

EDN: EPZEMQ

УДК 69.001.5

К. С. КОРШИКОВА, А. Е. НАУМОВФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова»,
г. Белгород, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ ТОПОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. Человечество в настоящее время переживает новый этап своего развития, связанный с формированием глобального цифрового общества. Применение цифровых технологий на практике позволяет решать широкий спектр задач. Технологии информационного моделирования используются для обеспечения единой среды для выполнения совместной работы в строительной отрасли. Вместе с этим растет актуальность аддитивных технологий, которая обусловлена новыми подходами к проектированию и созданию конструкций. Использование строительной печати позволяет изготавливать менее материалоемкие изделия за счет соблюдения баланса материала и пустот. Кроме того, подобранная оптимальная внутренняя топология влияет на физико-механические характеристики самой конструкции. На данный момент в стране наблюдается низкий уровень практического применения технологий, позволяющих значительно сократить энергоресурсы. В связи с этим цель работы заключается в проведении анализа влияния внутренней структуры изделия с оптимальным распределением материала на энергоэффективность. Приведены регрессионные зависимости ресурсоемкости от формообразования, а также зависимости возникающих в конструкции напряжений.

Ключевые слова: строительные печатные конструкции, рациональная внутренняя топология, информационное моделирование зданий и сооружений, энергоэффективное проектирование, аддитивные технологии.

Технологии информационного моделирования являются неотъемлемой частью современного строительного процесса. Как говорил Михаил Мишустин, Председатель Правительства Российской Федерации, цифровая трансформация является шансом для вывода России на новый уровень, обеспечивая гражданам новое качество жизни.

В настоящее время самые важные и актуальные задачи, стоящие перед строительной отраслью, это оптимизация бюджетных затрат, рост инвестиционной результативности финансирования объектов капитального строительства, рациональное распоряжение временем, трудом, расходами механизмов и материалов при проведении строительных работ, а также применение современных строительных ресурсов. И добиться решения этих задач возможно с использованием новых технологий.

Кроме того, с каждым годом набирает свои обороты строительная печать. Аддитивное производство за счет ряда своих преимуществ позволяет существенно снизить стоимость строительной продукции. Однако строительная печать все еще далека от массового применения, поскольку есть нерешенные пока сложности [1].

Одним из самых важных преимуществ аддитивных технологий является возможность создавать сложные пространственные и криволинейные формы, делая это с меньшей потерей материала и за меньший срок, чем при традиционных методах изготовления. Параллельно с экономией материалов решается вопрос экологичности, сокращается объем строительных отходов [2].

Использование технологии 3Дпечати в строительной отрасли позволяет минимизировать ошибки, связанные с человеческим фактором, повысить производительность и улучшить охрану труда за счет сокращения опасных видов работ [3].

© К. С. Коршикова, А. Е. Наумов, 2023



В связи с тем, что в процессе печати зданий и сооружений невозможно обойтись без деформационных швов, то в рамках работы было решено разделить здание на отдельные элементы (блоки), совмещая при этом их границы с деформационными швами. Блоки представляют собой пространственные однородные топологически сходные печатные конструкции, совмещая при этом границы элементов с деформационными швами.

Основные цели и задачи работы:

- анализ влияния топологических параметров внутреннего заполнения печатных конструкций на их ресурсоемкость;
- анализ оптимальной теории прочности;
- анализ рациональной внутренней топологии.

Для эффективного достижения результатов поставленных задач была создана параметрическая модель (рис. 1) в среде визуального конструктора сапфир, которая позволяет автоматически создавать модель печатного блока, допускающую вариацию по длине, ширине, высоте, толщине стенки, количеству панелей и триангуляционному шагу.



Рисунок 1 – Параметрическая модель печатного блока.

Анализ влияния топологических параметров внутреннего заполнения печатных конструкций на ресурсоемкость проводился на 14-ти стеновых конструкциях, имеющих одинаковые габаритные размеры, но различное количество панелей.

Для оценки ресурсоемкости строительных печатных конструкций был применен корреляционно-регрессионный анализ. Данный способ один из наиболее широко распространенных приемов обработки статистических данных, состоящий в построении и дальнейшем анализе экономико-математической модели в виде уравнения регрессии, характеризующего зависимость признака от определяющих его факторов [4].

В таблице 1 приведены исходные данные для оценки ресурсоемкости рассматриваемых строительных печатных конструкций.

Таблица 1 – Исходные данные для оценки ресурсоемкости

Кол-во панелей	Объем бетона конструкции, м ³	Масса конструкции, кг
1	0,159	314,95
1,5	0,163	318,53
2	0,168	323,34
2,5	0,175	329,22
3	0,183	336,01
3,5	0,193	343,57
4	0,204	351,76
4,5	0,217	360,51
5	0,231	369,66
5,5	0,247	379,23
6	0,264	389,08
6,5	0,283	399,16
7	0,303	409,52
7,5	0,325	419,10

В таблице 2 приведены зависимости необходимого объема бетона на одну конструкцию и масса готового изделия. Стоит обратить внимание на довольно высокие показатели нормированного R-квадрата, что свидетельствует о качестве полученной модели.

Таблица 2 – Регрессионная зависимость

Регрессионная зависимость	
Масса конструкции = $11,25\Pi + 105,14Б + 9,95ДГ + 4,95ДЛ$	Нормированный R-квадрат = 0,9
Объем бетона = $0,0255\Pi + 0,0475Б$	Нормированный R-квадрат = 0,75

На основе собранных данных была построена графическая зависимость ресурсоемкости от формообразования строительных печатных конструкций (рис. 2).

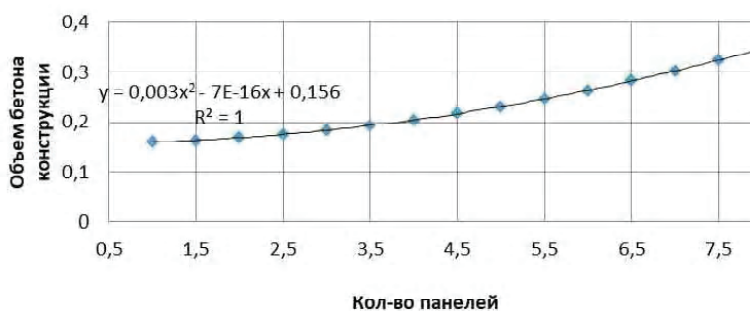


Рисунок 2 – Зависимость объема бетона конструкции от количества панелей.

В рамках отдельного исследования были проанализированы теории прочности. Теория наибольших главных деформаций и теория Писаренко-Лебедева показывают наибольшую общность результатов. Для дальнейших расчетов применяется теория Писаренко-Лебедева как в наибольшей степени отвечающая требованиям к расчету бетонных элементов и имеющую большую стабильность результатов.

В качестве шаблона внутренней топологии была выбрана треугольная решетка, в которой менялось число панелей. Модели сравнивались по общей несущей способности, по максимальным, средним и минимальным эквивалентным напряжениям и главным напряжениям N1 и N3, количеству панелей. Топология показывает, где концентрируется напряжение.

По значениям возникающих напряжений в элементах конструкции и количества панелей построены графики зависимостей. В таблице 3 представлена часть зависимостей полученных напряжений от формообразования конструкции. Нахождение оптимального количества панелей в топологиях происходит путем анализа линий тренда.

Для более детального представления были проанализированы удельные напряжения. Топологическая структура печатной конструкции определяет распределение и концентрацию напряжений в материале. По значениям возникающих напряжений в элементах конструкции и количества панелей построены графики зависимостей параметров напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции от параметров топологической структуры внутреннего заполнения (табл. 4).

По графикам, представленным в таблицах 3 и 4 видно, что удельные напряжения уменьшаются, что объясняется ростом массивности заполнения и увеличением площади сопротивления. При этом удельные эквивалентные напряжения в элементах линейно снижаются со скоростью в пределах 100...200 Па/кг, что позволяет оценить эффект от роста массивности решетки заполнения малозначимым. Таким образом в дальнейшем можно руководствоваться при определении напряжений в конструкции только площадью сечения элемента, определяемого его топологической структурой и параметрами печатного слоя.

Таким образом, использование криволинейных структур дает возможность не только создать уникальные архитектурные формы, но и позволяет уменьшить концентрацию напряжений в строительных конструкциях [5].

А использование параметрических моделей позволит за счет автоматического перестроения геометрии моделей заметно снижать время проектирования конструкции и сводить работу к внесению исходных параметров [6].

Таблица 3 – Зависимость напряжения, возникающих в элементах конструкции от количества панелей

<p>Зависимость максимального эквивалентного напряжения, возникающего в элементах конструкции от количества панелей</p>	
<p>Зависимость максимального главного напряжения N1, возникающего в элементах конструкции от количества панелей</p>	
<p>Зависимость максимального главного напряжения N3, возникающего в элементах конструкции от количества панелей</p>	

Таблица 4 – Зависимость удельных напряжения, возникающих в элементах конструкции от количества панелей

<p>Зависимость удельного максимального эквивалентного напряжения, возникающего в элементах конструкции от количества панелей</p>	
<p>Зависимость удельного максимального главного напряжения N1, возникающего в элементах конструкции от количества панелей</p>	
<p>Зависимость удельного максимального главного напряжения N3, возникающего в элементах конструкции от количества панелей</p>	

В рамках решенной задачи под энергоэффективностью следует понимать минимизацию объемов материала, затраченного на единицу несущей способности, что прямо влияет на снижение стоимости строительства, которое, в свою очередь, может быть переведено в энергетический эквивалент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лунева, Д. А. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития / Д. А. Лунева, Е. О. Кожевникова, С. В. Калошина. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Том 8, № 1. – С. 90–101.
2. 3D printing trends in building and construction industry: A review / Y. W. D. Tay, B. Panda, S. C. Paul [et al.]. – Текст : непосредственный // Virtual and Physical Prototyping. – 2017. – April. – P. 261–276.
3. Rayna, T. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation / T. Rayna, L. Striukova. – Текст : непосредственный // Technological Forecasting & Social Change. – 2016. – September. – P. 214–224.
4. Коршикова, К. С. Совершенствование инструментов предпроектной оценки ресурсоемкости строительных объектов / К. С. Коршикова. – Текст : непосредственный // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова, 30 апреля – 20 мая 2021 года, Белгород. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2021. – С. 1138–1143. – EDN: SFWSCH.
5. Naboni, R. Advanced Customization in Architectural Design and Construction / R. Naboni, I. Paoletti. – Berlin : Springer Verlag, 2015. – 170 p. – Текст : непосредственный.
6. Суворова, М. О. Технология энергоэффективного топологического формообразования структур строительных печатных конструкций / М. О. Суворова, К. С. Коршикова. – Текст : непосредственный // Современные перспективы строительства : сборник научных статей по материалам Молодежной научной школы. – Калининград : Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, 2023. – С. 116–120.

Получена 12.05.2023

Принята 23.05.2023

К. С. КОРШИКОВА, А. Є. НАУМОВ
ДОСЛІДЖЕННЯ ОКРЕМИХ АЛГОРИТМІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
ФОРМОУТВОРЕННЯ ПІД ЧАС РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ ТОПОЛОГІЇ
БУДІВЕЛЬНИХ ДРУКАРСЬКИХ КОНСТРУКЦІЙ
ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університет
імені В. Г. Шухова»,
м. Белгород, Російська Федерація

Анотація. Людство нині переживає новий етап свого розвитку, пов'язаний із формуванням глобального цифрового суспільства. Застосування цифрових технологій на практиці дозволяє вирішувати широкий спектр завдань. Технології інформаційного моделювання використовуються для забезпечення єдиного середовища для виконання спільної роботи в будівельній галузі. Разом із цим зростає актуальність адитивних технологій, що зумовлена новими підходами до проектування та створення конструкцій. Використання будівельного друку дає змогу виготовляти менш матеріаломісткі вироби завдяки дотриманню балансу матеріалу та пустот. Крім того, підібрана оптимальна внутрішня топологія впливає на фізико-механічні характеристики самої конструкції. Наразі в країні спостерігається низький рівень практичного застосування технологій, що дають змогу значно скоротити енергоресурси. У зв'язку з цим мета роботи полягає в проведенні аналізу впливу внутрішньої структури виробу з оптимальним розподілом матеріалу на енергоефективність. Наведено регресійні залежності ресурсоемності від формоутворення, а також залежності напружень, що виникають у конструкції.

Ключові слова: будівельні друковані конструкції, раціональна внутрішня топологія, інформаційне моделювання будівель і споруд, енергоефективне проектування, адитивні технології.

KSENIA KORSHIKOVA, ANDREY NAUMOV
THE STUDY OF INDIVIDUAL ALGORITHMS OF ENERGY-EFFICIENT
SHAPING IN THE RATIONALIZATION OF THE TOPOLOGY OF BUILDING
PRINTED STRUCTURES
FSBEI HE «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov»,
Belgorod, Russian Federation

Abstract. Humanity is currently experiencing a new stage in its development with the emergence of a global digital society. The application of digital technologies in practice allows solving a wide range of tasks. Information modelling technologies are used to provide a unified environment for collaborative work in the construction industry. At the same time, the relevance of additive technology is growing, driven by new approaches to design and construction. The use of construction printing makes it possible to produce less material-intensive products by balancing material and voids. In addition, the selected optimum internal

topology influences the physical and mechanical characteristics of the structure itself. At the moment, there is a low level of practical application of technologies that can significantly reduce energy resources in the country. In this regard, the aim of the work is to analyse the influence of the internal structure of a product with optimum material distribution on energy efficiency. The regression dependencies of resource intensity on shaping as well as the dependencies of the stresses occurring in the structure are given.

Keywords: building printed structures, rational internal topology, information modeling of buildings and structures, energy-efficient design, additive technologies.

Коршикова Ксения Сергеевна – магистрант кафедры экспертизы и управления недвижимостью ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация. Научные интересы: создание информационных моделей зданий и сооружений, создание параметрических моделей, внедрение технологии информационного моделирования в строительную отрасль. Разработка технологии энергоэффективного топологического формообразования структур строительных печатных конструкций.

Наумов Андрей Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой экспертизы и управления недвижимостью ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова», г. Белгород, Российская Федерация. Научные интересы: структурно-ресурсная оптимизация конструктивных и технологических решений в строительстве, аппаратно-программные технологии строительных изысканий, информационное моделирование зданий и управление жизненным циклом недвижимости.

Коршикова Ксенія Сергіївна – магістрант кафедри експертизи та управління нерухомістю ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університеті імені В. Г. Шухова», м. Белгород, Російська Федерація. Наукові інтереси: створення інформаційних моделей будівель і споруд, створення параметричних моделей, впровадження технології інформаційного моделювання в будівельну галузь. Розробка технології енергоефективного топологічного формоутворення структур будівельних друкованих конструкцій.

Наумов Андрій Євгенович – кандидат технічних наук, доцент; завідувач кафедри експертизи та управління нерухомістю ФДБОУ ВО «Белгородський державний технологічний університеті імені В. Г. Шухова», м. Белгород, Російська Федерація. Наукові інтереси: структурно-ресурсна оптимізація конструктивних і технологічних рішень у будівництві, апаратно-програмні технології будівельних вишукувань, інформаційне моделювання будівель та управління життєвим циклом нерухомості.

Korshikova Ksenia – master's student, Examination and Management of Real-Estate Department, FSBEI HE «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov», Belgorod, Russian Federation. Scientific interests: creation of information models of buildings and structures, creation of parametric models, implementation of information modeling technology in the construction industry. Development of technology for energy-efficient topological shaping of structures of building printed structures.

Naumov Andrey – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Head Examination and Management of Real-Estate Department, FSBEI HE «Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov», Belgorod, Russian Federation. Scientific interests: structural and resource optimization of structural and technological solutions in construction, hardware and software technologies of construction surveys, information modeling of buildings and real estate life cycle management.