

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**Карпунин Вячеслав Григорьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций зданий и сооружений.  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный архитектурно-художественный университет».  
Россия, Екатеринбург, e-mail: sl.karpunin@yandex.ru

**Голубева Екатерина Александровна**

кандидат архитектуры, профессор,  
зав. кафедрой конструкций зданий и сооружений,  
ФГБОУ ВО «Уральский государственный архитектурно-художественный университет»,  
Россия, Екатеринбург, e-mail: golubeva@usaaa.ru

УДК: 624.07

ББК: 38.5

## Аннотация

*В статье рассмотрено построение компьютерных моделей строительных конструкций объектов капитального строительства на основе метода конечных элементов. Проведен сравнительный анализ методов расчета конечных элементов (МКЭ) и приближенного расчета. На примере построения компьютерной модели структурной плиты показано резкое снижение веса металлических конструкций по сравнению с методом приближенного расчета. Показан опыт преподавания дисциплины «Компьютерное моделирование строительных конструкций» студентам, обучающимся в Уральском государственном архитектурно-художественном университете по направлению Архитектура. В качестве примеров приведены расчеты сложных строительных конструкций, произведенные студентами УрГАХУ в программном комплексе ЛИРА-САПР в ходе выполнения выпускной квалификационной работы.*

## Ключевые слова:

*компьютерная модель, метод конечного элемента, строительная конструкция, ЛИРА-САПР*

Современная практика разработки строительных конструкций, в том числе и конструкций для уникальных зданий и сооружений, основывается на создании информационных моделей здания, позволяющих создать объект капитального строительства, отвечающий требованиям технических регламентов. Одним из элементов единой информационной модели здания (Building Information Model – BIM) является компьютерная модель строительных конструкций, позволяющая интегрироваться в новейшую систему в соответствии с принципами BIM.

Компьютерные модели строительных конструкций являются одними из основных составляющих комплекса BIM зданий и сооружений. В соответствии с требованиями ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» для каждого предельного состояния, которое необходимо рассматривать при проектировании, должны быть установлены расчетные модели конструкций зданий и сооружений, описывающие их поведение при наиболее неблагоприятных условиях в процессе возведения объекта капитального строительства и его эксплуатации. Установленные модели позволяют обосновать прочность и устойчивость строительных конструкций по предельным состояниям первой и второй групп при статическом и динамическом воздействиях различных нагрузок: собственного веса, полезных нормативных и эксплуатационных нагрузок, ветровой, сейсмической, снеговой и других нагрузок.

Основа для построения компьютерных моделей в настоящее время – это метод конечных элементов (МКЭ). Основные положения МКЭ были сформулированы в 70-х гг. XX века. МКЭ позволил построить единообразные процедуры расчета различных строительных конструкций: ферм и рам, составленных из одномерных стержней, двумерных конструкций плит и балок – стенок, трехмерных фундаментных конструкций и т.д. МКЭ сводит исходную задачу к построению матрицы жесткости. Матрица жесткости имеет большой порядок и является слабо заполненной. Формирование и решение системы линейных алгебраических уравнений МКЭ проводится на компьютере. Результаты расчета представляются в численном и графическом виде.

За последние годы на основе МКЭ в мире разработано большое количество коммерческих программных комплексов различной сложности и ориентированных на различные классы задач. В России для моделирования строительных конструкций получил широкое распространение пакет программ ЛИРА-САПР. Он разрешен к применению при моделировании ответственных строительных конструкций уникальных зданий различного назначения, включая сооружения атомных электростанций (АЭС), и реализует технологию информационного моделирования зданий (BIM) [2]. В последней версии ЛИРА-САПР 2019 г. разработан двусторонний конвертер Tekla Structures 2018i – ЛИРА-САПР – Tekla Structures 2018i. Названный конвертер позволяет в полном объеме выполнять расчет и проектирование металлических и железобетонных конструкций. Следует отметить, что ЛИРА-САПР является «легким» программным пакетом и может эффективно работать на офисном компьютере без повышенных требований к системному обеспечению.

До появления МКЭ в расчетах строительных конструкций использовались приближенные методы [1], рекомендованные нормативной, технической литературой. Как правило, приближенные методы позволяли получить результаты с запасом прочности. Поэтому применение МКЭ обеспечило не только более точные результаты расчета, но и снижение веса, в том числе стальных большепролетных пространственных конструкций [3].

Для оценки точности приближенных методов рассмотрена структурная плита, которая представляет собой сложную стержневую пространственную конструкцию, составленную из многократно повторяющихся объемных элементов, называемых кристаллами (пирамидами) различной формы [1]. Вершины пирамид, обращенные вниз, также связаны стержнями друг с другом (рис.1).

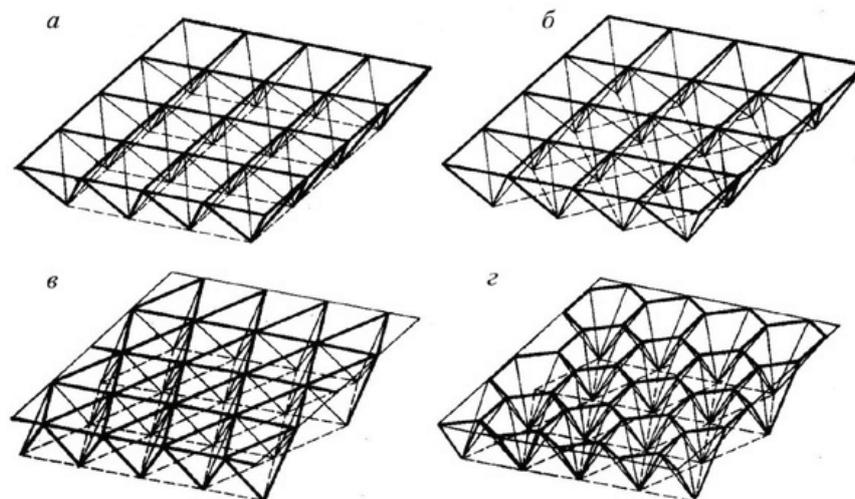


Рис. 1. Схемы структурных плит

а, б – из пирамид с квадратным основанием (пентаэдров);  
в – из пирамид с треугольным основанием (тетраэдров);  
г – из плит с шестиугольным основанием (гептаэдров)

При применении структурных плит в покрытиях зданий и сооружений создается несущая строительная конструкция как основа объемно-планировочного решения и архитектурной выразительности здания в целом (рис. 2). Материалом структурных плит в отечественной практике становятся сталь, алюминий, дерево. Однако большее распространение получили стальные элементы стержневой пространственной конструкции. Вследствие пространственного распределения усилий в стержнях структурной плиты ее высота может составлять  $1/16$ – $1/25$  от пролета, что позволяет ощутимо снизить строительный объем здания и уменьшить вес стальных конструкций по сравнению с ферменными стержневыми конструкциями, для которых рекомендованная высота фермы составляет  $1/8$ – $1/10$  от пролета фермы.



Рис. 2. Концертный зал «Фестивальный». Сочи, 1978. Арх. В. Шульрихер, И. Рябышева. Соавторы арх. К. Стойко, Е. Левина. Инж. М. Берлин, И. Брук. Соавтор инж. Г. Кальчук. Источник: <https://synthart.livejournal.com/197315.html>

При проектировании структурных плит конструкторы сталкивались с трудностями расчета усилий в стержнях, количество которых в плите может достигать нескольких тысяч. До появления численного моделирования пространственных конструкций методом МКЭ структурные плиты рассчитывались приближенными методами по формулам, аналогичным формулам расчета изгибаемых плит [1].

Научный и практический интерес представляет оценка достоверности результатов приближенных расчетов путем сравнения с результатами, полученными методом конечного элемента. В настоящей статье на одном примере структурной плиты проведено такое сравнение.

Согласно [1], рассматривается спортивно-демонстрационный зал с трибунами на 1500 мест размерами  $66 \times 66$  м, перекрытый структурной плитой (рис. 3).

Ячейки плиты имеют размер  $3 \times 3$  м, высота плиты  $1/22 = 3$  м. Материал для стержней плиты – круглые трубы из стали марки ВСтЗпс4. Шаг колонн по периметру зала 6 м. Опирание плиты на колонны точечное.

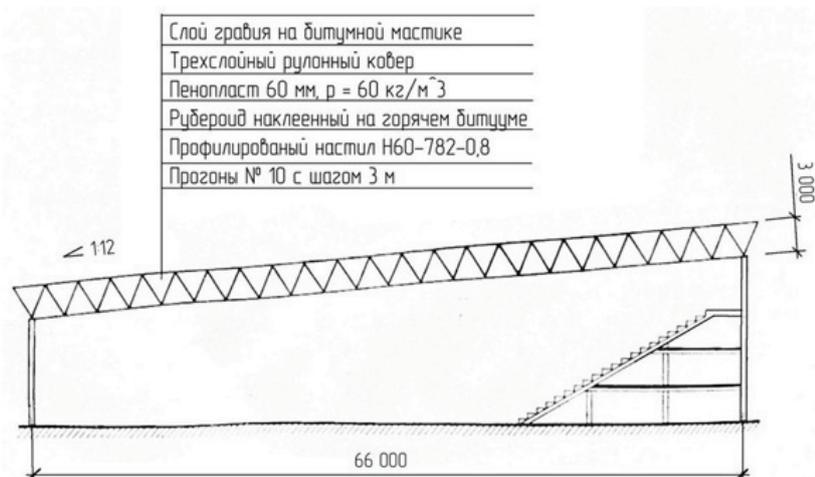


Рис. 3. Поперечный разрез спортивно-демонстрационного зала, перекрытого структурной плитой из пентаэдров

Расчет усилий в стержнях, возникающих под действием собственного веса плиты, веса кровли интенсивностью  $748 \text{ Н/м}^2$  и снеговой нагрузки интенсивностью  $500 \text{ Н/м}^2$ , выполнен приближенным методом [1]. Сечение труб подбиралось из условия прочности по допускаемым напряжениям и устойчивости сжатых стержней. Для минимизации веса структурной плиты, сечения труб подбирались дифференцированно. Подобранные сечения труб изменялись от  $\varnothing 83 \times 6$  до  $\varnothing 133 \times 11$  (см. таблицу) [1].

Расстояние от опоры, м	Верхний пояс	Нижний пояс	Сжатые раскосы	Растянутые раскосы
	0	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 133 \times 6$
3	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 133 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
6	$\varnothing 108 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 133 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
9	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 133 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
12	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 108 \times 6$	$\varnothing 133 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
15	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 133 \times 6$	$\varnothing 133 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
18	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 108 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
21	$\varnothing 133 \times 11$	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 108 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
24	$\varnothing 133 \times 11$	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 108 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
27	$\varnothing 133 \times 11$	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
30	$\varnothing 133 \times 11$	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$
33	$\varnothing 133 \times 11$	$\varnothing 133 \times 8$	$\varnothing 83 \times 6$	$\varnothing 83 \times 6$

Для сравнения методов расчета была построена компьютерная конечно-элементная модель структурной плиты в программном комплексе ЛИРА-САПР. Геометрическая схема показана на рис. 4. Принятое сечение стержней – труба  $\varnothing 70 \times 6$  мм.

Процедура построения модели достаточно проста [2]. На первом шаге задается стержневая модель пирамиды (пентаэдра). Далее с использованием сервиса ЛИРА-САПР пирамида копируется по двум осям (рис. 5).

Построенная модель состоит из 4232 стержней – конечных элементов, соединенных в 1105 узлах. Разрешающая система состоит из 3183 линейных алгебраических уравнений.

На рис. 5 показаны перемещения и мозаика продольных усилий в стержнях структурной плиты от собственного веса.

Проверка выполнения условий прочности по первому предельному состоянию показывает, что максимальный уровень напряжений в стержнях фермы составляет 66.7% от предельного (100%). Условие местной устойчивости выполняется с максимальным уровнем 69.2% от предельного значения.

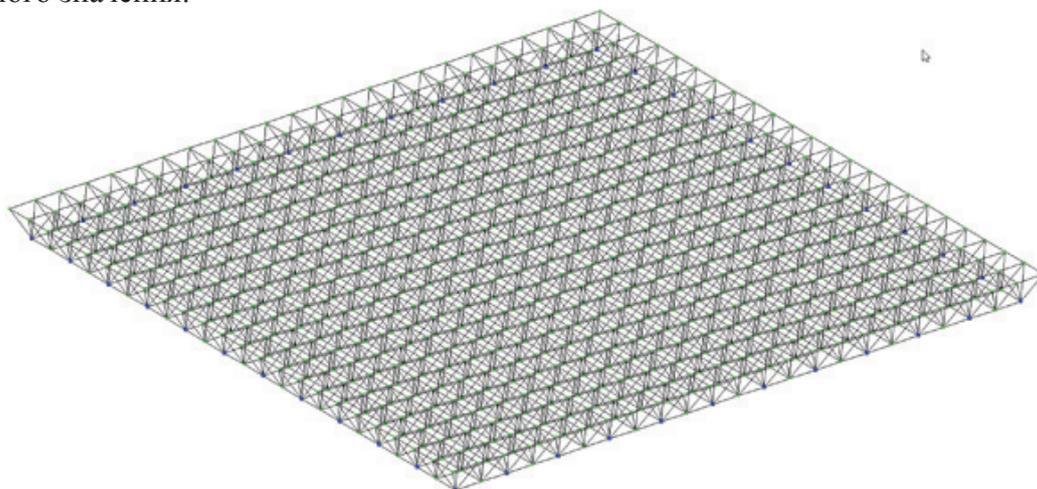


Рис. 4. Конечно-элементная компьютерная модель структурной плиты

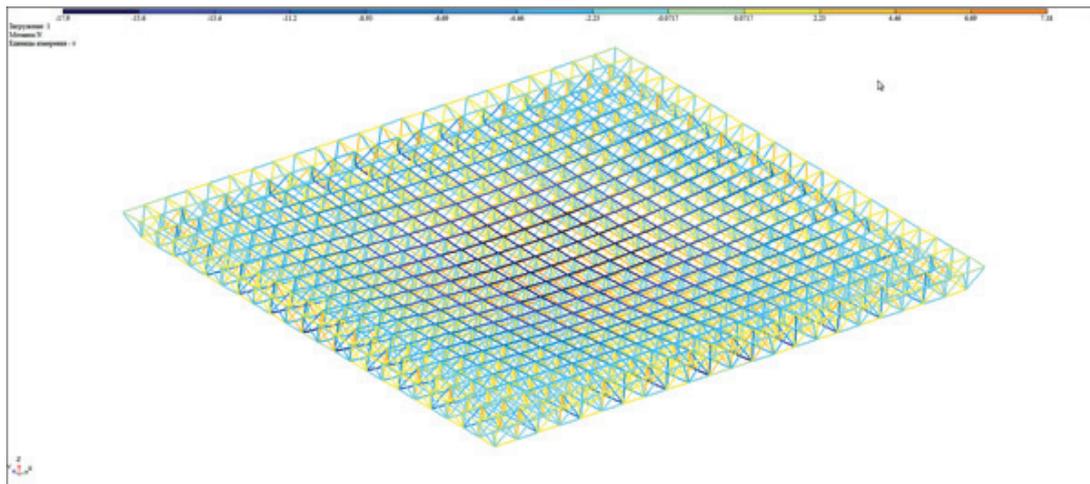


Рис. 5. Деформации и мозаика продольных усилий

Сравнение веса металлоконструкций структурной плиты, спроектированной по компьютерной модели (труба  $\varnothing 70 \times 6$  мм), составляющего 256 т, с весом плиты по приближенному расчету (таблица, трубы  $\varnothing 83 \times 6 - \varnothing 133 \times 11$ ), составляющей 502 т, показывает, что вес последней плиты почти в два раза больше первой.

Таким образом, можно сделать вывод, что приближенный расчет дает сечения стержней структурной плиты с большим и необоснованным запасом прочности. Компьютерная модель структурной плиты позволяет обоснованно снижать вес металлоконструкций.

Результаты сравнения показывают возможность внедрять расчет методом конечных элементов (МКЭ) в процесс проектирования сложных уникальных объектов капитального строительства уже на этапе обучения студентов-архитекторов.

Конструктивная проработка проекта тесно перекликается с элементами художественного формообразования и сочетается с приёмами архитектурной композиции. При разработке ВКР студенты конструируют нестандартные, как правило, сложные строительные конструкции, позволяющие создать неповторимый, выразительный образ проектируемого объекта.

Для ознакомления студентов по направлению обучения Архитектура с современными методами построения компьютерных моделей строительных конструкций в УрГАХУ на кафедре конструкций зданий и сооружений разработана рабочая программа курса «Компьютерное моделирование строительных конструкций». В качестве базового пакета программ МКЭ принята учебная версия пакета программ ЛИРА-САПР, установленного в УрГАХУ. В процессе изучения курса студенты посещают аудиторные занятия и выполняют самостоятельные задания расчетно-графической работы. Опыт использования ЛИРА-САПР в учебном процессе показал, что полученные навыки самостоятельного построения компьютерных моделей позволяют выбрать наиболее рациональные архитектурные решения строительных конструкций зданий и сооружений в ходе выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР).

Далее в качестве примеров приведены компьютерные модели строительных конструкций, построенных студентами в ходе выполнения ВКР. Задачей расчета было проследить работу системы в целом, подтвердить возможность существования такой конструктивной схемы в заданных условиях, проверить верность и целесообразность выбранных сечений и профилей конкретной строительной конструкции, подтвердить протоколами расчета.

При проектировании Технопарка, состоящего из двух частей моноблока, объединённых пешеходным мостом (рис. 6), студентка С.В. Пищулина создала выразительный объем, особен-

ностью которого стала многоярусность здания с переменной этажностью, достичь которой возможно благодаря каркасной конструктивной системе моноблока с укрупненной сеткой колонн. Автор построила компьютерную модель большепролетной стальной конструкции пешеходного моста, являющегося «изюминкой» объемно-пространственного решения технопарка (рис. 7). Особенность пешеходного моста состоит в его криволинейной форме.



Рис. 6. Выпускная квалификационная работа. Технопарк в Екатеринбурге. Автор С.В. Пищулина. Руководитель Ю.А. Никифоров. УрГАХУ. Екатеринбург, 2019

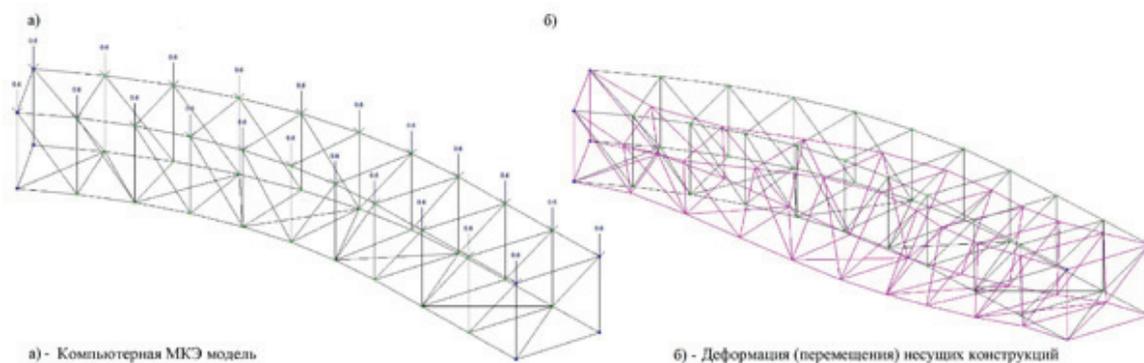


Рис. 7. Моделирование конструкции пешеходного моста в программном комплексе ЛИРА-САПР. Автор С.В. Пищулина

Автор аэропорта «Елизово» (Петропавловск-Камчатский) Н.А. Слащев создал объем в виде трехчастной структуры из незамкнутых колец, образующих небольшие «дворы», которые не только дарят посетителям ощущение комфорта, но и оберегают от суровых ветров этого края (рис. 8). Обтекаемые формы объекта составляют контраст с «ломаными» контурами вулканов и гор на заднем плане аэропорта, а также создают необходимую аэродинамику. Н.А. Слащев построил модель покрытия здания аэропорта в форме тороидальной стальной стержневой пространственной оболочки (рис. 9).

Сложное в плане здание НПК (научно-производственный комплекс) в районе Академический в Екатеринбурге (автор К.А. Остапюк) состоит из нескольких блоков (рис.10). Тектоническая особенность объекта заключается в лаконичной форме объемно-пространственного решения. Автор построила компьютерную модель фрагмента этажной плиты перекрытия административно-научного блока, выполненного из монолитного железобетона толщиной 220 мм, сложной формы (рис. 11). Расчет методом МКЭ в программном комплексе ЛИРА-САПР в полном объеме представлен в пояснительной записке к ВКР.

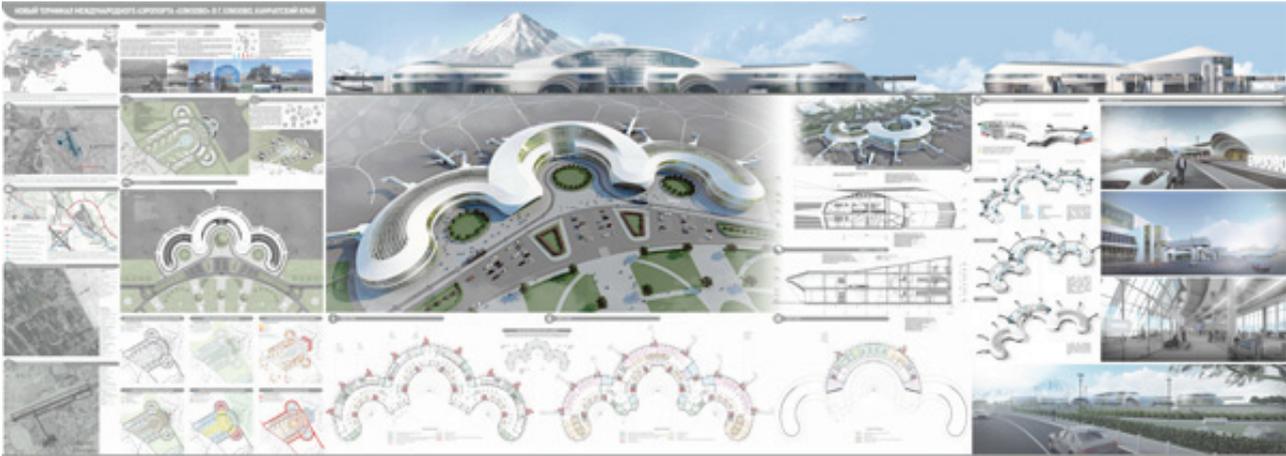


Рис. 8. Выпускная квалификационная работа Аэропорт «Елизово». Петропавловск-Камчатский. Автор Н.А. Слещев, Руководитель М.В. Винницкий. УрГАХУ. Екатеринбург, 2018

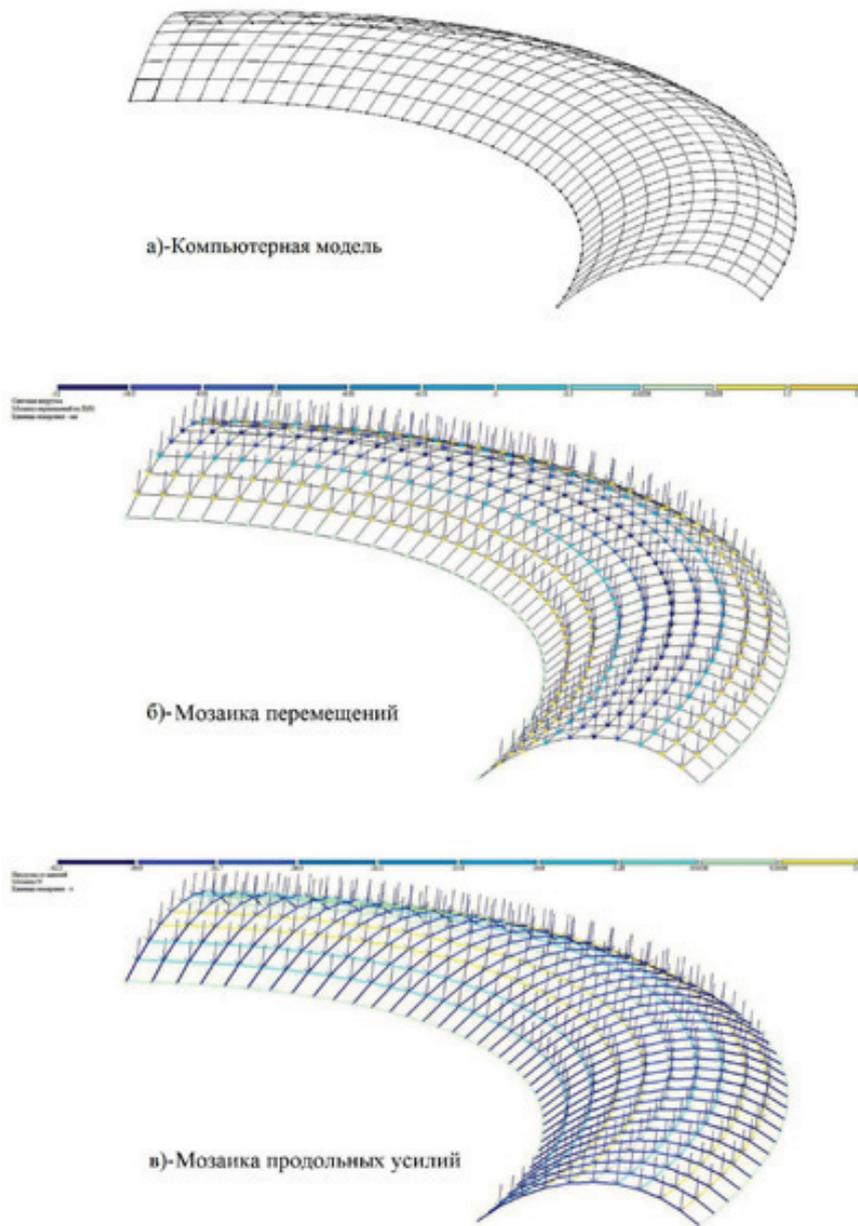


Рис. 9. Моделирование конструкции в программном комплексе ЛИРА-САПР. Автор Н.А. Слещев



Рис. 10. Выпускная квалификационная работа. НПК в микрорайоне Академический. Екатеринбург. Автор К.А. Остапюк. Руководитель Т.Н. Ярковая. УрГАХУ, Екатеринбург, 2018

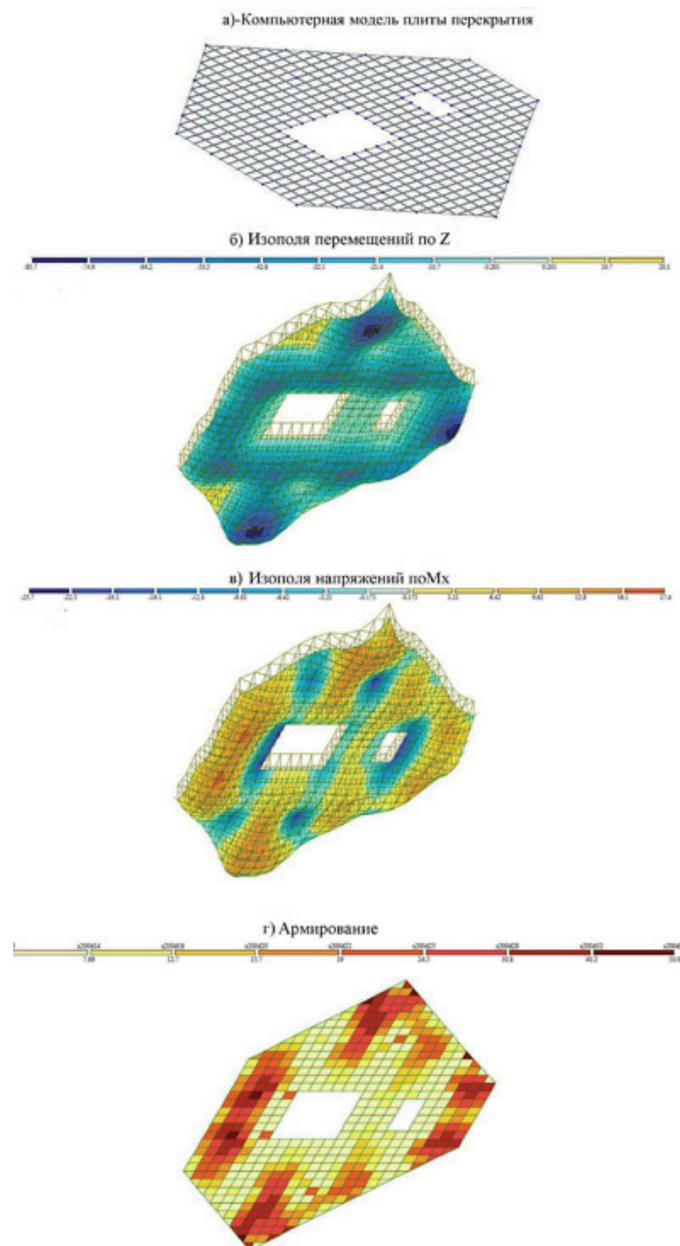


Рис.11. Компьютерное моделирование ж/б перекрытия в программном комплексе ЛИРА-САПР. Автор К.А. Остапюк

Здание часового завода в Екатеринбурге, представленного в работе С.С. Ивановой, имеет характерный образ, формирующий представление о продукции предприятия (рис. 12). Центральное пространство объема акцентировано стальным куполом, перекрывающим атриум. При подборе пространственной конструкции автор провела расчет данной строительной конструкции с подбором сечений элементов (рис. 13).



Рис. 12. Выпускная квалификационная работа. Часовой завод. Екатеринбург. Автор С.С. Иванова. Руководитель Ю.А. Никифоров. УрГАХУ. Екатеринбург, 2018

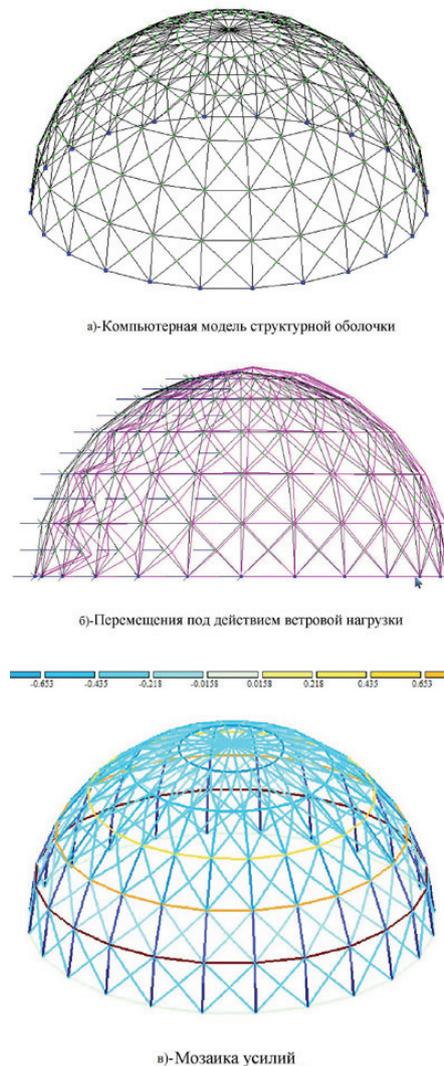


Рис. 13. Моделирование купола в программном комплексе ЛИРА-САПР. Автор С.С. Иванова

Методика преподавания дисциплины «Компьютерное моделирование строительных конструкций» позволяет сделать вывод, что самостоятельный расчет методом МКЭ в программном комплексе ЛИРА-САПР, проводимый студентами в ходе работы над ВКР, позволяет целесообразно подобрать строительные конструкции, а молодым архитекторам чувствовать себя уверенно в области архитектурного конструирования.

## Библиография

1. Трущев, А.Г. Пространственные металлические конструкции : учеб. пособие для вузов / А.Г. Трущев. – М. : Стройиздат, 1983. – 215 с.
2. Карпунин, В.Г., Голубева, Е.А. Компьютерное моделирование строительных конструкций/ Новые информационные технологии в архитектуре и строительстве : мат-лы II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 5–7 ноября 2019 г. / В.Г. Карпунин, Е.А. Голубева. – Екатеринбург : УрГАХУ, 2019. – 64 с. – С.18.
3. Карпунин, В.Г. Компьютерное моделирование строительных конструкций в программном комплексе ЛИРА-САПР : учеб. пособие / В.Г. Карпунин. – Екатеринбург : Архитектон, 2018 – 323 с.

Дата поступления: 10.11.2019

Лицензия Creative Commons

Это произведение доступно по лицензии Creative Commons «Attribution-ShareAlike» («Атрибуция – На тех же условиях») 4.0 Всемирная.



## COMPUTER MODELING OF BUILDING STRUCTURES

### **Karpunin Vyacheslav G.**

PhD. (Engineering), Associate Professor, Department of Building Structures  
Ural State University of Architecture and Art,  
Russia, Yekaterinburg, e-mail: [sl.karpunin@yandex.ru](mailto:sl.karpunin@yandex.ru)

### **Golubeva Ekaterina A.**

PhD. (Architecture), Professor,  
Head of the Subdepartment of Building Structures,  
Ural State University of Architecture and Art,  
Russia, Yekaterinburg, e-mail: [golubeva@usaaa.ru](mailto:golubeva@usaaa.ru)

### **Abstract**

*The article describes computer modeling of permanent building structures based on the finite element method. The finite element calculation methods (FEM) are compared with approximate computation. Using computer modeling of a structural plate as an example, a dramatic decrease in the weight of metal structures is shown in comparison with the approximate computation method. The experience of teaching the discipline "Computer Modeling of Building Structures" to architecture students at the Ural State University of Architecture and Art is presented with examples of complex building structure design performed independently by students using the LIRA-SAPR software package for their final graduation work.*

### **Keywords**

*computer model, finite element method, building construction, LIRA-SAPR, graduate qualification work (WRC)*

### **References:**

1. Trushchev, A.G. (1983) Spatial metal structures. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
2. Karpunin, V.G., Golubeva, E.A. (2019) Computer modeling of building structures. New information technologies in architecture and construction: Proceedings of the 2nd national conference with international participation, November 5–7, 2019. Ekaterinburg: Ural State University of Architecture and Art, p.18. (in Russian)
3. Karpunin, V.G. (2018) Computer modeling of building structures in LIRA-CAD. Ekaterinburg: Architecton. (in Russian)