; данная балка воспринимает растягивающие нагрузки, не давая ромбовидной оболочке потерять свою форму;
5. рекомендуемый наиболее экономичный и эффективный в плане восприятия нагрузок угол между наклонными элементами и горизонталью для здания высотой 24 этажа лежит в диапазоне  $65^{\circ}$ – $75^{\circ}$ . При увеличении высотности проектируемого небоскреба угол увеличивается.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проектируемый объект - односекционное многоэтажное административное здание с подземной двухэтажной автостоянкой. Количество надземных этажей – 24, из которых 13 и 24 этажи – технические. Высота здания от уровня земли до верха кровли составляет 74,9 м.

В плане здание имеет сложную эллипсоидную форму. Размеры здания в осях 45,6х26,1 м. Подземная часть здания имеет прямоугольную форму с размерами в осях 40х24 м.

Характеристика здания:

- класс функциональной пожарной опасности многофункционального здания Ф4.3;
- класс функциональной пожарной опасности подземной автостоянки Ф5.2;
- класс конструктивной пожарной опасности –С0.

Несущие элементы:

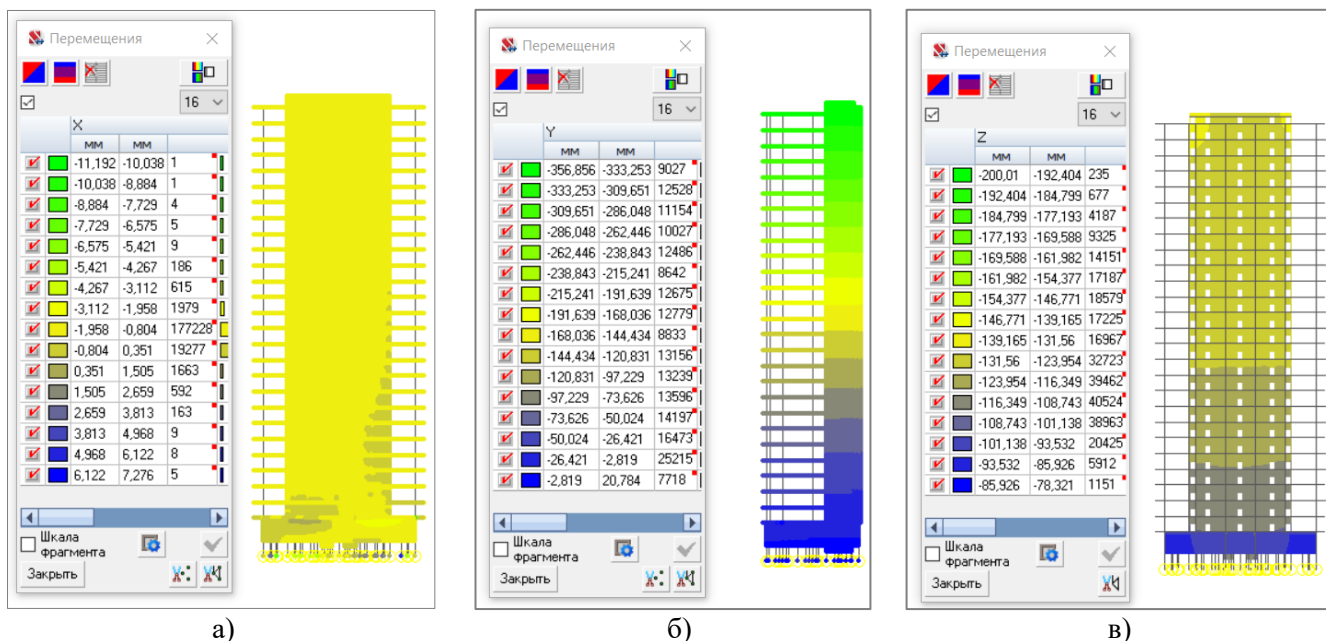
- балки 400х400 мм;
- колонны 400х400 мм и 800х800 мм;
- стены ядра жесткости 200 мм;
- перекрытия 200 мм;
- ростверк 1200 мм;
- сваи D=750мм.

Первоначально запроектированный объект имел горизонтальные деформации недопустимые согласно СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия.

Предельное горизонтальное перемещение конструкции определяется как  $h/500$ . При высоте конструкций здания  $h=74,9$  м, предельный крен равен:  $h/500=74,9/500=0,150$  м=150 мм.

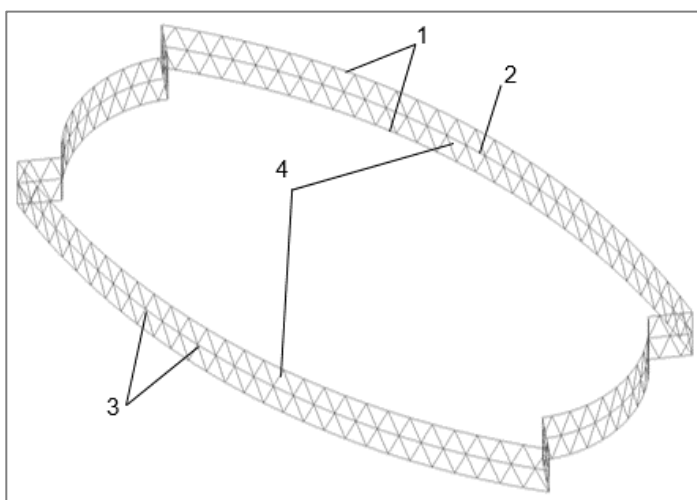
На рис.1 представлены предельные перемещения по направлениям X, Y, Z.





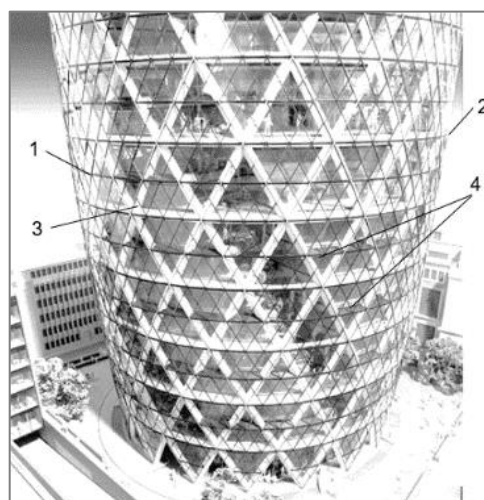
**Рис. 1.** Перемещения конструкции: а – по направлению X; б – по направлению Y; в – по направлению Z  
**Fig. 1.** Movements of the structure: a - in the X direction; b - in the direction Y; c - in the Z direction

Для уменьшения горизонтальных деформаций многоэтажного здания было предложено введение дополнительных металлических конструкций по фасаду здания, которые будут представлять собой треугольную решетку. Схематическое изображение сетки типового этажа в ПК SCAD представлено на рис. 2, а на рис.3 представлены элементы системы на примере существующего здания.



**Рис. 2.** Металлический каркас системы «Diagrid» в ПК SCAD: 1-кольцевые балки, соединенные с плитой перекрытия; 2-кольцевая балка межэтажная; 3-узлы; 4-наклонные элементы

**Fig. 2.** Metal frame of the "Diagrid" system in PC SCAD: 1-ring beams connected to the floor slab; 2-ring interfloor beam; 3-nodes; 4-inclined elements

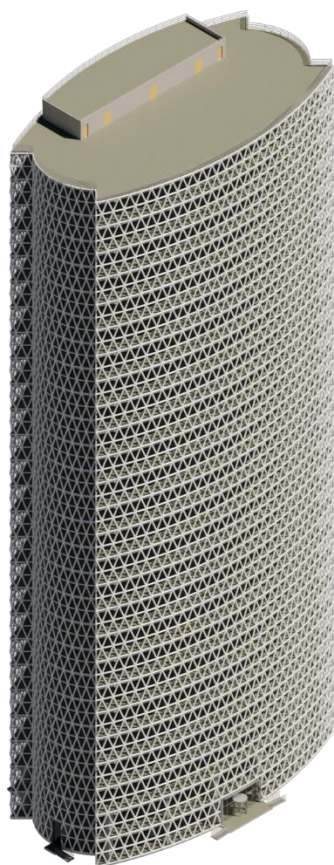


**Рис. 3.** Металлический каркас системы «Diagrid»: 1-кольцевые балки, соединенные с плитой перекрытия; 2-кольцевая балка межэтажная; 3-узлы; 4-наклонные элементы [6]

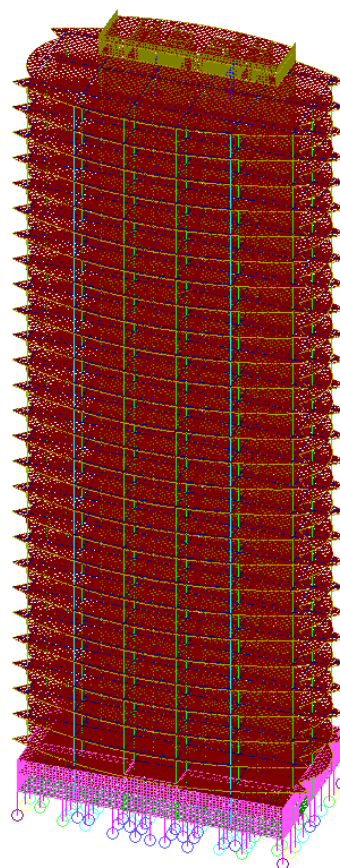
**Fig. 3.** Metal frame of the Diagrid system: 1-ring beams connected to the floor slab; 2-ring interfloor beam; 3-nodes; 4-inclined elements

На первом этапе исследования была создана модель многоэтажного здания в ПК Revit (рис.4), а также собраны нагрузки с учетом назначения здания (здание научно-исследовательского института). Первоначальная модель содержала в себе только железобетонные несущие конструкции: ядро жесткости, колонны, балки, плиты перекрытия, ростверк и сваи.

Следующий этап включает перенос модели в ПК SCAD (рис.5.) и приложение нагрузок на здание. Также в проекте заданы характеристики грунтов основания и их взаимодействие со свайным фундаментом здания.



**Рис. 4.** Модель здания в ПК Revit  
**Fig. 4.** Building model in PC Revit



**Рис. 5.** Модель здания в ПК SCAD  
**Fig. 5.** Building model in PC SCAD

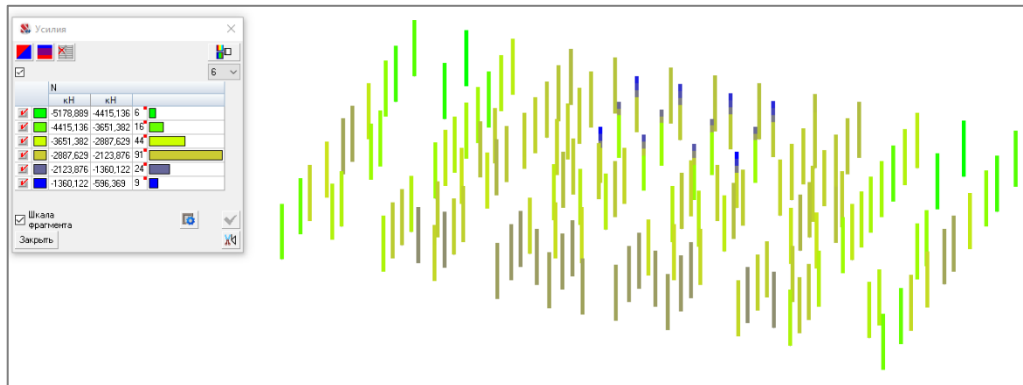
После получения результатов расчета следует анализ усилий и деформаций конструкций. Усилия в несущих конструкциях позволяют зданию функционировать в нормальном режиме. Деформации продавливания и осадки не превышают предельно допустимых значений. Отклонение здания по оси Y имеет значения большие, чем критические (рис.1).

На третьем этапе рассмотрены два варианта решения проблемы повышенных деформаций: увеличение сечения стен ядра жесткости и введение дополнительных металлоконструкций. Модель системы «Diagrid» построена согласно методике Анохина Н.Н. [20], что исключает появление моментов в узлах конструкции. Увеличение угла между наклонным элементом и горизонтальной плоскостью влечет за собой увеличение количества и общей длины наклонных элементов, что приведет к большим затратам металла, но уменьшает растягивающие и сжимающие усилия в конструкции треугольной решетки. Был подобран оптимальный угол наклонного элемента к горизонтальной плоскости для проектируемого объекта -  $68,7^\circ$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

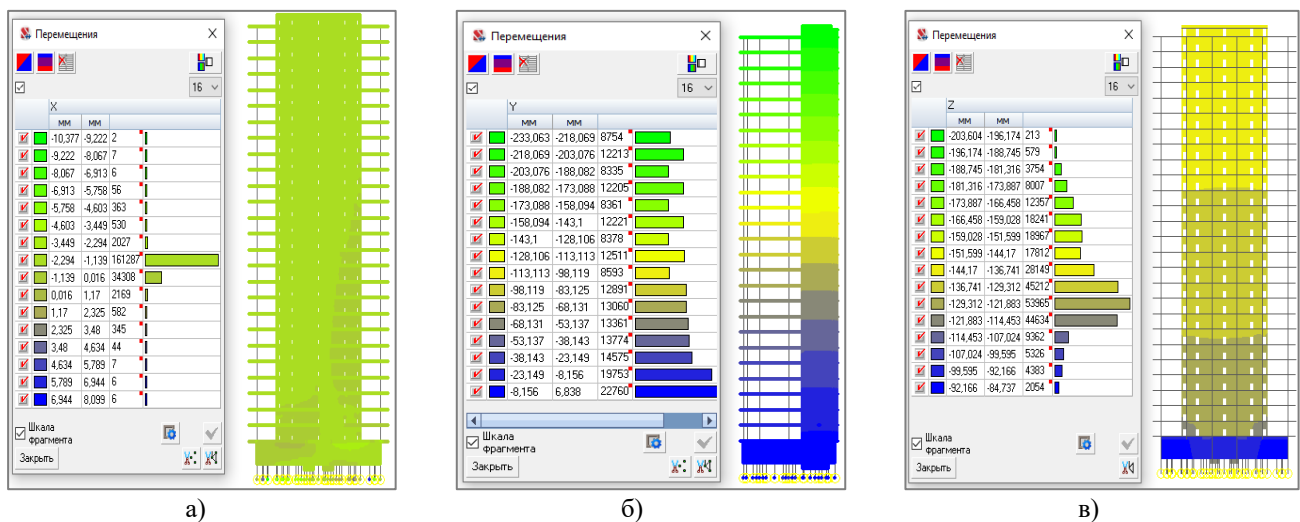
### Модель со стенами 300 мм

В этом случае увеличение сечения повлечет за собой изменения в архитектуре внутри здания, что приведет к уменьшению полезной площади. Также из-за увеличения жесткостных характеристик ядра распределение нагрузок на сваи будет более равномерным. Но вследствие значительного увеличения сечения возрастет собственный вес стен, что приведет к росту усилий в сваях (рис.6.), который спровоцирует повышение площади требуемого армирования. Увеличение нагрузок также приведет к изменениям полей армирования ростверка и к приросту требуемой площади армирования.



**Рис.6.** Усилия N в сваях модели со стенами 300 мм  
**Fig.6.** Forces N in piles of the model with 300 mm walls

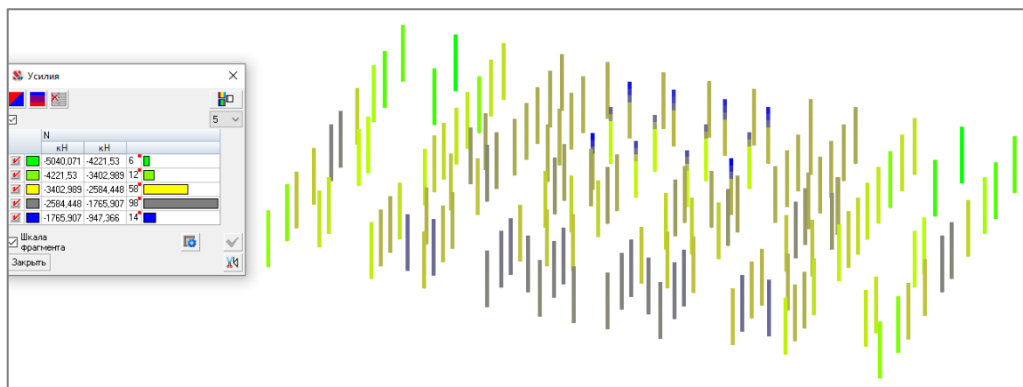
Перемещения конструкции при увеличении толщины стен ядра жесткости: по X - уменьшились на 10%; по Y - уменьшились на 45%. Деформации лежат в допустимых пределах. Перемещения по направлению Z в среднем увеличились на 4 % (рис.7).



**Рис.7.** Перемещения конструкции: а - по направлению X; б – по направлению Y; в – по направлению Z  
**Fig.7.** Movements of the structure: a - in the X direction; b - in the direction Y; c - in the Z direction

### Модель с системой «Diagrid»

В этом случае значительно увеличится расход металла, но сохранится архитектура, так как фасадное остекление включает в себя металлические профили, которые могут менять свое сечение в зависимости от результатов расчета. Результаты армирования свай, ростверка и колонн показали значения, отличающиеся от первой модели на величину до 20% (рис.8).



**Рис.8.** Усилия N в сваях модели с системой «Diagrid»  
**Fig.8.** Forces N in piles of the model with the "Diagrid" system



Перемещения конструкции при введении системы «Diagrid»: по X - уменьшились на 30%; по Y - уменьшились на 85%. Деформации лежат в допустимых пределах. Перемещения по направлению Z в среднем не изменились (рис.9).

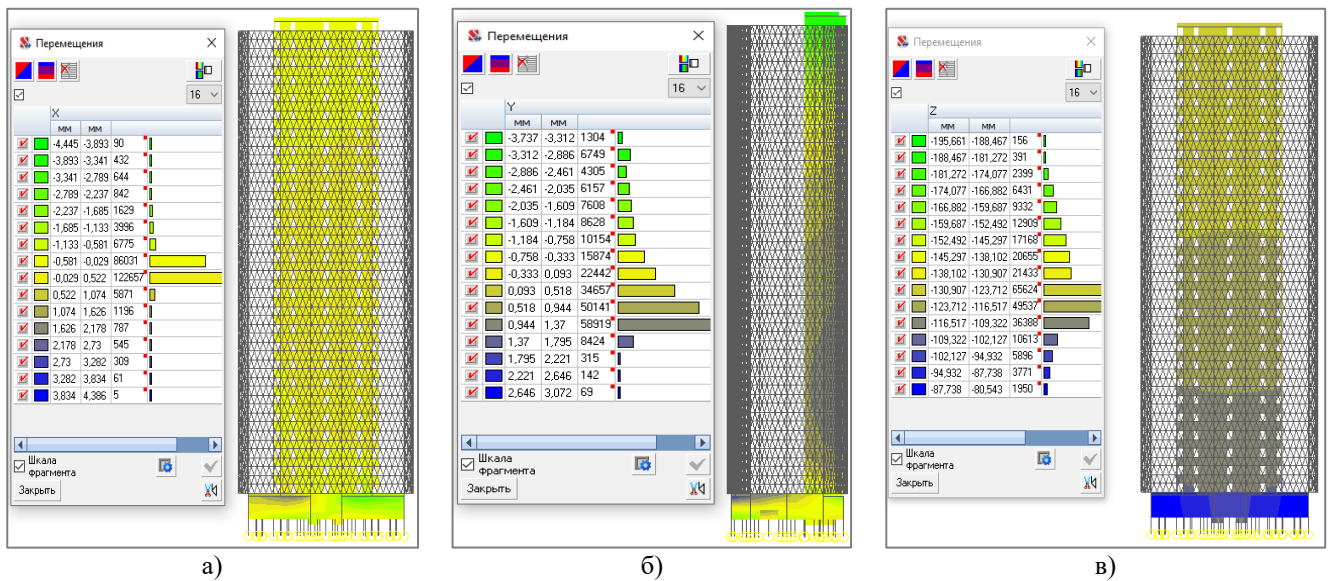


Рис.9. Перемещения конструкции: а - по направлению X; б – по направлению Y; в – по направлению Z  
 Fig.9. Movements of the structure: a - in the X direction; b - in the direction Y; c - in the Z direction

### Сравнение полей армирования конструкций

#### 1. Армирование здания со стеной 300 мм. Стены ядра жесткости.

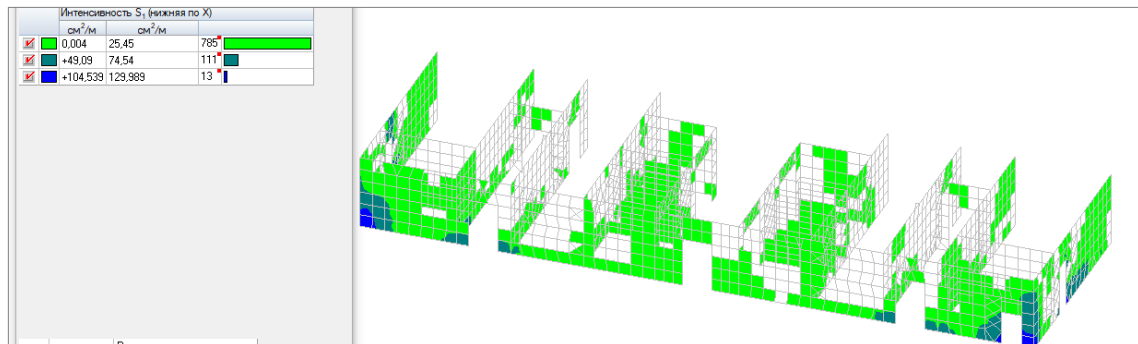


Рис.10. Армирование внутреннее по X  
 Fig.10. Reinforcement internal along X

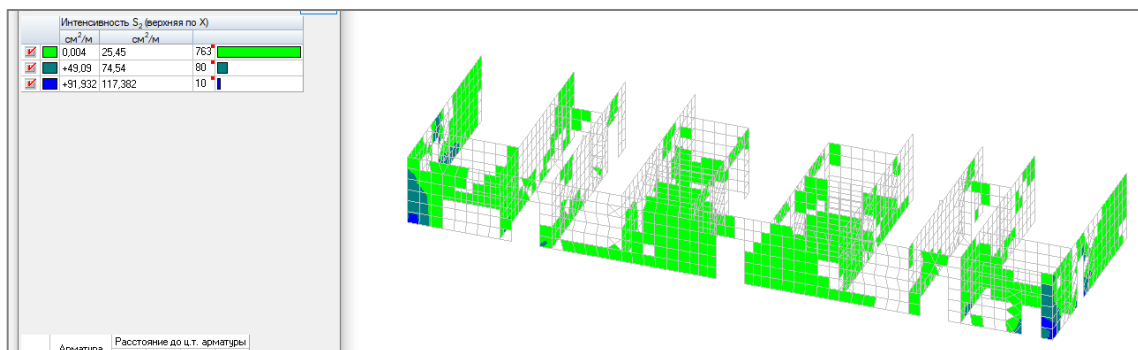
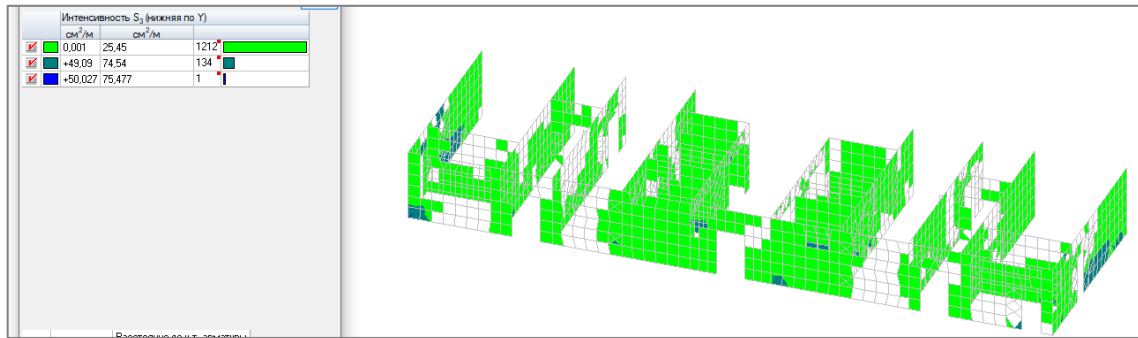
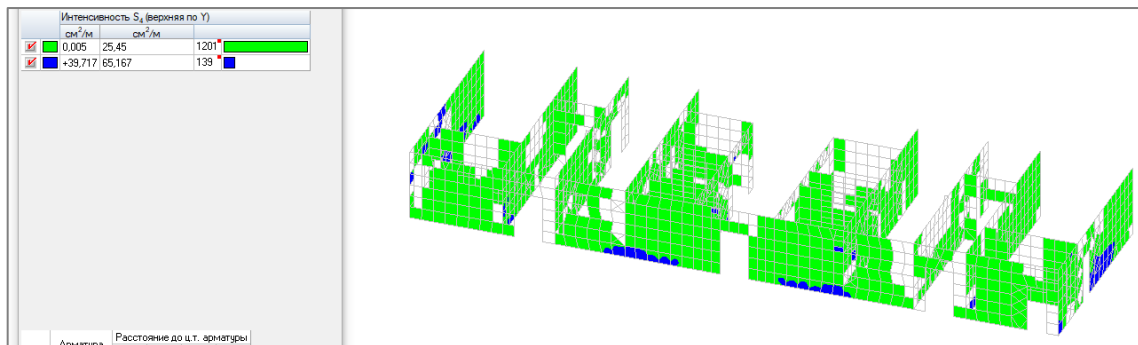


Рис.11. Армирование внешнее по X  
 Fig.11. External reinforcement along X



**Рис.12.** Армирование внутреннее по Y  
**Fig.12.** Reinforcement internal along Y

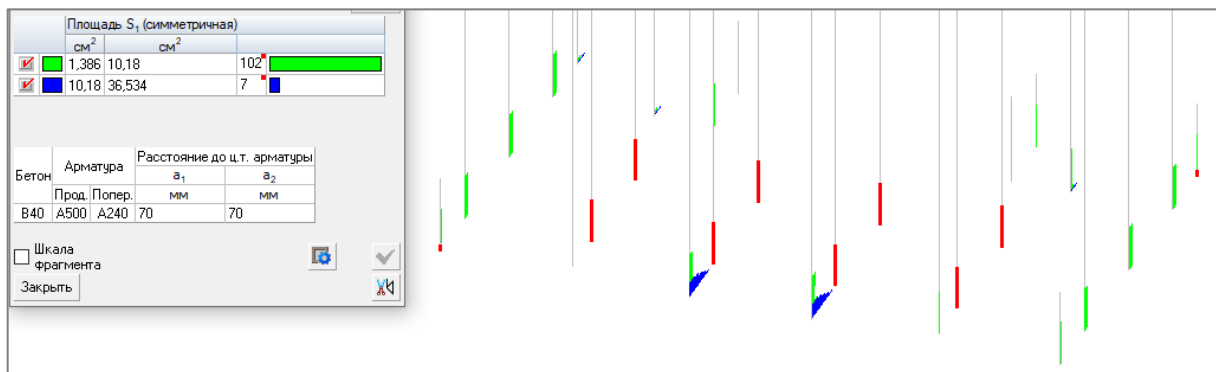


**Рис.13.** Армирование внешнее по Y  
**Fig.13.** External reinforcement along Y

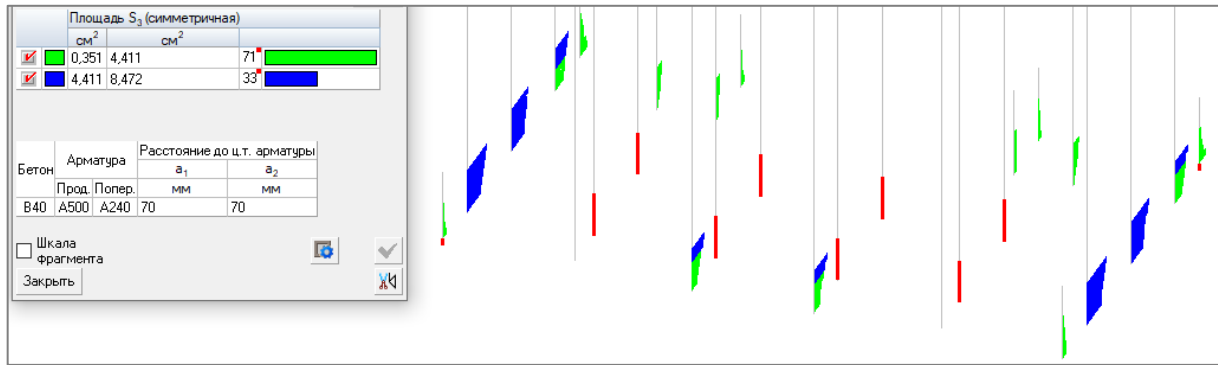
Таблица 1. Армирование стены  
 Table 1. Wall reinforcement

-	$A_{\text{Фон}}$	$A_{\text{усилен.1}}$	$A_{\text{усилен.2}}$
Внутренняя в направлении X ( $S_1$ )	$\varnothing 18$ A500 – 100 мм	$\varnothing 25$ A500 – 100 мм	$\varnothing 36$ A500 – 100 мм
Внешняя в направлении X ( $S_2$ )	$\varnothing 18$ A500 – 100 мм	$\varnothing 25$ A500 – 100 мм	$\varnothing 36$ A500 – 100 мм
Внутренняя в направлении Y ( $S_3$ )	$\varnothing 18$ A500 – 100 мм	$\varnothing 25$ A500 – 100 мм	$\varnothing 36$ A500 – 200 мм
Внешняя в направлении Y ( $S_4$ )	$\varnothing 18$ A500 – 100 мм	$\varnothing 25$ A500 – 100 мм	-

## 2. Армирование здания со стеной 300 мм. Колонны



**Рис.14.** Армирование продольное  
**Fig.14.** Longitudinal reinforcement

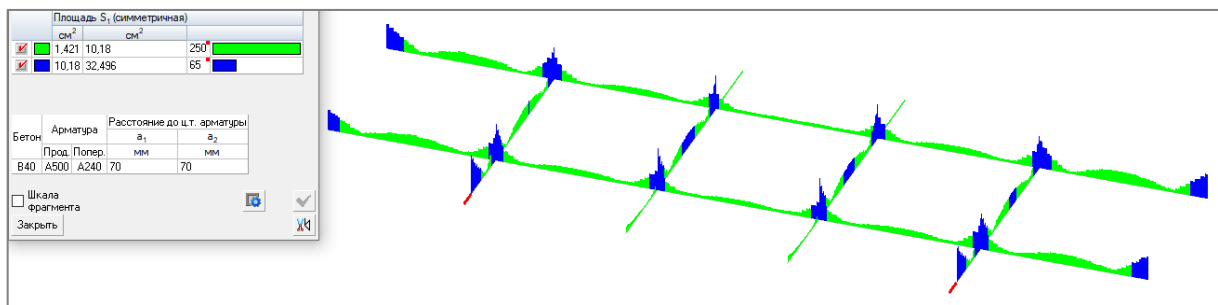


**Рис.15. Армирование поперечное**  
**Fig.15. Transverse reinforcement**

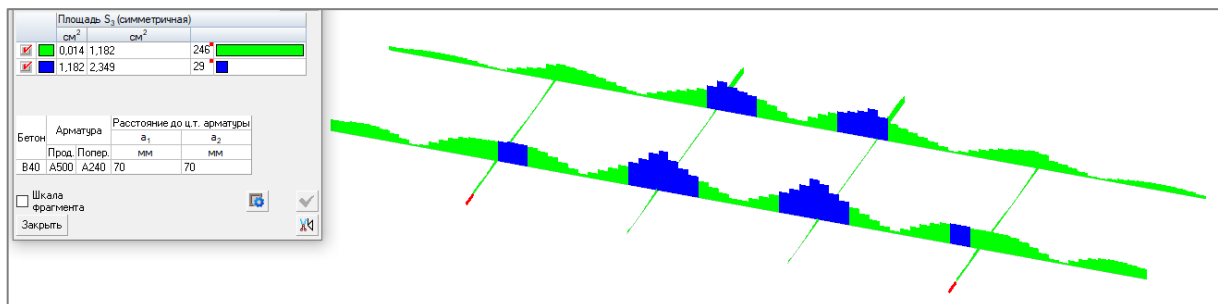
Таблица 2. Армирование колонн  
 Table 2. Column reinforcement

	$A_{Фон}$	$A_{усилен.1}$
Продольное ( $S_1$ )	4Ø18 A500	4Ø32 A500
Поперечное ( $S_3$ )	Ø12 A500	-

### 3. Армирование здания со стеной 300 мм. Балки



**Рис.16. Армирование продольное**  
**Fig.16. Longitudinal reinforcement**



**Рис.17. Армирование поперечное**  
**Fig.17. Transverse reinforcement**

Таблица 3. Армирование балок  
 Table 3. Beam reinforcement

	$A_{Фон}$	$A_{усилен.1}$
Продольное ( $S_1$ )	4Ø18 A500	4Ø32 A500
Поперечное ( $S_3$ )	Ø12 A500	-

#### 4. Армирование здания со стеной 300 мм. Плиты перекрытий

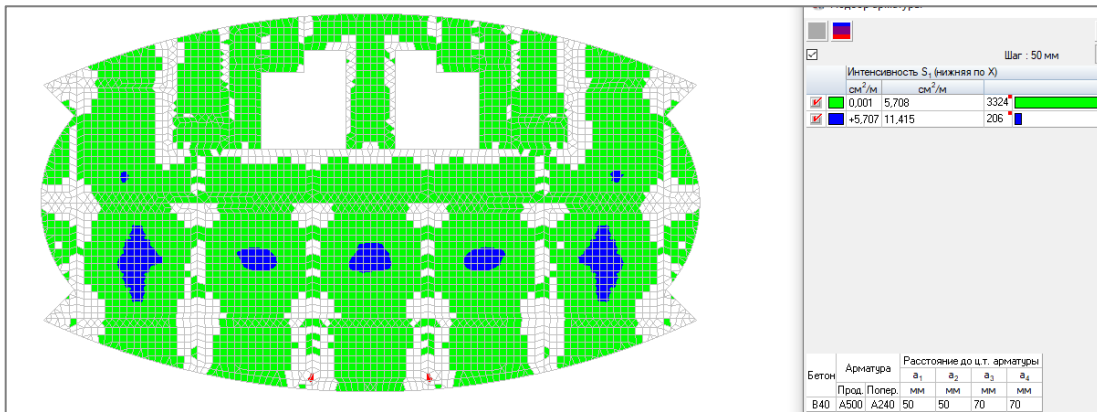


Рис.18. Армирование внутреннее по X  
 Fig.18. Reinforcement internal along X

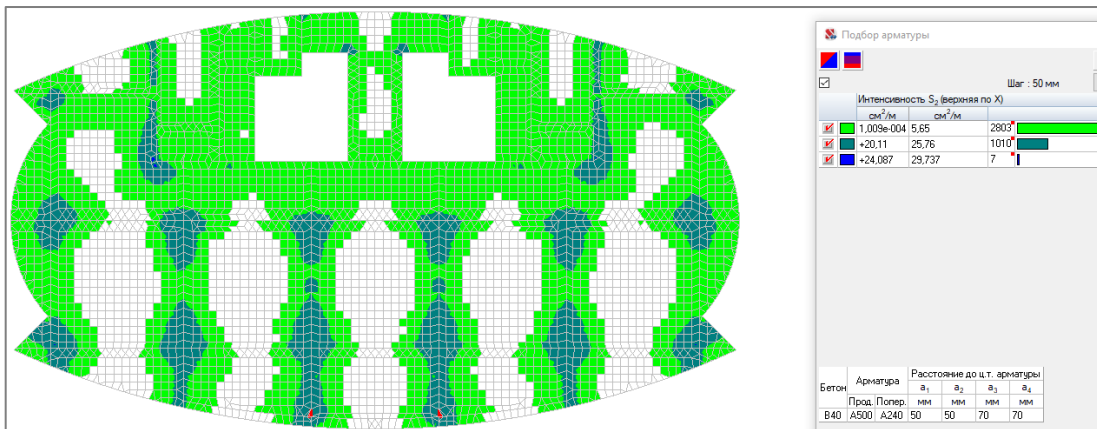


Рис.19. Армирование внешнее по X  
 Fig.19. External reinforcement along X

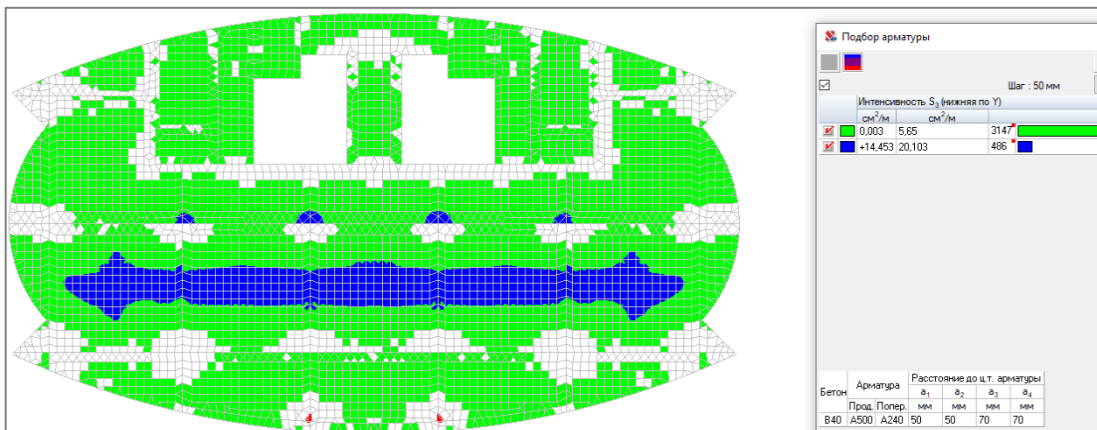


Рис.20. Армирование внутреннее по Y  
 Fig.20. Reinforcement internal along Y

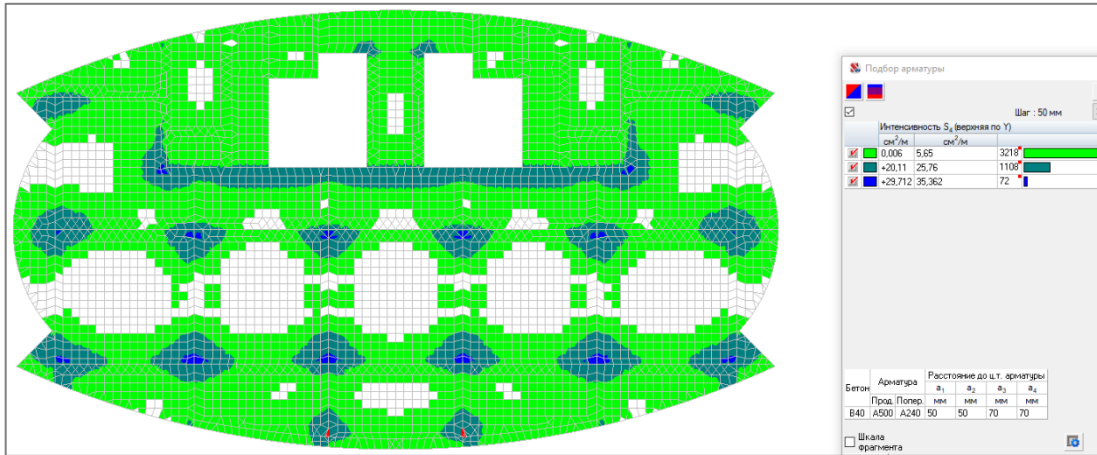


Рис.21. Армирование внешнее по Y  
 Fig.21. External reinforcement along Y

Таблица 4. Армирование плиты перекрытия  
 Table 4. Floor slab reinforcement

	$A_{Фон}$	$A_{усилен.1}$
Нижняя в направлении X ( $S_1$ )	$\varnothing 16$ A500 – 100 мм	$\varnothing 25$ A500 – 100 мм
Нижняя в направлении X ( $S_2$ )	$\varnothing 16$ A500 – 100 мм	$\varnothing 25$ A500 – 100 мм
Внутренняя в направлении Y ( $S_3$ )	$\varnothing 16$ A500 – 100 мм	$\varnothing 25$ A500 – 100 мм
Верхняя в направлении Y ( $S_4$ )	$\varnothing 16$ A500 – 100 мм	$\varnothing 25$ A500 – 100 мм

### 5. Армирование здания со стеной 300 мм. Плита ростверка

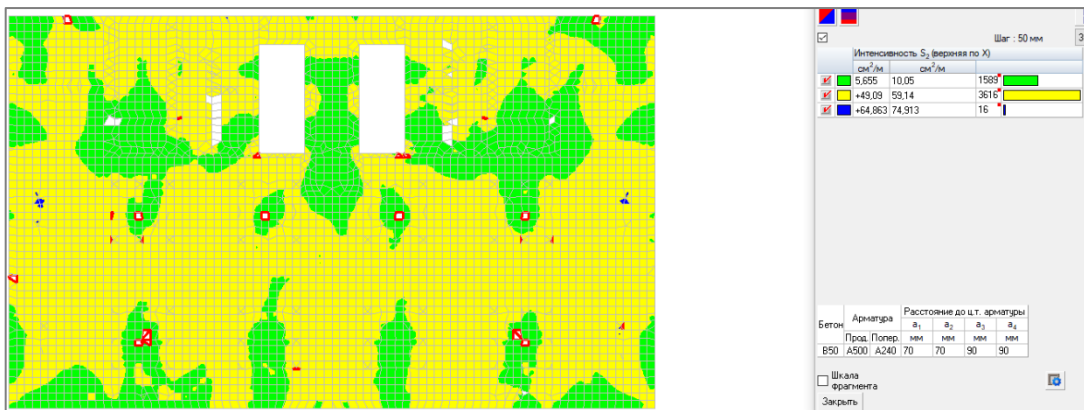


Рис.22. Армирование внутреннее по X  
 Fig.22. Reinforcement internal along X

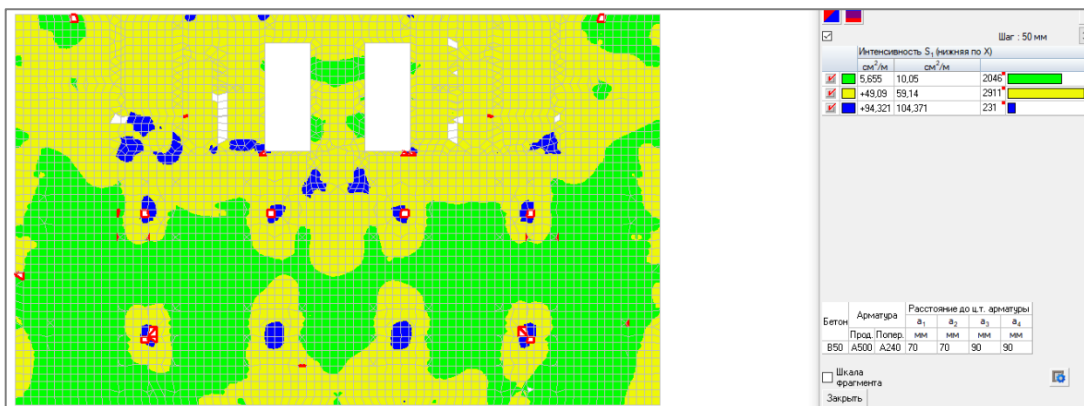


Рис.23. Армирование внешнее по X  
 Fig.23. External reinforcement along X

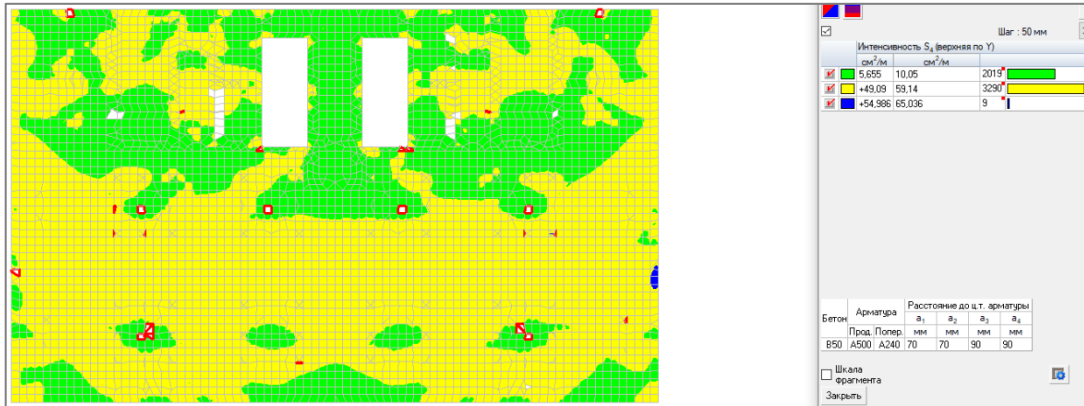


Рис.24. Армирование внутреннее по Y  
 Fig.24. Reinforcement internal along Y

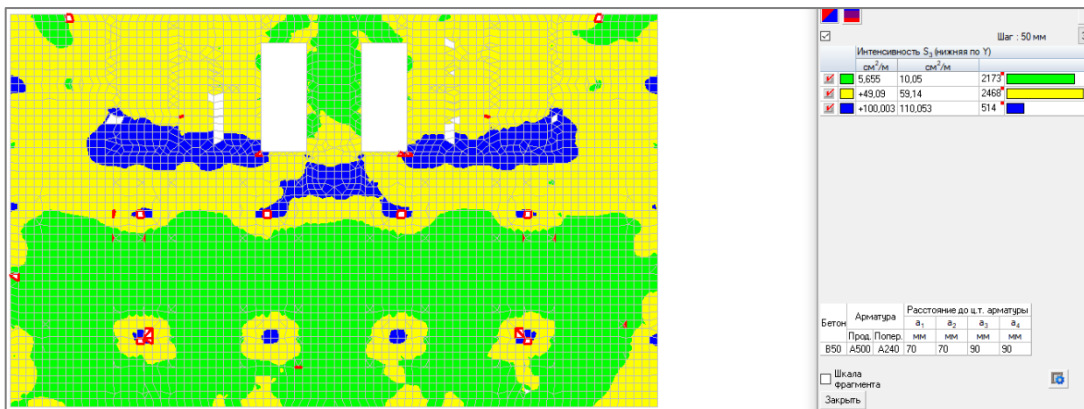


Рис.25. Армирование внешнее по Y  
 Fig.25. External reinforcement along Y

Таблица 5. Армирование плиты ростверка  
 Table 5. Reinforcement of grillage plate

	$A_{Фон}$	$A_{усилен.1}$	$A_{усилен.2}$
Нижняя в направлении X ( $S_1$ )	Ø16 A500 – 100 мм	Ø25 A500 – 100 мм	Ø36 A500 – 100 мм
Нижняя в направлении X ( $S_2$ )	Ø16 A500 – 100 мм	Ø25 A500 – 100 мм	Ø36 A500 – 100 мм
Внутренняя в направлении Y ( $S_3$ )	Ø16 A500 – 100 мм	Ø25 A500 – 100 мм	Ø36 A500 – 200 мм
Верхняя в направлении Y ( $S_4$ )	Ø16 A500 – 100 мм	Ø25 A500 – 100 мм	Ø36 A500 – 200 мм

### 6. Армирование здания со стеной 300 мм. Сваи

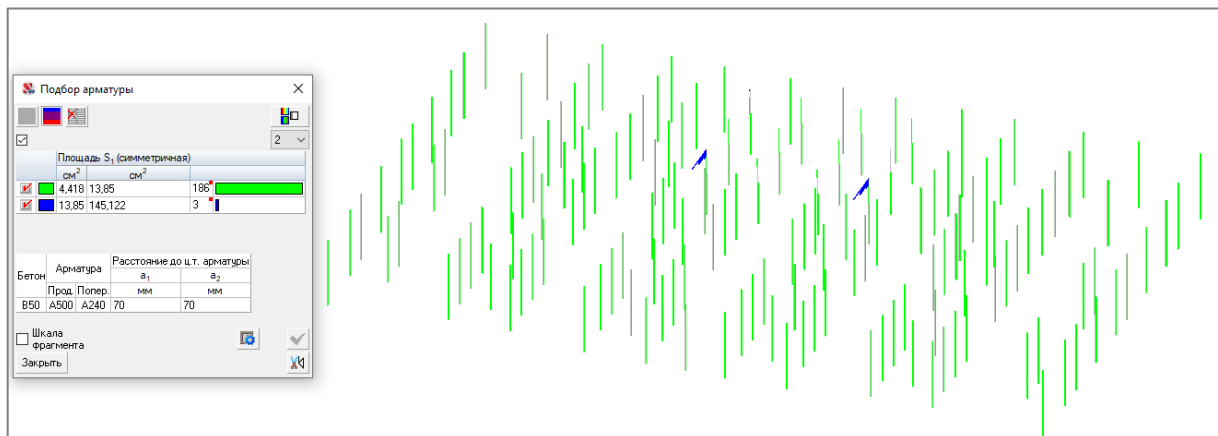


Рис.26. Армирование продольное свай  
 Fig.26. Reinforcement longitudinal piles



Таблица 5. Армирование свай  
 Table 5. Pile reinforcement

	АФон
Продольное (S1)	9Ø14 A500
Поперечное (S3)	Ø12 A500

### Ведомость объемов материала

Таблица 6. Ведомость объемов материала  
 Table 6. Material Quantity List

Система «Diagrid»			Стены толщиной 0,3 м		
D, мм	Металл, т	Бетон, м <sup>3</sup>	D, мм	Металл, т	Бетон, м <sup>3</sup>
Надземная часть здания					
Стена					
12	469,71	2531,49	18	1991,52	3797,24
32	236,76		25	39,40	
-	-		36	348,49	
Перекрытие					
12	518,70	4931,2744	12	520,11	4931,27
16	142,94		16	520,11	
Балки					
12	91,99	482,98	12	91,99476	482,98
18	62,70		18	62,70327	
32	101,51		40	236,4961	
Колонны					
12	2,96	1168,96	40	3,29	1168,96
28	2,03		28	2,03	
			12	2,67	
Металлоконструкции					
80x70x4	178,90	-			
14Б1	109,51				
Подземная часть здания					
Балки					
12	5,57	29,264	12	5,57	29,264
18	3,80		18	3,8	
32	6,15		40	14,33	
Колонны					
12	6,80	68,864	40	6,58	68,864
28	5,68		28	5,68	
			12	6,2	
Стены внутренние					
12	29,74	160,256	18	126,07	240,384
32	14,99		25	2,49	
			36	22,06	
Стена внешние					
12	24,36	131,296	18	103,29	196,944
32	12,28		25	2,04	
			36	18,07	

Система «Diagrid»			Стены толщиной 0,3 м		
D, мм	Металл, т	Бетон, м <sup>3</sup>	D, мм	Металл, т	Бетон, м <sup>3</sup>
Перекрытие					
12	20,07	190,84	12	20,13	190,84
16	5,53		16	8,2	
Ростверк					
14	73,98	1171,44	16	80,31	1171,44
25	128,34		25	114,65	
36	23,77		36	65,87	
Сваи					
10	2,92	2659,09	10	2,92	2659,09
12	88,53		12	88,53	
14	76,43		14	76,43	
Суммарные затраты:	2446,65	13525,76	Суммарные затраты:	4592,04	14937,28

### Сравнение стоимости возведения конструкций

Краткие результаты расчета стоимости работ по устройству подземного паркинга и типового надземного этажа для двух вариантов конструкций представлены в табл.7.

Таблица 7. Результаты расчета локальных смет  
 Table 7. The results of the calculation of local estimates

№	Вариант конструкции	Наименование работ	Стоимость, тыс.руб.
1	Стены толщиной 0,3 м	Подземный этаж	579 090,796
		Надземный этаж	1 001 028,501
		Полная стоимость строительства	4 147 289,48
2	Система «Diagrid»	Нулевой цикл	566 864,263
		Надземный этаж	895 442,985
		Полная стоимость строительства	3 788 101,84

### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование системы «Diagrid» в фасадном остеклении в качестве дополнительных конструкций усиления рациональней и экономичней по сравнению с вариантом использования стен с увеличенным сечением: подземный этаж дешевле на 2,11%; надземный типовой этаж - на 10,55%. Стоимость возведения при использовании системы «Diagrid» уменьшилась на 8,66%. Материалоемкость варианта с системой «Diagrid» также оказалась ниже (бетон – 9,45%, металл – 46,72%).

Таким образом, при выборе дополнительных конструкций усиления фасадной системы особое внимание стоит обращать на экономическую целесообразность проектирования сетчатых оболочек, так как их конструктивные особенности требуют больших затрат всевозможных ресурсов как на разработку каркаса в целом, так и на его отдельные элементы, узлы [12].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли С.В., Гамаюнова О.С. Фасадные системы в высотном строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 4(4). С. 3-14. URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/4/3-14.pdf>
2. Баранов А.О. Конструктивные решения высотных зданий // AlfaBuild. 2018. № 3 (5). С. 33-51.
3. Корсунцева А.А. Мировые тенденции строительства высотных зданий // Инженерные исследования. 2022. № 1(6). С. 27-32. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/1/27-32.pdf>
4. Lalin V., Galyamichev A., Zdanuch E., Mutovkin A., Dogru S. Wind loads on a high-rise building // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Т. 70. С. 551-562.
5. Ptušina I., Spiridonova T., Musorina T., Kanyukova S., Rezvaia A. Efficiency of urban development under high-rise construction of districts // В сборнике: MATEC Web of Conferences. Editor V. Murgul. 2016. С. 01049.



6. Ли С.В., Гамаюнова О.С. Использование системы «Diagrid» в фасадном остеклении // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Сборник материалов Всероссийской конференции. 2022. С. 192-193.
7. Космодемьянов В.А., Родимов А.А. Обзор сетчатой несущей конструкции - системы Diagrid // Инженерный вестник Дона. 2021. № 4 (76). С. 13-24.
8. Родимов А.А. Система Diagrid - концепция, узлы, моделирование. Обзор // В сборнике: Дни студенческой науки. Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи. Москва, 2021. С. 21-25.
9. Каминская М.Д., Чеснокова О.Г. Структурная система Diagrid // В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса. сборник трудов Международной научно-практической конференции, в 2 ч.. Волгоград, 2021. С. 84-91.
10. Laghi V., Palermo M., Gasparini G., Trombetti T. Computational design and manufacturing of a half-scaled 3D-printed stainless steel diagrid column // Additive Manufacturing. 2020. Т. 36. С. 101505.
11. Asadi E., Li Y., Salman A.M. Multi-criteria decision-making for seismic resilience and sustainability assessment of diagrid buildings // Engineering Structures (incorporating Structural Engineering Review). 2019. Т. 191. С. 229-246.
12. Семашкина Д.О., Назмеева Т.В. Диагонально-сетчатые оболочки в качестве несущих систем зданий // AlfaBuild. 2019. № 2 (9). С. 40-61.
13. Семашкина Д.О. Сетчатые оболочки в качестве каркаса невысоких зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 1 (64). С. 36-49.
14. Космодемьянов В.А., Родимов А.А. Опыт моделирования несущей конструкции – системы Diagrid // Инженерный вестник Дона. 2021. № 6 (78). С. 364-376.
15. Семенова Ю.А. Пространство высотных зданий с сетчатой несущей оболочкой // В книге: Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ. Тезисы докладов международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. 2019. С. 437-438.
16. Ashtari P., Karami R., Farahmand-Tabar S. Optimum geometrical pattern and design of real-size diagrid structures using accelerated fuzzy-genetic algorithm with bilinear membership function // Applied Soft Computing. 2021. Т. 110. С. 107646.
17. Amritha G.S., Kurian J.S. Model analysis of rhombic grid hyperboloid latticed shell structures // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Т. 46. С. 945-960.
18. Panchal N.B., Patel V.R., Pandya I.I. Optimum Angle of Diagrid Structural System // International Journal of Engineering and Technical Research. Vol. 2. No. 6. 2014. 157 с.
19. Srisangeerthan S., Hashemi M.J., Rajeev P., Gad E., Fernando S. Review of performance requirements for inter-module connections in multi-story modular buildings // Journal of Building Engineering. P. 101087.
20. Анохин Н.Н. Строительная механика в примерах и задачах. Часть 1. 4-е изд. М: Издательство АСВ. 2016. 335 с.
21. Проектирование металлических конструкций. Часть 2: «Металлические конструкции. Специальный курс». Учебник для ВУЗов / А. Р. Туснин, В. А. Рыбаков, Т. В. Назмеева и др.; под общей ред. А. Р. Туснина. М.: Перо, 2020. 436 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Софья Витальевна Ли** – студентка бакалавриата. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: li.sv@edu.spbstu.ru

**Ольга Сергеевна Гамаюнова** – к.т.н., доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: gamayunova\_os@spbstu.ru

## ABOUT THE AUTHORS

**Sofya V. Li** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: li.sv@edu.spbstu.ru

**Olga S. Gamayunova** – Ph.D., Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: gamayunova\_os@spbstu.ru

УДК 69

## УНИКАЛЬНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОУРОВНЕВЫХ ПАРКОВОК

**А.Ю. Билоус**

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

**Аннотация.** В статье рассмотрена одна из основных проблем в городской и транспортной инфраструктуре – нехватка парковочных мест, а также решение этой проблемы путем строительства многоуровневых парковок на примере Санкт-Петербурга. Представлена классификация многоуровневых парковочных систем по различным параметрам (по расположению относительно уровня земли, по отношению к другим зданиям, по способу размещения автомобилей). Каждому виду парковок дано определение и характеристика. В статье затронута история возникновения многоуровневых паркингов и тенденции их развития на примере Парижа, США и ОАЭ. В статье показано, что многоуровневый паркинг давно перестал выполнять лишь практическую функцию, и теперь его строительство является одним из способов улучшения внешнего вида городской инфраструктуры. Но в России с многоуровневыми парковками все обстоит куда хуже. Для оценки текущей ситуации и необходимости строительства такого рода парковок был проведен анализ городской инфраструктуры и дорожной сети одного из городов России - Санкт-Петербурга. В заключении сделаны выводы о необходимости внедрения многоуровневых парковочных систем в быстро растущих спальных районах, центральной части города, а также вблизи вокзалов и аэропортов.

**Ключевые слова:** паркинг, многоуровневый паркинг, многоуровневая парковка, автомобильные парковки, перехватывающие парковки, автомобиль, городская инфраструктура, транспортная инфраструктура, подземные стоянки.

**Ссылка для цитирования:** Билоус А.Ю. Уникальность строительства многоуровневых парковок // Инженерные исследования. 2022. №2 (7). С. 42-50. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/42-50.pdf>

## UNIQUENESS OF THE CONSTRUCTION OF MULTILEVEL PARKING PARKS

**A.Y. Bilous**

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

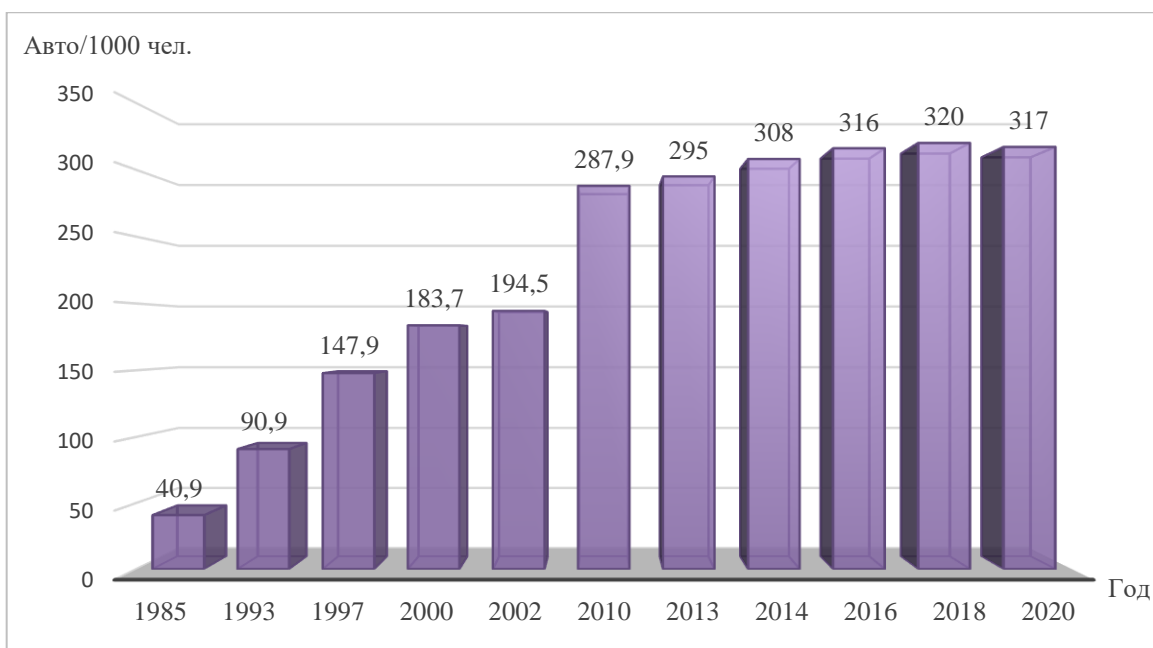
**Abstract.** The article considers one of the main problems in the urban and transport infrastructure - the lack of parking spaces, as well as the solution to this problem by building multi-level parking lots using the example of St. Petersburg. The classification of multi-level parking systems according to various parameters (by location relative to ground level, in relation to other buildings, by the way cars are placed) is presented. Each type of parking is given a definition and characteristics. The article touches upon the history of the emergence of multi-level parking lots and their development trends on the example of Paris, the USA and the UAE. The article shows that multi-level parking has long ceased to perform only a practical function, and now its construction is one of the ways to improve the appearance of urban infrastructure. But in Russia, with multi-level parking lots, things are much worse. To assess the current situation and the need to build this kind of parking, an analysis of the urban infrastructure and road network of one of the cities of Russia - St. Petersburg was carried out. In conclusion, conclusions are drawn about the need to introduce multi-level parking systems in rapidly growing residential areas, the central part of the city, as well as near railway stations and airports.

**Keywords:** parking, multi-level parking, car parking, park and ride, car, urban infrastructure, transport infrastructure, underground parking.

**For citation:** Bilous A.Y. Uniqueness of the construction of multilevel parking parks // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.2 (7). Pp. 42-50. URL: <http://eng-res.ru/archive/2022/2/42-50.pdf>

## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом количество личных транспортных средств стремительно растет как в России, так и во всем мире. Этот значительный рост коснулся не только крупных промышленных центров, но и небольших городов и поселков. В 1990-х значительный рост в приобретении автомобилей связан с распадом СССР и, как следствие, с открытием границ. Россия перешла на рыночную экономику и в страну хлынул поток иномарок, которые по многим характеристикам превосходили советские автомобили. В этот период личное транспортное средство было роскошью, но уже в начале 2000-х гг. в следствие роста ВВП и реальных доходов населения автомобили становятся просто средством передвижения, который во многом упрощает жизнь человека (рис.1).



**Рис.1.** Автомобилизация Санкт-Петербурга (авто/1000 чел.) в 1985-2020 годы

**Fig.1.** Motorization of St. Petersburg (cars/1000 people) in 1985-2020

Но, как известно, лавинообразный рост числа автомобилей должен сопровождаться соответствующим ростом транспортной инфраструктуры: дороги, автозаправки, парковки, автосервисы и так далее. Но количество последних должно непропорционально расти быстрее, чтобы обеспечить использование транспортных средств повсеместно, эффективно и постоянно. Однако параллельно с ростом транспортной инфраструктуры увеличивается и городская: больницы, школы, торговые центры, жилые дома и много другое. В плотной городской среде просто не остается места, которое могло быть отведено под парковочные места, число которых должно расти еще быстрее количества автомобилей.

Кушнир М.О. и Осколкова М.В. в работе [1] изучили проблему нехватки парковочных мест в условиях роста автомобилизации. Анализ необходимости строительства многоуровневой парковки в составе многоквартирного жилого дома показал, что жители города нуждаются в дополнительных парковочных местах и готовы приобретать их совместно с жилой недвижимостью. А в связи с постоянно растущей потребностью горожан в личном транспорте, наличие спроса на парковочные места будет только расти [2-10]. А если к этому добавить стесненные городские условия в большинстве крупных городов, то наиболее очевидным решением может стать строительство многоуровневых парковок.

## ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПАРКИНГОВ

История возникновения многоуровневых парковок берет свое начало в 1905 году в Париже, затем это коснулось и США, где первый многоуровневый механизированный паркинг появился в Чикаго в 1929 году (рис.2), а после и в городе Кенте. Однако бум таких парковок в США пришелся на конец 1940-х и 1950-е годы.

Новый всплеск интереса к многоуровневым парковкам случился в 1990-е годы в Азии. Лидером по количеству многоуровневых парковок до настоящего времени остается Япония. Здесь с помощью многоуровневых парковок постоянно размещается около 1,6 млн автомобилей.

Самая крупная на сегодняшний день автоматизированная парковка находится в бизнес-центре Emirates Financial Towers в Дубае (рис.3) - это девятиэтажный комплекс, рассчитанный на 1191 автомобиль.



Рис.2. Паркинг в Чикаго 1929г.<sup>1</sup>  
Fig.2. Parking in Chicago 1929



Рис. 1. Emirates Financial Towers, Дубай<sup>2</sup>  
Fig. 3. Emirates Financial Towers, Dubai

В России же по перечисленным выше причинам строительство многоуровневых паркингов началось значительно позже. Однако первый случай строительства такого рода паркинга в России был зафиксирован в 1909 г. в Москве – гараж Ильина, который представлял собой многоуровневую парковку, вмещавшую в себя 150 автомобилей на трех этажах. Но дальнейшее активное как в США и Азии развитие такого рода сооружений в России не произошло.

#### МНОГОУРОВНЕВЫЕ ПАРКИНГИ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Многоуровневые парковки - это помещение, которое предоставляет возможность временно распределить транспортные средства поэтажно. Благодаря этому на небольшом участке можно расположить немалое число машин [11].

Многоуровневые парковки классифицируются по различным признакам:

1. По расположению относительно уровня земли:

1.1. **Подземный** - это паркинг, который организован под зданием, пустырем, проезжей частью или речным руслом. Проект строительства такого вида паркинга является дорогостоящим из-за использования усиленных несущих конструкций обеспечения безопасности. Если возводить подземный многоярусный паркинг, то есть на большее количество мест, то проект окупится скорее. Поэтому подземные паркинги в большинстве случаев делают под жилыми и общественными зданиями, где гарантирован спрос на размещение автомобилей.

1.2. **Надземный** представляет собой многоярусную самонесущую конструкцию высотой в большинстве случаев до 6 этажей. — это сооружения самых разных конфигураций, вплоть до моста над проезжей частью. В них помимо парковочных мест могут находиться офисы, склады и другие помещения.

2. Паркинги различаются по отношению к другим зданиям:

2.1. **Отдельно расположенный.** Примером подземного паркинга, расположенного отдельно, является паркинг под речным руслом, проезжей частью или пустырем, надземные же – отдельные конструкции вблизи таких городских инфраструктур, как торговые центры, жилые дома, аэропорты, железнодорожные вокзалы и метро.

2.2. **Часть здания.** Такие архитектурные решения можно увидеть в торговых центрах, офисах крупных компаний, новостройках и так далее.

3. По способу размещения автомобилей выделяются:

3.1. **Автоматизированный паркинг.** Принцип такого вида паркинга напоминает камеру хранения. Владельцу транспортного средства нужно лишь завести машину в специальный приемный отсек и

<sup>1</sup> Чикаго 1929г. [Электронный ресурс]. – URL: <https://inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2017/04/Ennead-Lab-Car-Charging-Station2.jpg> (дата обращения: 16.03.2022)

<sup>2</sup> Emirates Financial Towers [Электронный ресурс]. – URL: <https://catalog.r-express.ru/content/images/Hotels/jumeirahemiratestowers/JETW05.jpg> (дата обращения: 16.03.2022)



задать место, куда она будет перемещена, с помощью пульта управления. Это значительно ускоряет процесс парковки и позволяет сэкономить на площадях.

**3.2. Неавтоматизированный паркинг.** Традиционный, но требует больше места. Владелец транспортного средства сам заезжает на парковочное место. Если в паркинге несколько этажей, для перемещения между ними устанавливаются подъемники лифтового плана или пандусы.

Карманова О.С., Клевко В.И. в работе [12] делают вывод о том, что при проектировании парковок в жилых микрорайонах необходимо основываться на результатах социологических исследований, с учетом площади земельного участка и площади застройки жилых домов, количества квартир, площади встроенных помещений.

#### ДОРОЖНАЯ ИНФРАСТРУКТУРА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА И ПРОБЛЕМА НЕДОСТАТКА ПАРКОВОЧНЫХ МЕСТ

Если говорить об актуальности строительства многоуровневых парковок в России на примере Санкт-Петербурга, то стоит уделить внимание транспортной инфраструктуре города и проанализировать самые загруженные районы (причины возникновения пробок) и найти решения этих проблем с помощью увеличения числа парковочных мест наиболее оптимальным образом.

Одним из самых загруженных районов Санкт-Петербурга уже много лет является Центральный. Помимо жилых строений, здесь расположено большое количество туристических объектов, а также торговых центров, офисов и бизнес-центров. Транспортный поток здесь не ослабевает никогда, поэтому вопрос о парковке в этой части города стоит очень остро. Для жителей домов по Невскому проспекту этот вопрос тем более актуален, что дворы и детские площадки превращены приезжающими в центр людьми в настоящие автостоянки. Таким образом, из-за необходимости развивать транспортную инфраструктуру и желаний поддерживать уровень безопасности и комфорта для жизни в этом районе проблему с парковочными местами решить сложнее, чем в любой другой части города [1].

Если говорить о Калининском районе, то стоит обратить внимание на невысокую транспортную доступность. Станций метро здесь не так много, поэтому на севере Калининского района автомобиль оказывается наиболее быстрым средством передвижения, а так как этот район представляет собой множество новостроек с огромным числом квартир, то для этого района также актуальна проблема, связанная с наличием парковочных мест.

Стоит также упомянуть проблему с парковочными местами вблизи железнодорожных вокзалов, а именно Московский, Ладожский, Финляндский, Витебский, а также в окрестности аэропорта Пулково, где люди часто оставляют свое транспортное средство, чтобы уехать, например, в командировку, отчего становится проблематично припарковать автомобиль другим пассажирам. Нехватка парковочного места заметна в жилых кварталах быстро растущих спальных районов [13]: Парнасе, Мурино, Калининском, Приморском и других районах, а также около железнодорожных вокзалов и аэропорта (рис.4, рис.5).



**Рис.4.** Парнас. Паркинг в жилой застройке<sup>3</sup>  
**Fig.4.** Parnas. Parking in a residential area



**Рис. 5.** Мурино. Организация парковочных мест<sup>4</sup>  
**Fig. 5.** Murino. Organization of parking spaces

<sup>3</sup> Жилая застройка Парнаса (Санкт-Петербург) [Электронный ресурс]. – URL: <https://bakhmetev.livejournal.com/312649.html> (дата обращения: 11.03.2022)

<sup>4</sup> Девяткино и Мурино: Готэм-Сити рядом с Петербургом [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.novostroy-spb.ru/statyi/murino\\_i\\_devyatkiно\\_gotemsiti](https://www.novostroy-spb.ru/statyi/murino_i_devyatkiно_gotemsiti) (дата обращения: 10.03.2022)



## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ НЕХВАТКИ ПАРКОВОЧНОГО МЕСТА С ПОМОЩЬЮ СТРОИТЕЛЬСТВА МНОГОУРОВНЕВЫХ ПАРКОВОК

Если при новом строительстве все чаще используется возведение подземных многоуровневых паркингов, то строительство такого рода паркингов под уже существующими жилыми домами практически невозможно. Решением этой проблемы в спальных районах на окраине города является строительство отдельно расположенного многоуровневого комплекса парковок, что возможно в следствие наличия свободной прилегающей территории [14].

Для решения данной проблемы вблизи аэропорта Пулково не раз заходил вопрос об использовании роторных или карусельных многоуровневых паркингов. Это самый дешёвый вариант многоуровневого паркинга, позволяющий сэкономить много места.

В случае железнодорожных вокзалов строительство многоуровневых парковок также актуально. Здесь решением являются как роторный, так и стеллажный паркинг. Стеллажные паркинги бывают с поддонами хранения автомобилей и без. В первом случае автомобиль заезжает в приемном боксе на паллет (маленький металлический поддон) и дальше перемещается на ячейку хранения. Во втором случае автомобиль перемещается в паркинге специальным роботизированным подъемником. И первый, и второй вариант значительно уменьшают парковочное пространство, однако строительство таких систем обойдется дороже роторного паркинга [15].

С Центральным районом все обстоит намного сложнее (рис.9). В связи с отсутствием свободной территории возведение крупных многоуровневых комплексов невозможно, строительство же подземных паркингов под дорогами могло бы решить проблему с парковкой, но строительство обойдётся очень дорого и значительно ухудшит и так существующую проблему с пробками. Также одним из решений проблемы является использование аварийных домов с сохранением их фасадов, чтобы использовать здания в качестве парковок, такая идея очень популярна в Европе. Но в Санкт-Петербурге почти каждое аварийное здание признается историческим наследием, поэтому ни в одном из таких домов паркинга не появилось [16, 17].

Решением проблемы может стать роторный паркинг (рис.10). Преимущество роторных паркингов заключается в том, что их можно разместить в очень ограниченном пространстве. Так, например, в стандартном дворе, который имеет площадь 40 на 50 метров и высоту около 20 метров, может разместиться до 15 роторных многоуровневых парковок, вмещающих в себе около 180 машин. Для контроля даже 15 таких парковок будет достаточно одного человека.



**Рис.9.** Комплекс многоуровневых парковок в жилом комплексе "Царская столица" в Центральном районе<sup>5</sup>  
**Fig.9.** The complex of multi-level parking in the residential complex "Tsar's Capital" in the Central District<sup>8</sup>



**Рис.10.** Испытание под нагрузкой роторной (карусельной) парковки в Санкт-Петербурге<sup>6</sup>  
**Fig.10.** Load test of rotary (carousel) parking in St. Petersburg

<sup>5</sup> Комплекс многоуровневых парковок в жилом комплексе "Царская столица" в Центральном районе [Электронный ресурс]. – URL: <https://i.archi.ru/i/254091.jpg> (дата обращения: 26.03.2022)

<sup>6</sup> Компания «Паркинги мегаполиса» провели в Санкт-Петербурге испытание под нагрузкой роторной (карусельной) парковки [Электронный ресурс]. – URL: <https://m.asninfo.ru/news-partners/1207-kompaniya-parkingi-megapolisa-proveli-v-sankt-peterburge-ispytaniye-pod-nagruzkoy-rotornoy-karuselnoy-parkovki?page=8&per-page=2> (дата обращения: 23.03.2022)

Также стоит сказать о башенных паркингах, которые могут иметь в высоту до 70 парковочных мест. Такого рода паркинги хороши тем, что это не капитальное строение, а это значит, что их можно пристроить к любой стене, а их строительство не будет таким дорогостоящим как надземные и подземные парковочные комплексы, требующие больше времени, трудозатрат и денег [18].

### МНОГОУРОВНЕВЫЕ ПАРКОВКИ КАК АРХИТЕКТУРНАЯ ДОСТОПРИМЕЧАТЕЛЬНОСТЬ

Во многих странах мира многоуровневые парковочные системы уже давно не являются новшеством, поэтому помимо их основной функции начали уделять внимание их дизайну: если раньше паркинги выглядели как серые монолитные здания, которые возводились в большом количестве чтобы решить проблемы с дорожно-транспортной сетью, то сейчас это яркие, привлекающие туристов здания, над созданием которых работает большая команда архитекторов и дизайнеров, создающих не просто практичное сооружение, но и местную достопримечательность, произведение искусства [19].

Одним из ярких примеров дизайнерских паркингов является «Музей Гараж» (Museum Garage), выполненный в стиле сюрреализм (рис.11). Семиэтажное здание гаража на 800 парковочных мест превращено в памятник современного искусства и архитектуры. «Музей Гараж» расположен в Майами (район Miami Design District) - округе, посвященном инновационному искусству, дизайну и архитектуре.

Каждый из четырех фасадов Museum Garage выполнен в авторском стиле разных дизайнеров. Фасад немецкой фирмы J. Mayer H. напоминают аэродинамические формы автомобильного дизайна, посредством 45 гравитационных машин, сделанных в металлическом золоте и серебре (рис.12).



**Рис.11.** «Музей Гараж» в Майами<sup>7</sup>  
**Fig.11.** Garage Museum in Miami



**Рис.12.** Museum Garage. Фасад J. Mayer H.<sup>8</sup>  
**Fig.12.** Museum Garage. Facade J. Mayer H.

Работа французской студии Nicolas Buffe обладает темным перфорированным металлическим фоном. Николя Бюфф вдохновлялся рисунками европейского барокко и японскими аниме. Фасад имеет множество разнообразных 2D и 3D-элементов, изготовленных при помощи лазера из пластика, композитов и полимерной смолы (рис.13).

Фасад Ant Farm от WORKac (Нью-Йорк) - это оранжевые и бело-полосатые транспортные барьеры, которые поворачиваются вверх направо и образуют ярко окрашенный экран (рис.14). Фасад имеет пятнадцать «окон», обрамленных зеркальной нержавеющей сталью, через которую выходят бетонные кубы.

<sup>7</sup> «Музей Гараж» в Майами [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.interior.ru/architecture/3442-muzej-garazh-v-majami.html> (дата обращения: 26.03.2022)

<sup>8</sup> Museum Garage [Электронный ресурс]. – URL: <https://atlashardwarecorp.com/projects/museum-garage/> (дата обращения: 11.04.2022)





**Рис.13.** Museum Garage. Фасад студии Nicolas Buffe<sup>9</sup>  
**Fig.13.** Museum Garage. Facade of Nicolas Buffe studio



**Рис.14.** Museum Garage. Фасад Ant Farm от WORKac<sup>9</sup>  
**Fig.14.** Museum Garage. Ant Farm facade by WORKac

Также в качестве примера можно привести паркинг в голландском городе Зволле, выполненный в восточном стиле (рис.15), 5-этажный зелёный паркинг Ballet Valet (Майами) на 250 машин (рис.16), многоэтажный паркинг в Зютфен, решётка фасада которого выполненная из натуральной древесины, что обеспечивает естественное освещение и вентиляцию помещений паркинга, многоуровневый общественный паркинг на Чарльз-стрит в британском городе Шеффилде, фасад которого оформлен металлическими панелями, наклоненными под разным углом и меняющими цвет в зависимости от времени суток, и многие другие.



**Рис.15.** Паркинг в г. Зволле (Голландия)<sup>10</sup>  
**Fig.15.** Parking in Zwolle (Holland)



**Рис.16.** Паркинг Ballet Valet (Майами)<sup>10</sup>  
**Fig.16.** Ballet Valet Parking (Miami)

Таким образом, появляется все больше примеров того, что многоуровневые паркинги не только решают проблему нехватки парковочных мест, но и становятся архитектурной достопримечательностью города.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрена проблема нехватки парковочных мест и актуальность строительства многоуровневых парковок на примере города Санкт-Петербург. Представлена классификация многоуровневых паркингов, этапы их развития в других странах. Строительство многоуровневого паркинга получило популярность в США, Азии и Европе, как решение проблемы быстрого роста городов, но не получило в свое время такой же заинтересованности в России.

<sup>9</sup> Гараж Museum Garage [Электронный ресурс]. – URL: <https://archi.ru/projects/world/14441/garazh-museum-garage> (дата обращения: 19.03.2022)

<sup>10</sup> Многоуровневый паркинг может быть красивым [Электронный ресурс]. – URL: <https://varlamov.ru/3032586.html> (дата обращения: 19.03.2022)

Был проведен анализ городской инфраструктуры Санкт-Петербурга и предложены пути решения проблемы. Проанализировав дорожную ситуацию Санкт-Петербурга и городскую инфраструктуру, был сделан вывод о необходимости внедрения многоуровневых парковочных систем в быстро растущих спальных районах, центральной части города, вблизи вокзалов и аэропортов. Но Санкт-Петербург – лишь один рассмотренный город из всех городов России, помимо него можно вспомнить и другие с такой же или даже большей плотностью застройки и более сложной дорожной сетью, где также требуется индивидуальный анализ, но, несомненно, можно сказать, что, используя иностранный опыт строительства многоуровневых паркингов, можно решить эту проблему.

Но тем не менее для решения этого вопроса нужно больше времени, статистических данных о загруженности определенных частей города, климате, мнениях владельцев транспортных средств, а также мнение специалистов, связанных с дорожной сетью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кушнир М.О., Осколкова М.В. Строительство паркингов - решение проблемы горожан // В сборнике: Современные проблемы земельно-имущественных отношений, урбанизации территории и формирования комфортной городской среды. Сборник докладов Международной научно-практической конференции. Тюмень, 27 апреля 2021. Тюмень: ТИУ, 2022. С. 149-153.
2. Дуванова И. А. Автомобильные стоянки и парковки в мегаполисах // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 12 (39). С. 43-56.
3. Кононова М.С. Варианты размещения нормируемого количества парковочных мест при проектировании жилой застройки // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2017. № 1 (1). С. 42-47.
4. Игнатов А.В., Басков В.Н., Мартынова Е.С., Кучапина А.А. К вопросу об организации парковочных мест в городе Саратове // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2018. № 2 (28). С. 20-24.
5. Gamaunova O., Kulakov K. Using alternative fuels to increase energy efficiency in the transport sector // В сборнике: E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019. 2019. С. 02024.
6. Лазарев Ю.Г., Ермошин Н.А., Сенцов И.В. Планирование развития дорожной сети с учетом принципов многокритериальной оптимизации // Путевой навигатор. 2019. № 38 (64). С. 24-31.
7. Ермошин Н.А., Лазарев Ю.Г. Многокритериальная оптимизация в задачах транспортного планирования // Технико-технологические проблемы сервиса. 2017. № 1 (39). С. 58-62.
8. Anishchenko D., Novik A., Lazarev Y., Boytsov A., Trubina D. Underground streets in residential area: aspects of design on the example of Russia // Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Т. 70. С. 433-439.
9. Толмачева В.М., Могулев В.А., Амелин В.Ю. Проблемы проектирования многоуровневых парковок - мировой опыт и российские реалии // В сборнике: Строительство и реконструкция. Сборник научных трудов 3-й Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров. Редколлегия: С.В. Дубраков (отв. ред.). Курск, 2021. С. 393-399.
10. Мухнурова И.Г., Шарова Т.А. Механизированный паркинг - современное решение проблемы нехватки места в городской среде // В сборнике: Архитектура, строительство, землеустройство и кадастры на дальнем востоке в XXI веке. материалы международной научно-практической конференции. ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». 2016. С. 58-65.
11. Мухнурова И.Г., Кузьменко К.С. Анализ опыта проектирования многоуровневого паркинга. В сборнике: Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия // Материалы V Международной научно-практической конференции Комсомольск-на-Амуре, 29–30 ноября 2017. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. С. 64-68.
12. Карманова О.С., Клевко В.И. Выбор рационального типа парковок и их расположение в жилом комплексе // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2016. № 1. С. 23-37. DOI: 10.15593/24111678/2016.01.02
13. Бологов И.С., Гамаюнова О.С. Проблемы уплотнительной застройки в Санкт-Петербурге // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 22 (74). С. 15-28.
14. Ищенко В.С., Целуйко Д.С. Проектирование многоуровневой парковки в условиях плотной городской среды // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2019. Т. 2. С. 125-128.
15. Сапожкова Н.В., Кубахова А.С., Федина М.А., Барышников В.А. Устройство перехватывающих и многоуровневых парковок как метод снижения загруженности улично-дорожной сети // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 4 (77). С. 64-73.
16. Орлов Е.В., Сергеева Е.А., Шипков О.И., Таранина С.Ю. История развития благоустройства территории городов (на примере обустройства автостоянок и парковок в Москве) // Журнал исторических исследований. 2018. Т. 3. № 4. С. 6-9.
17. Старицына А.А., Мартыненко Е.А., Вахрушева С.В., Птухина И.С. Анализ существующей политики в области сохранения и регенерации объектов культурного наследия // StudArctic Forum. 2017. Т. 1. № 5 (5). С. 1-14.

18. Федюк Р.С., Панкрашин Д.А., Попов А.М., Луженков Е.А. Уникальные технологии строительства подземных зданий и сооружений // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 48. С. 1269-1274.

19. Манухина Л.А., Спасский А.И. Развитие механизированных систем многоуровневых паркингов в сфере организации городской инфраструктуры // Экономика и предпринимательство. 2017. № 4-2 (81). С. 890-895.

#### ОБ АВТОРАХ

**Александра Юрьевна Билоус** – студентка. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: bilous.alya@gmail.ru

#### ABOUT THE AUTHORS

**Alexandra Yu. Bilous** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: bilous.alya@gmail.ru