

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1713-1730

Оптимизация определения и приложения сложнораспределенных нагрузок на вантовое покрытие двоякой кривизны

Владислав Алексеевич Дагаев¹, Георгий Максимович Пурвин¹,
Филипп Сергеевич Школяр²

¹ Спектрум-Холдинг; г. Москва, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы развитие программирования затрагивает все больше сфер, в том числе и архитектурно-строительную область. В проектной деятельности появляются новые инструменты, позволяющие численно описывать параметры строительных конструкций, при помощи которых легко изменять их формы и конфигурацию. Данное направление дает возможность уйти от более трудоемких и длительных процессов ручного редактирования графических материалов. Такой подход к архитектурному проектированию называют параметрическим моделированием. Без него трудно представить создание сложных геометрических форм здания как многоэтажных, так и большепролетных, к которым можно отнести вантовые покрытия.

Материалы и методы. Процесс оптимизации сбора нагрузок на криволинейные формы нагляднее демонстрировался на примере определения и приложения снеговых и ветровых нагрузок на вантовое покрытие двоякой кривизны здания велодрома, так как, согласно нормативным документам, от геометрии здания зависит коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие и аэродинамический коэффициент, которые, как правило, определяются по результатам продувки, однако для уменьшения трудоемкости исследования зоны распределения этих коэффициентов интерполировались по уже имеющимся в нормативных документах формам.

Результаты. Выполнен сбор нагрузок на расчетную конечно-элементную схему здания велодрома с покрытием двоякой кривизны по ортогональной вантовой сети, в том числе 4 типа снеговой нагрузки и 2 типа ветровой нагрузки.

Выводы. Использование Grasshopper позволило уйти от упрощения и интерполяции как величины давления от снега и ветра в нескольких направлениях, так и значений грузовых площадей в каждой точке вантовой сети. Такой более точный подход в совокупности с результатами аэродинамических испытаний и автоматизированной передачи данных в расчетные комплексы позволит более точно определять НДС сложных покрытий, уйти от перерасчета и переназначения сложных неравномерно распределенных линейных и нелинейных нагрузок в расчетных схемах при изменении исходных данных с экономией трудовых и временных затрат на контроль этих процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: параметрическое моделирование, Grasshopper, конечно-элементный расчет, большепролетное здание, сложнораспределенная нагрузка, вантовое покрытие, снеговая нагрузка, ветровая нагрузка

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Дагаев В.А., Пурвин Г.М., Школяр Ф.С. Оптимизация определения и приложения сложнораспределенных нагрузок на вантовое покрытие двоякой кривизны // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1713–1730. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1713-1730

Автор, ответственный за переписку: Владислав Алексеевич Дагаев, dagaev@spgr.ru.

Optimization of determination and application of complexly distributed loads on a double curvature cable-stayed covering

Vladislav A. Dagaev¹, Georgii M. Purvin¹, Filipp S. Shkoliar²

¹ Spectrum-Holding; Moscow, Russian Federation;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU); St. Petersburg; Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In recent years, the development of programming affects more and more spheres, including the architectural and construction field. New tools appear in the design activity allowing to describe numerically the parameters of building structures, with the help of which it is easy to change their shape and configuration. This direction allows to get away from more labour-intensive and time-consuming processes of manual editing of graphic materials. This approach to architectural design is called parametric modelling. Without it, it is difficult to imagine the creation of complex geometric shapes of buildings, both multi-storey and large-span, to which cable-stayed coverings can be referred. The interest in such structures, due to their impressive shaping, has turned their design into a complex engineering and technical task and actual work.

Materials and methods. The process of optimization of the collection of loads on curvilinear forms was more clearly demonstrated on the example of determination and application of snow and wind loads on the cable-stayed covering of double curvature of the velodrome building, as, according to normative documents, the geometry of the building depends on the transition coefficient from the weight of the snow cover of the ground to the snow load on the covering and the aerodynamic coefficient, which, as a rule, are determined by the results of blowing, but in order to reduce the labour intensity of the study, the distribution zones of these coefficients were interpolated according to the forms already available in normative documents.

Results. A collection of loads on the computational finite element scheme of the velodrome building with a double curvature covering by an orthogonal cable-stayed network, including 4 types of snow load and 2 types of wind load, was performed.

Conclusions. The use of Grasshopper made it possible to get away from simplification and interpolation of both the magnitude of pressure from snow and wind in several directions and the values of load areas at each point of the cable-stayed network. This more accurate approach together with the results of aerodynamic tests and automated data transfer to the calculation systems will allow to determine more accurately the SSS of complex coverings, to avoid recalculation and reassignment of complex non-uniformly distributed linear and nonlinear loads in the calculation schemes when changing the initial data with saving labour and time costs for the control of these processes.

KEYWORDS: parametric modelling, Grasshopper, finite element calculation, large-span building, complexly distributed load, cable-stayed covering, snow load, wind load

FOR CITATION: Dagaev V.A., Purvin G.M., Shkoliar F.S. Optimization of determination and application of complexly distributed loads on a double curvature cable-stayed covering. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1713-1730. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1713-1730 (rus.).

Corresponding author: Vladislav A. Dagaev, dagaev@spgr.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все больше физических явлений и процессов стало возможно смоделировать без использования натуральных испытаний. Это было достигнуто при помощи развития программирования, упрощения написания кодов и уравнений. Их применение наблюдается в разных отраслях, в частности в проектировании конструкций и архитектуре. В архитектурно-строительном проектировании существующие инструменты моделирования и анализа являются чрезвычайно мощными и дают возможность генерировать и анализировать практически любые формы. Однако большинство из них не позволяют проектировщикам оперативно получать и анализировать сгенерированные формы и оболочки. Поскольку эксплуатационные характеристики конструкции сильно связаны с архитектурной геометрией, имеется потребность в вычислительных стратегиях, позволяющих постоянно получать, анализировать и корректировать получаемые характеристики проектируемых объектов на каждой стадии разработки. С введением вычислений архитекторы и конструкторы уходят от макетного моделирования на ранних стадиях и используют 3D-моделирование с помощью «нодового» программирования. «Ноды» в таком программировании архитектуры можно понимать как набор инструкций, присваивающих определенные атрибуты конструкций или предписывающих процесс манипулирования ими, что дает возможность быстро исследовать сложные геометрии и может быть объединено с алгоритмами анализа и оптимизации для проектирования, ориентированного на производительность. Цифровое моделирование и визуализация архитектурных форм зданий стало эталоном в работе архитекторов и является неизбежным в архитектурном образовании. Из оригинальных 2D-программ, используемых для рисования архитектурных проек-

тов, программное обеспечение теперь превратилось в интеллектуальные 3D-программные пакеты, основанные на параметрическом моделировании [1, 2].

Путем использования параметрического моделирования, зная правильные входные параметры и понимая геометрическую логику, архитекторы могут добиться одновременно сложной эстетической формы и эффективного функционального дизайна.

Параметрическое моделирование — это новый подход к архитектурному проектированию, использующий алгоритмы для генерации виртуальных объектов. Объект или элементы модели могут быть созданы автоматически на основе внутренних логических аргументов, так называемых «нодов», а не перестраивая элементы вручную [3, 4].

В рамках этого процесса проектирования архитекторы могут решать визуальные, перцептивные, материальные и структурные проблемы, достигая при этом значительного улучшения времени и точности. Результатом, с которым будет работать проектировщик, будет параметрическая модель.

Параметрическая модель — это компьютерное представление проекта, выполненное с помощью геометрических фигур с постоянными и переменными свойствами. Переменные свойства называются параметрами. Проектировщик может изменять параметры в параметрической модели для поиска различных альтернативных решений проблем в модели. Параметрическая модель получается автоматически путем изменения единственных параметров без необходимости изменения или перерисовки [5, 6].

Переход к параметрическому моделированию строительных конструкций, вероятно, повлияет на практику проектирования множеством способов. Непосредственное влияние на ранних стадиях внедрения в любой проектной практике будет заключаться в повышении производительности проектировщика при разработке проектной документации.

Авторами на основе затраченного количества часов на проектирование и детализацию железобетонных строительных конструкций в нескольких вариантах по технологии параметрического моделирования было выполнено исследование, по результатам которого выявлен прирост производительности. По консервативным оценкам — от 15 до 41 % [7].

Помимо вышесказанного, параметрическое моделирование позволяет решать сложные инженерные задачи, такие как проектирование конструкций со сложной геометрической формой покрытия.

На рубеже XX в. российский инженер Владимир Шухов разработал всемирно известный способ проектирования гиперболоидных конструкций и металлических сетчатых оболочек строительных конструкций. Его филигранные конструкции — от решетчатой оболочки до висячей крыши — неподвластны времени в своей экономичности, легкости и, не в последнюю очередь, простоте. Сочетая глубокие геометрические и механические знания, В. Шухову удалось создать удивительно прагматичные конструкции. Решающей стратегией для упрощения была преднамеренная, упругая и пластическая деформация Z , L и плоских стальных профилей в непрерывно изогнутые элементы конструкции. В результате В. Шухов смог собрать сложные решетки двойной кривизны, используя только повторяющиеся компоненты и простые заклепочные соединения.

В. Шухов заложил основы проектирования металлических конструкций, которые используются и по сегодняшний день. Помимо решетчатых конструкций его знания применяют и в проектировании конструкций сложной формы, таких как большепролетные кровли и кровли криволинейной формы [8].

Большепролетные покрытия вызывают повышенный интерес в течение последних шестидесяти лет. Арковидная стальная крыша велодрома с максимальным пролетом, высотой и длиной, равными 109,5, 23,07 и 126 м соответственно, была выбрана как объект исследования. Выбор предпочтительного конструктивного решения и анализ поведения несущих элементов большепролетной арки велодрома являются целью исследования [9].

Разработаны новые методы создания сложных геометрических форм зданий с крышей из множества складчатых оболочек, созданных на основе новой многогранной сети и расположенных в соответствии с поверхностью отрицательной гауссовой кривизны. Они позволяют преодолеть существующие значительные геометрические и материальные ограничения, связанные с формообразованием номинально плоских прямоугольных складчатых стальных листов [10]. Благодаря гофрированию эти конструкции обладают исключительной особенностью: волнистая форма в их кромке обеспечивает значительное улучшение их структурного поведения, увеличивая изгибную жесткость на краю и позволяя уменьшить его толщину. Более того, если

рассматривать нелинейное поведение, то гофрирование куполов играет важную роль в явлениях устойчивости. Проблемой при исследовании такого рода оболочек служит определение математической и геометрической модели построения подходящей сетки для проведения структурного анализа [11].

Примером применения оболочечных конструкций могут быть кровельные конструкции от schlaich bergemann partner, павильон Porsche и навес для выхода из клиентского центра, которые были недавно построены в «Автоштадте» в Вольфсбурге, Германия, всего в 200 м друг от друга. Обе крыши легкие и двускатные, но одна работает в основном на сжатие и использует гофрированные оболочки, а другая представляет собой предварительно напряженную растягивающуюся конструкцию вантовой сети, которая также является отличным решением задачи по перекрытию большого пролета, но недостаточно исследована [12, 13].

Интерес к вантовым покрытиям сооружений в последнее время также превратил проектирование таких покрытий в актуальную инженерную проблему, требующую дополнительных исследований. Этому способствуют не только экономические преимущества вантовых покрытий, но и развитие методов расчета и методик проектирования. Ведутся научные работы, связанные с исследованием статических, динамических и кинематических свойств вантовых систем с использованием компьютерных технологий. В результате здания и сооружения с применением вантовых систем получают все более широкое распространение, такие как покрытия общественных и промышленных большепролетных зданий, вантовые мосты и путепроводы [14–16].

На данный момент существует множество статей с анализом пространственной работы вантовой сети: в некоторых из них представлены новые конструкции покрытия для большепролетных зданий — цилиндро-плитно-вантовое покрытие (ЦПВ), объединяющее в себе три вида конструкций: цилиндрическую оболочку нулевой гауссовой кривизны, плоского и вантового (висячего) покрытий [17]. Как известно, особенность подобных расчетов заключается в том, что при их выполнении нельзя использовать ряд известных теорий и законов строительной механики, таких как принцип возможных перемещений и взаимности работ, закон независимости действия сил и др. [18]. Исследовано влияние податливости отрезков вант на смещения и напряжения вантовых конструкций в геометрически нелинейном анализе провисающих и натянутых тросовых конструкций с учетом нелинейной работы материала под действием собственного веса, предварительного натяжения и внешних нагрузок [19].

А также новые модели пучков вантовой сети, которые учитывают влияние угла укладки на поперечное сечение нити, приводящее к меньшим осевым усилиям и крутящему моменту, но более силь-

ной пластической деформации, различия в которых изменяются с увеличением угла укладки и внешнего диаметра проволоки [20].

Авторами [21] произведено численное исследование, в котором для одной и той же конструкции кровли предложены четыре различные системы: плоская ферма, пространственная ферма, вантовая плоская ферма и вантовая пространственная ферма. Для каждой системы проводился структурный анализ при всех комбинациях расчетных нагрузок и был сделан вывод, что пространственная ферма и вантовая пространственная ферма обеспечивают наиболее эффективную работу, а также экономичность.

В нынешней строительной практике есть немало случаев разрушения конструкций под воздействием, вызванным ветром, снегом, и их совместным воздействием на большепролетные пространственные конструкции, это свидетельствует о недостаточном исследовании повреждений, вызванных этими явлениями. Поэтому для инженерной практики важно определить глобальную надежность большепролетных пространственных конструкций с учетом совместного воздействия ветра и снега [22, 23].

Процесс сбора нагрузок на вантовую сеть — важный аспект в обеспечении безопасности большепролетных конструкций с изогнутой кровлей. Он достаточно сложный, так как при отсутствии оптимизации нагрузку придется задавать вручную на каждый конечный элемент вантовой сети, что может привести к множеству ошибок.

Решением данной инженерной задачи станет использование среды параметрического моделирования Rhinoceros и Grasshopper. Выбрано применение среды параметрического моделирования Grasshopper как способа задания и сбора нагрузок на покрытие двойкой кривизны из вантовой сети здания велодрома.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы проиллюстрировать процесс оптимизации сбора нагрузок на криволинейные формы наиболее наглядно, можно использовать примеры определения снеговой и ветровой нагрузок. Это связано с тем, что в соответствии с нормативными документами¹ коэффициент перехода от веса снежного покрова на земле к нагрузке снега на покрытие и аэродинамический коэффициент зависят от геометрии здания и покрытия, которые, как правило, определяются путем моделирования продувки или натурными испытаниями в аэродинамических трубах [24].

Объект исследования — здание велодрома с вантовым покрытием двойкой кривизны (рис. 1),

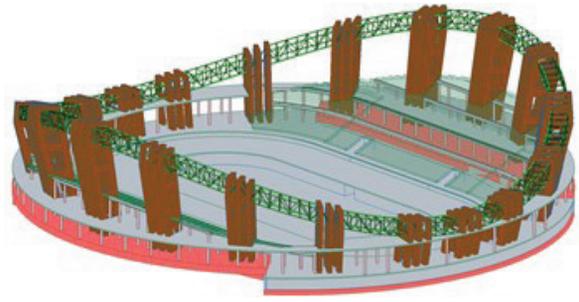


Рис. 1. Расположение основных несущих конструкций (вантовая сеть условно не показана)

Fig. 1. Location of the main load-bearing structures (cable-stayed network is conventionally not shown)

расчет которого является основной целью данной работы [25].

Предполагаемым расположением велодрома для определения снеговой и ветровой нагрузок стал г. Новосибирск. Авторами [26] был описан процесс построения геометрии здания и определения параметров несущих конструкций.

Нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия¹:

$$S_0 = c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g.$$

С определением коэффициентов c_e , c_t проблем не возникает, как и с установлением значения S_g [25]. Основная сложность заключается в опре-

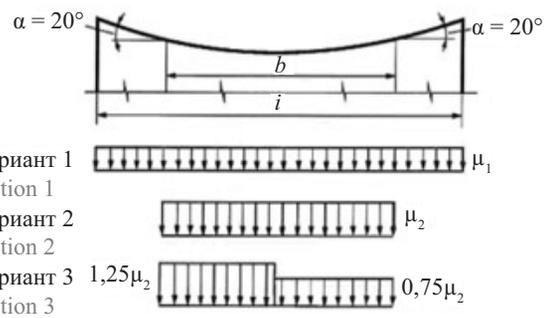


Рис. 2. Схема для определения коэффициента формы для висячих покрытий цилиндрической формы

Fig. 2. Scheme for determining the shape factor for cylindrically shaped hanging coverings

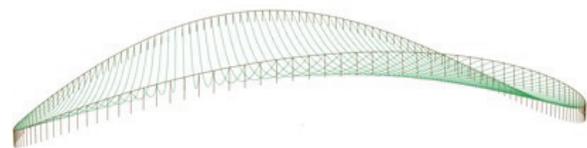


Рис. 3. Несущие ванта с переменным шагом перекрываемого пролета (стабилизирующие ванта условно не показаны)

Fig. 3. Load-bearing cables with variable span spacing (stabilizing cables are conventionally not shown)

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М. : Минстрой России, 2017. С. 87.

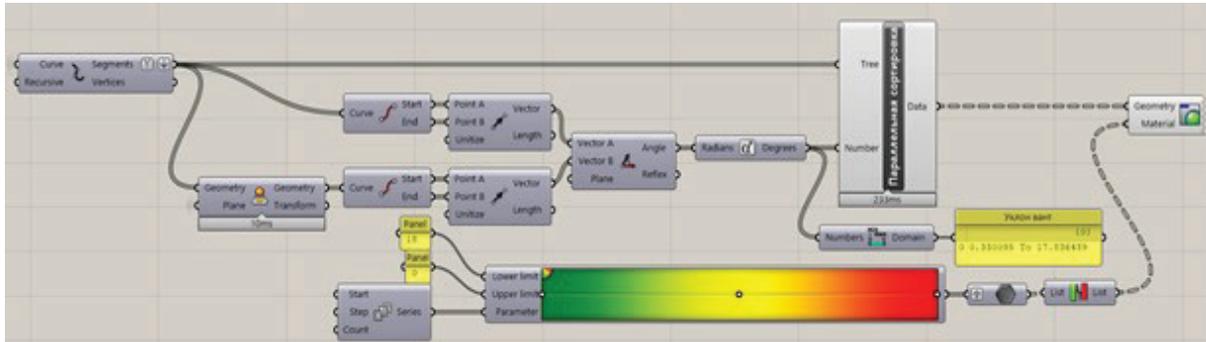


Рис. 4. Фрагмент кода, определяющий уклон несущих вант с отображением градиента

Fig. 4. Code fragment defining the slope of the load-bearing cables with gradient display

делении μ , где μ — коэффициент формы, учитывающий переход от веса снежного покрова на земле к нагрузке снега на покрытие, однако в нормативной литературе отсутствует указание на зоны распределения значения коэффициента формы для круглых зданий с висячим покрытием двойкой кривизны. Наиболее подходящей схемой для определения коэффициента формы являются висячие покрытия цилиндрической формы¹ (рис. 2).

Поскольку нагрузка на покрытие передается только через несущие ванты, то покрытие двойкой кривизны можно представить в виде здания цилиндрической формы с переменным значением пролета и шага ортогональной вантовой сети. Для каждой нити (рис. 3) будут свои параметры b и l , от которых зависит коэффициент формы μ .

Несущие ванты делятся на части в точках пересечения со стабилизирующими. Спроецировав их на плоскость XU , определяется уклон вант (рис. 4).

На рис. 5 отображен результат работы скрипта с проектным уклоном вант, который изменяется

от 0 до 17°. Темно-зеленый цвет имеют участки вант с уклоном от 16 до 17°. Красный цвет — участки вант с уклоном от 0 до 1°.

Учитывая то, что угол наклона кровли представленной схемы менее 20° (рис. 5), для всех вант $b = l$ и $\mu_2 = l/b = 1$. Таким образом, 1-й и 2-й варианты (рис. 2) распределения снеговой нагрузки на покрытие являются одинаковыми.

Нормы не предусматривают учет неравномерного распределения снега по большинству форм висячих покрытий, а данные, полученные в нормативном документе² (рис. 6), являются первичными и необязательными.

Рассмотрение расчетной модели в данной постановке не принимает во внимание вероятность реального возникновения таких нагрузок, а лишь учитывает возможный перенос снега ветром, ча-

² СП 457.1325800.2019. Сооружения спортивные для велосипедного спорта. Правила проектирования. М. : Минстрой России, 2019. С. 20.

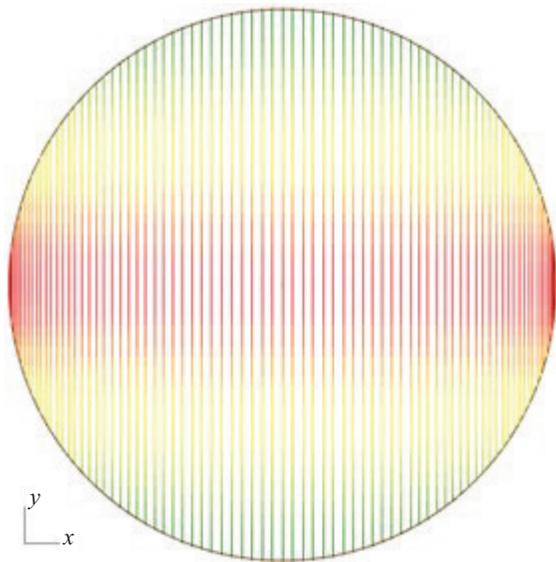


Рис. 5. Визуализация величины угла наклона несущих вант к горизонту, полученная с помощью Grasshopper

Fig. 5. Grasshopper visualization of the angle of inclination of the load-bearing cables to the horizon

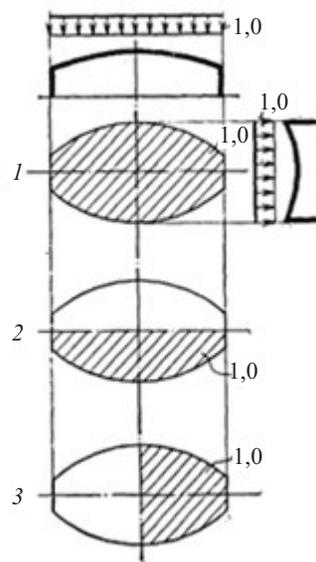


Рис. 6. Данные по фактическому распределению снега по поверхности покрытия, выраженные через коэффициент μ

Fig. 6. Data on the actual snow distribution over the covering surface, expressed through the coefficient μ

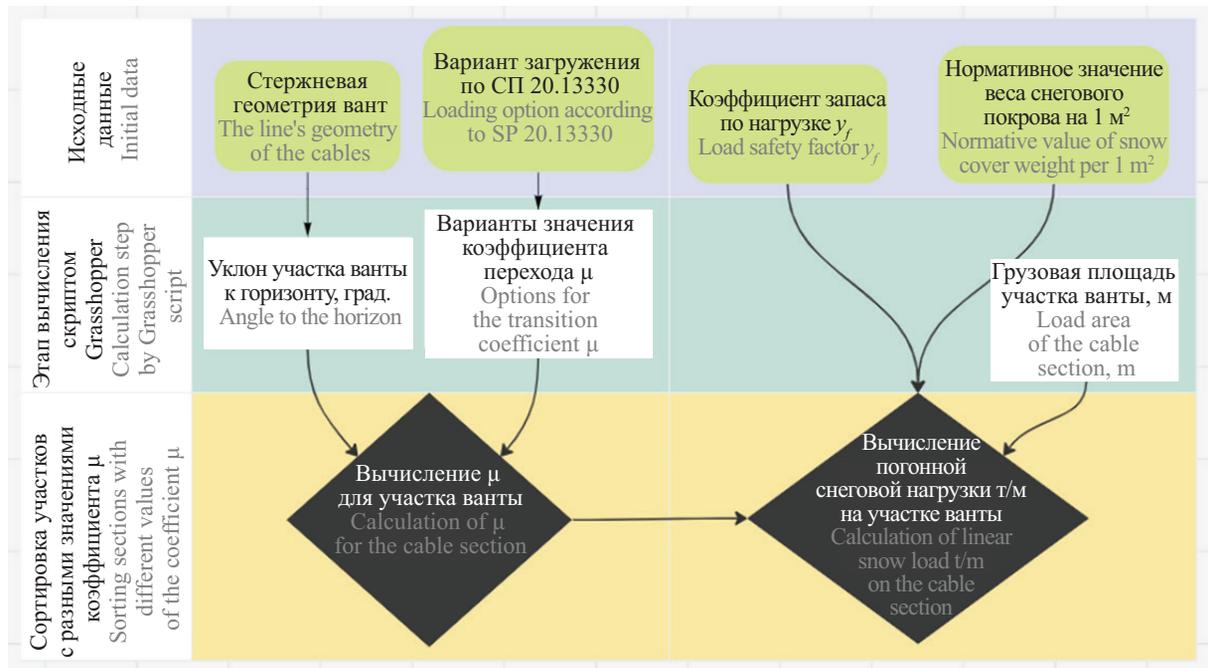


Рис. 7. Блок-схема скрипта Grasshopper с определением нагрузки для разных вариантов загрузений

Fig. 7. Block diagram of Grasshopper script with load detection for different load variants

стичную очистку покрытия от снега и др. Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) расчетной схемы таким методом не учитывает реальное распределение максимальных усилий и возникающих перемещений в конструкциях.

Фрагмент кода для определения снеговых нагрузок по несущим вантам с помощью Grasshopper представлен в работе [25]. На рис. 7 приведена блок-схема скрипта с определением нагрузки для разных вариантов загрузений.

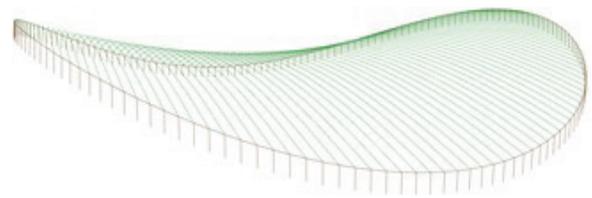


Рис. 8. Стабилизирующие ванты с переменным шагом перекрываемого пролета (несущие ванты условно не показаны)

Fig. 8. Stabilizing cables with variable spacing of the span to be bridged (supporting cables are conventionally not shown)

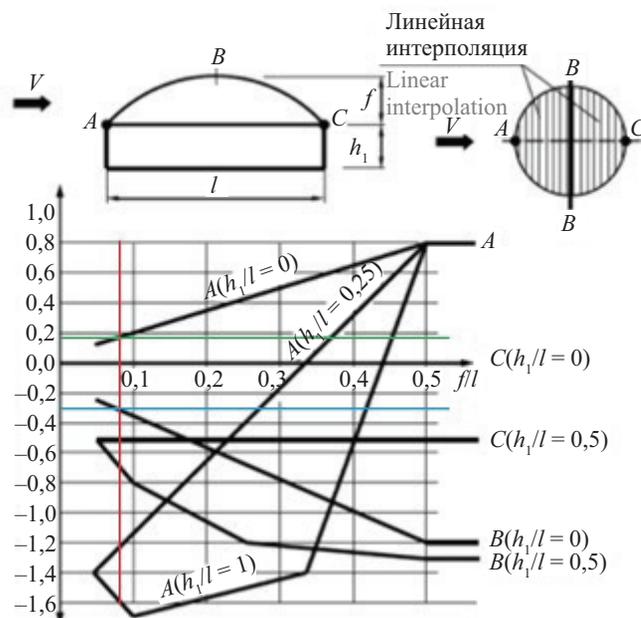


Рис. 9. Схема распределения аэродинамического коэффициента (Приложение В1.4, 23)

Fig. 9. Aerodynamic coefficient distribution diagram (App. B1.4, 23)

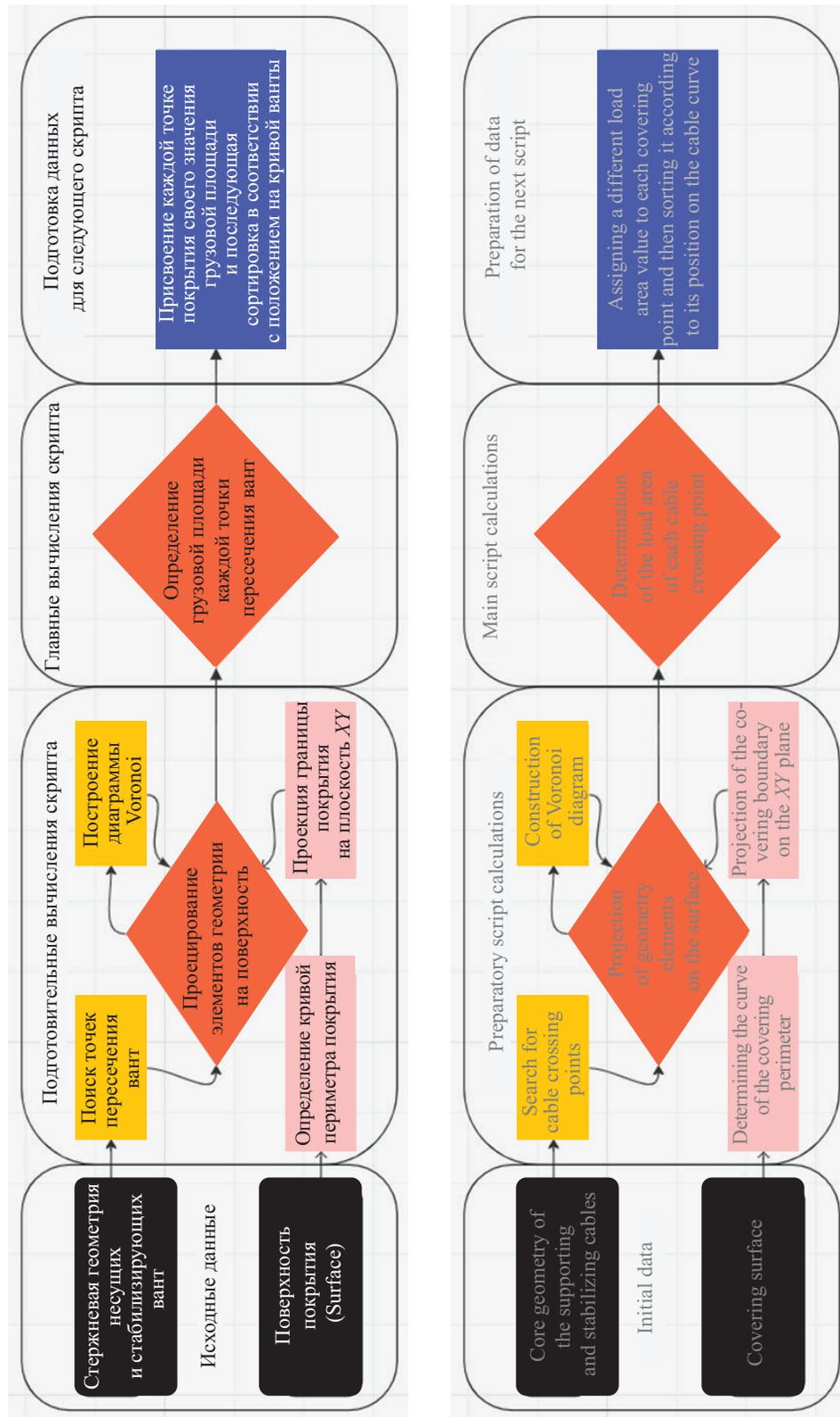


Рис. 10. Блок-схема скрипта построения геометрии для определения ветровых нагрузок в Grasshopper
 Fig. 10. Block diagram of the geometry script for determining wind loads in Grasshopper

В легких покрытиях неравномерное давление ветра вызывает большие деформации покрытия и даже явление аэродинамической неустойчивости покрытия, т.е. его вибрацию, поэтому к определению ветровой нагрузки необходимо подходить с особенной точностью.

Рассматриваются два варианта действия ветровой нагрузки: вдоль несущих и вдоль стабилизирующих вант. Во всех случаях значение основной нормативной ветровой нагрузки вычисляется согласно выражению [3]:

$$W = W_m + W_p.$$

Определим среднюю (статическую) составляющую ветровой нагрузки W_m по формуле¹:

$$W_m = W_0 \cdot k(z_e) \cdot c.$$

Значения W_0 и $k(z_e)$ устанавливаются согласно нормативному документу¹, аэродинамический коэффициент c и схемы его распределения для круглых в плане покрытий двойкой кривизны в нормативных документах¹ отсутствуют.

Для предварительной оценки предлагаем рассмотреть такое покрытие, как купольное, круглое в плане, по аналогии со случаем определения снеговой нагрузки. Вместо несущих вант формообразующими здесь являются стабилизирующие ванты, показанные на рис. 8. Несущие ванты передают нагрузку через узлы пересечения со стабилизирующими. Если ветер направлен вдоль стабилизирующих вант, то можно использовать распределение аэродинамического коэффициента, аналогичное схеме для круглых зданий с купольным покрытием¹.

В случае купольных покрытий значения коэффициентов c_e постоянны вдоль сечений, параллельных оси $B-B$, их значения в точках A и C , а также в сечении $B-B$ приведены на рис. 9. Для промежуточных сечений коэффициенты c_e могут быть установлены с помощью линейной интерполяции.

Для определения значения c_e в точках A , B и C :

$$\frac{f}{l} = \frac{10,50}{130} = 0,08; \quad \frac{h_1}{l} = \frac{3,50}{130} = 0,027 \approx 0.$$

В точке A : $c_e = 0,18$, $W_m^A = 0,039 \cdot 1,23 \cdot 0,18 = 0,009 \text{ т/м}^2$.

В сечении B : $c_e = -0,3$, $W_m^B = 0,039 \cdot 1,23 \times (-0,3) = -0,014 \text{ т/м}^2$.

В точке C : $c_e = 0$, $W_m^C = 0$.

Нагрузка от ветра прикладывается к узлам пересечения несущих и стабилизирующих вант. Каждая такая точка имеет собственную грузовую площадь. Чтобы уменьшить количество трудовых и временных затрат для расчета ветровой нагрузки используем Grasshopper. На рис. 10 показана блок-схема скрипта построения геометрии для определения ветровых нагрузок.

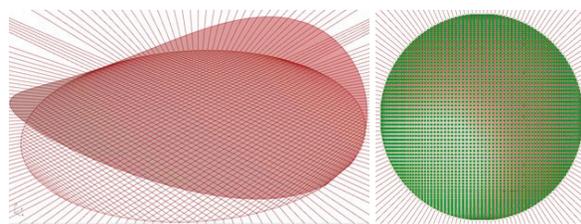


Рис. 11. Ячеистая структура Voronoi на плоскости XY , построенная вокруг точек пересечения несущих и стабилизирующих вант

Fig. 11. Voronoi cellular structure on the XY plane, built around the intersection points of load-bearing and stabilizing cables

Для дальнейшего анализа схемы вантового покрытия перейдем к его построению. С помощью инструмента Voronoi предлагается построить ячеистую структуру на плоскости XY . Инструмент ищет точки на равноудаленном расстоянии от заданных и объединяет их полилиниями в ячейки на рис. 11.

Центрами полученных ячеек являются спроецированные на эту же плоскость точки пересечения стабилизирующих и несущих вант. Обратное проецирование полученной структуры на поверхность покрытия даст грузовую площадь точки пересечения вант. Так как число точек порядка 3800 штук, то проецирование и построение сразу всей структуры на поверхности покрытия требует очень больших мощностей компьютера. С помощью параллельной сортировки разделим точки и грузовые площади на «ветки данных». Каждая «ветка данных» объединяет точки и структуры, располагающиеся на одной из вант. На рис. 12 показана блок-схема скрипта для параллельной сортировки геометрии для определения ветровых нагрузок.

Исходя из координаты Y , аэродинамический коэффициент c_e меняет свое значение и знак в точках стабилизирующей ванты. Чтобы разделить точки на две группы с отрицательными и положительными координатами используется скрипт, показанный в работе [25]. На рис. 13 приведена блок-схема этого скрипта.

Для определения величины нормативной средней составляющей ветровой нагрузки, действующей по нормали к площадке на поверхности покрытия, строились поверхности, образованные грузовой площадью точки пересечения, стабилизирующих и несущих вант. Значения нагрузки выгружаются в формат .txt или .csv.

Визуализация идеи написанного скрипта представлена на рис. 14, результатом его работы является построение вектора направления действия нагрузки от ветра.

Для определения пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_p на здание велодрома было использовано допущение, что здание можно считать одноэтажным и однопролетным, у которого отношение высоты к пролету не превышает 1,5. Это

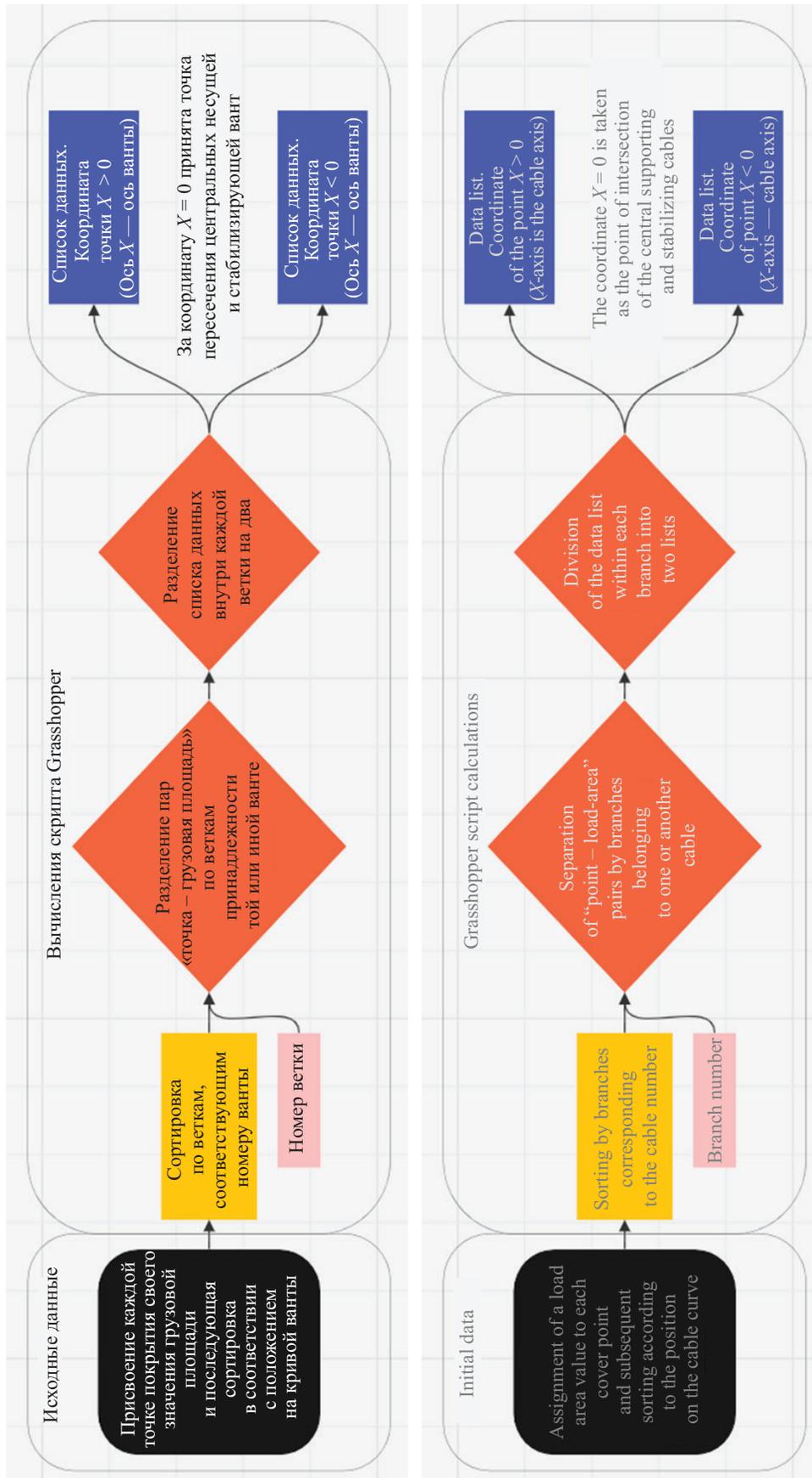


Рис. 12. Блок-схема скрипта Grasshopper для параллельной сортировки геометрии для определения ветровых нагрузок
 Fig. 12. Block diagram of the Grasshopper script for parallel sorting of geometry to determine wind loads



Рис. 13. Блок-схема скрипта для определения величины средней составляющей ветровой нагрузки

Fig. 13. Block diagram of the script for determining the value of the average wind load component

допущение позволило определить коэффициент v для расчетной поверхности, расположенной в плоскости XU и близкой по форме к прямоугольнику по рис. 9, что далее применялось для расчета пульсационной составляющей ветровой нагрузки [25].

Первая собственная и предельные частоты для данного случая определены в работе [25]. Первая собственная частота здания велодрома больше предельной: $f_1 = 2,0034$ Гц $> f_{lim} = 1,94$ Гц, получаем, что:

1. В точке A : $c_e = 0,18$,
 $W^A = W_m^A + W_p = 0,009 + 0,019 = 0,028$ т/м².
2. В сечении B : $c_e = -0,3$,
 $W^B = -(|W_m^B| + |W_p|) = -(0,014 + 0,019) = -0,033$ т/м².
3. В точке C : $c_e = 0$, $W_m^C = 0$.

Фрагмент кода, представленный в исследовании [25], определяет вектор, который перпендикулярен поверхности грузовой площади точки. Для задания ветровой нагрузки на расчетную схему этот вектор должен быть разложен на компоненты, действующие в направлении X и Z . В Grasshopper это

реализовано через определение синусов и косинусов между глобальными координатными осями X и Z и локальными осями грузовых площадей точек. На рис. 15 показана блок-схема этого кода.

Исследования аэродинамического коэффициента, проведенные К.А. Бабаевой [27], показали, что его зависимость от многих параметров здания, учитывающая изменение скоростного напора по высоте и направлению, затрудняет обобщенную рекомендацию. Данные на рис. 16 демонстрируют, что ветер на подавляющей части поверхности большинства покрытий оказывает отрицательное давление (отсос), которое достигает значения в диапазоне от 0,020–0,031 т/м², а иногда и до 0,061 т/м².

Данные об амплитуде изменения нагрузки на каждой ванте были экспортированы из Grasshopper в формат .xlsx и затем импортированы в ПК Лира Софт для расчета вантовой сети с учетом разложения вектора нагрузки на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 17).

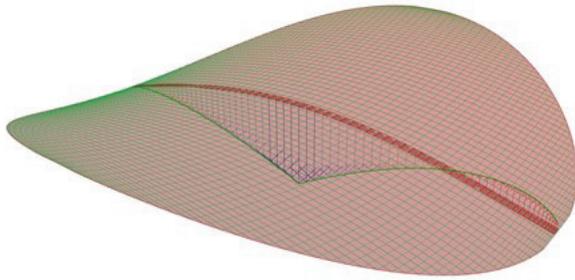


Рис. 14. Визуализация фрагмента кода для определения величины нормативной средней составляющей ветровой нагрузки для центральной стабилизирующей ванты

Fig. 14. Visualization of a code fragment for determining the value of the normative average wind load component for the central stabilizing cable

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате написанного скрипта были построены эпюры распределения снеговой нагрузки в ПК Лира Софт. На рис. 18–21 представлены 4 схемы распределения снеговой нагрузки, собранной на рассматриваемое покрытие двойкой кривизны. Схема 1 и 2 соответствует вариантам 1 и 3 в нормативной документации¹, схемы 3 и 4 соответствуют вариантам 2 и 3, указанным на рис. 6, полученным в нормативном документе².

1. Вариант 1¹. Нормативное значение снеговой нагрузки (рис. 18):

$$S_0 = 0,153 \cdot \mu = 0,153 \cdot 1 = 0,153 \text{ т/м}^2.$$

2. Вариант 3¹. Нормативное значение снеговой нагрузки (рис. 19):

$$S_0^1 = 0,153 \cdot \mu_1 = 0,153 \cdot 1,25 = 0,191 \text{ т/м}^2;$$

$$S_0^2 = 0,153 \cdot \mu_1 = 0,153 \cdot 0,75 = 0,115 \text{ т/м}^2.$$

3. Вариант (рис. 6, 2). Нормативное значение снеговой нагрузки слева от оси симметрии покрытия (рис. 20):

$$S_0 = 0,153 \cdot \mu = 0,153 \cdot 1 = 0,153 \text{ т/м}^2.$$

4. Вариант (рис. 6, 3). Нормативное значение снеговой нагрузки ниже оси симметрии покрытия (рис. 21):

$$S_0 = 0,153 \cdot \mu = 0,153 \cdot 1 = 0,153 \text{ т/м}^2.$$

Результаты определенных значений ветровой нагрузки в точках А, С и сечении В–В при ситуации, когда ветер вдоль стабилизирующих вант, приведены в табл. 1.

Схема приложения вертикальной составляющей ветровой нагрузки представлена на рис. 22, горизонтальной составляющей — на рис. 23.

С учетом рис. 16 было выполнено формирование загрузки (см. табл. 2) при воздействии ветра вдоль направления несущих вант с использованием экспериментального распределения аэродинамического коэффициента, так как в нормативной документации [27] не было найдено схемы, которая бы описывала близкое распределение аэродинамического коэффициента.

Значения давления ветра, указанные в табл. 1 и 2, показывают, что основное нормативное значение давления ветра превышает нормативное пиковое значение. Это связано с тем, что при увеличении площади конструкции вероятность достижения пикового ($v_{\mp} = 1$) уровня корреляции ветрового потока уменьшается.

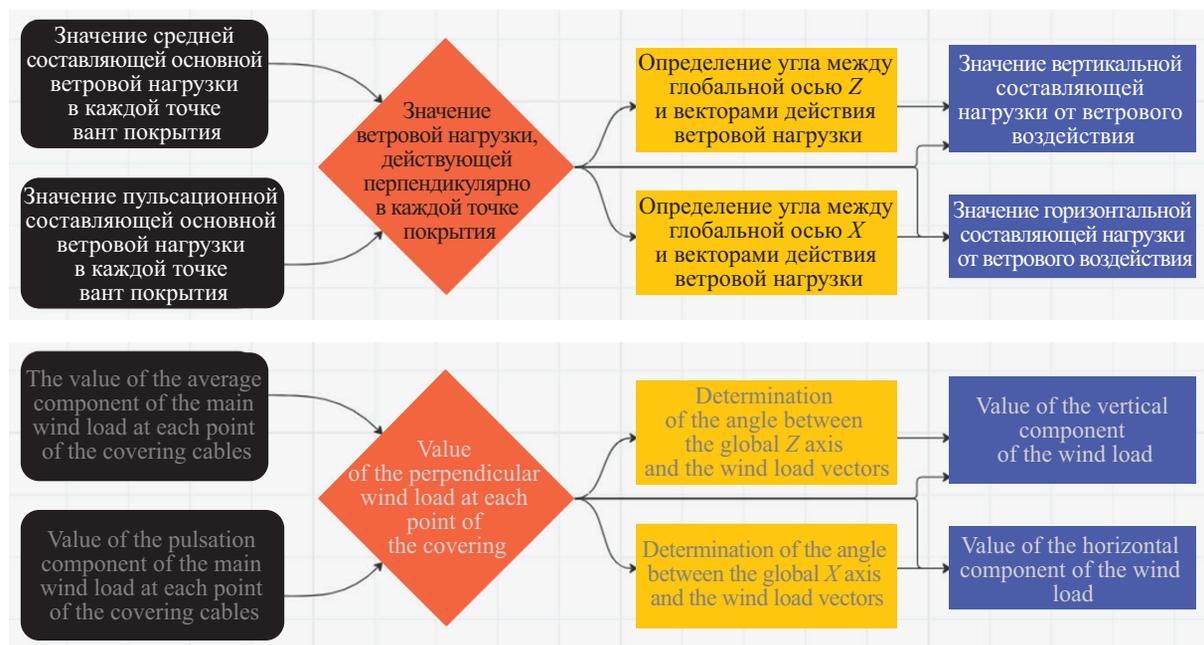


Рис. 15. Блок-схема скрипта Grasshopper, раскладывающего нормальный к грузовым площадкам вектор ветровой нагрузки на X и Z составляющие

Fig. 15. Block diagram of the Grasshopper script that decomposes the wind load vector normal to the loading area into X and Z components

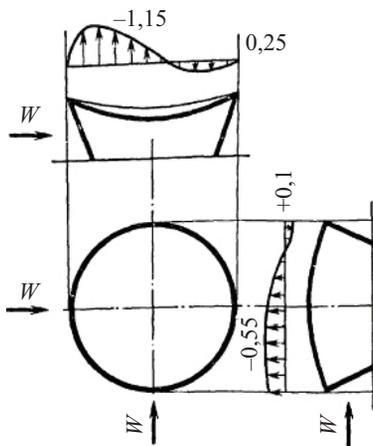


Рис. 16. Аэродинамический коэффициент c при покрытии
 Fig. 16. Aerodynamic coefficient c at covering

Данные значения нагрузок были экспортированы в формате .xlsx, включая информацию об амплитуде изменения нагрузки на каждой ванте. Эти данные затем импортированы в ПК Лира Софт, где выполнено разложение вектора действия ветровой нагрузки на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 24, 25).

В ходе сбора постоянных и длительных нагрузок не учитывались архитектурные решения, такие как расположение плит перекрытия, колонн, лестниц, стен и перегородок, расположение которых было условным. Кроме того, нагрузка от несущих стен и перегородок не была учтена. Для поддержки вантовой сети покрытия использовано опорное кольцо из металлического профиля, которое передавало нагрузку на фундамент через распорные колонны. В работе выделены несущие конструкции, относящиеся к области исследования (рис. 1), а так-

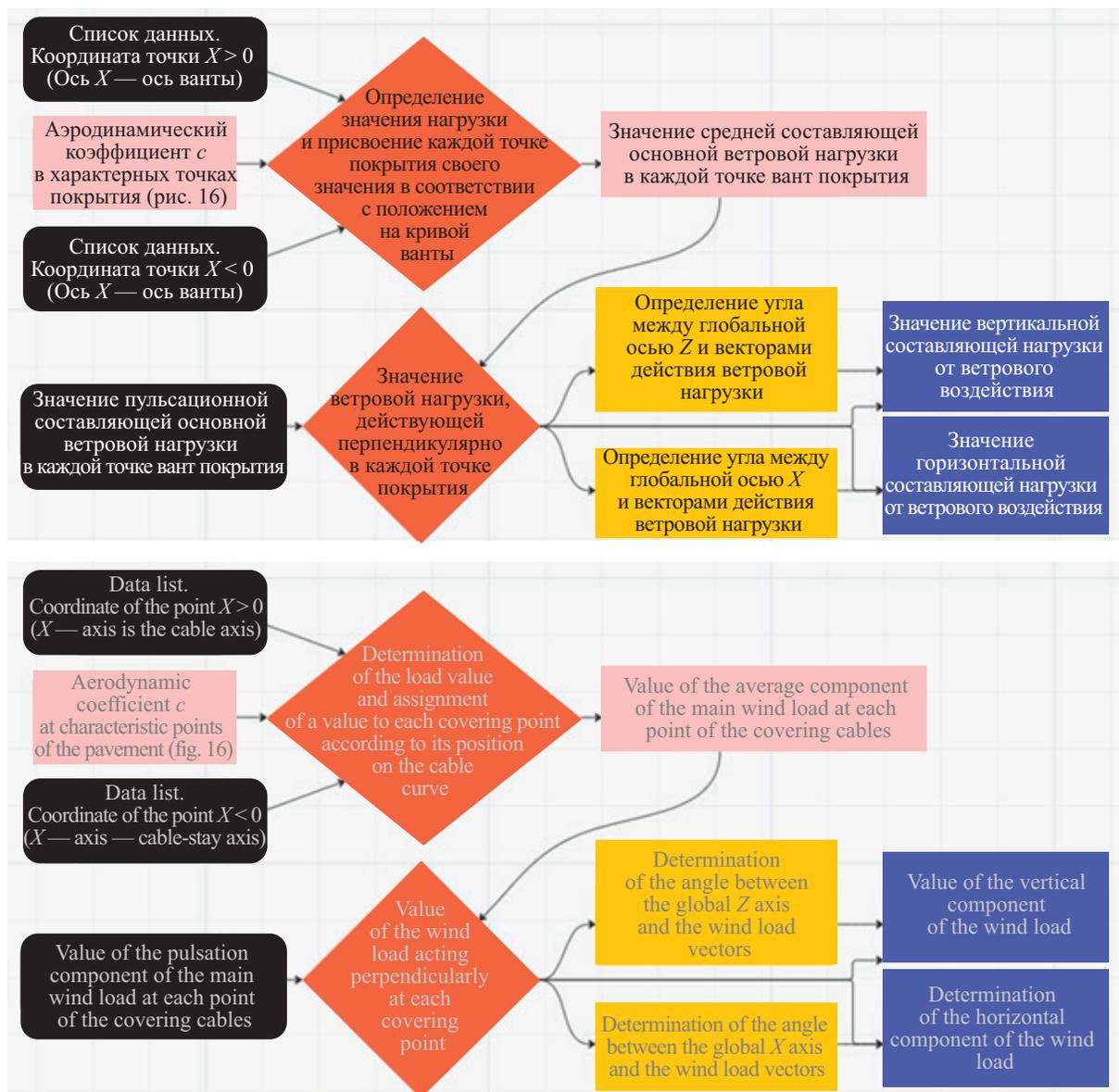


Рис. 17. Блок-схема скрипта Grasshopper для определения давления ветра, действующего параллельно несущим вантам
 Fig. 17. Block diagram of the Grasshopper script for determining the wind pressure acting parallel to the load-bearing cables

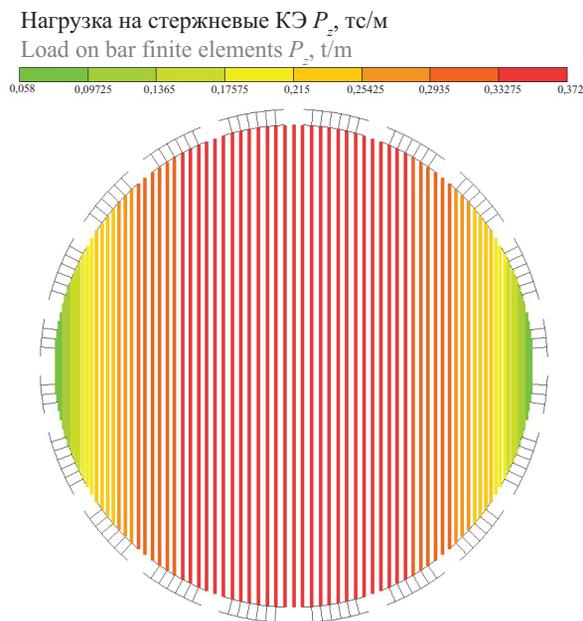


Рис. 18. 1-й вариант. Нормативная снеговая нагрузка на покрытие

Fig. 18. Option 1. Normative snow load on the covering

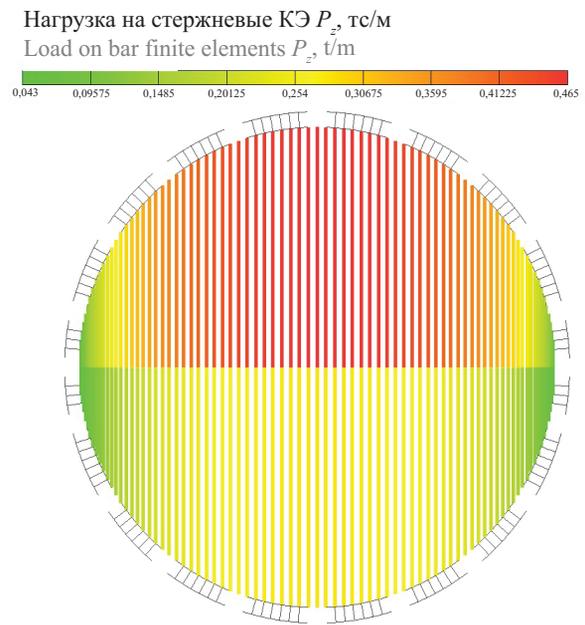


Рис. 19. 2-й вариант. Нормативная снеговая нагрузка на покрытие

Fig. 19. Option 2. Normative snow load on the covering

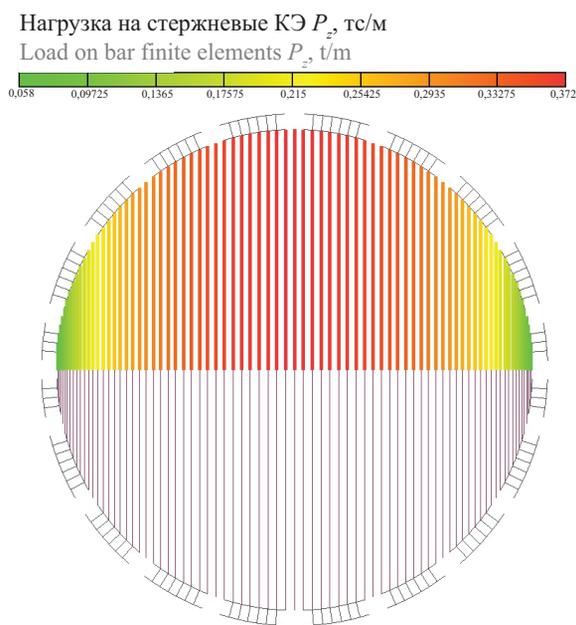


Рис. 20. 3-й вариант. Нормативная снеговая нагрузка на покрытие

Fig. 20. Option 3. Normative snow load on the covering

же не относящиеся к ней конструкции, выделенные серым цветом, которые были частично учтены при построении расчетной схемы для учета пространственной работы каркаса. Подробное описание сбора нагрузок представлено в главе 4 [25]. Так как задача расчета вант является геометрически нелинейной, таблицы РСН и РСУ использовать невозможно, поэтому была создана история загрузжений (рис. 26).

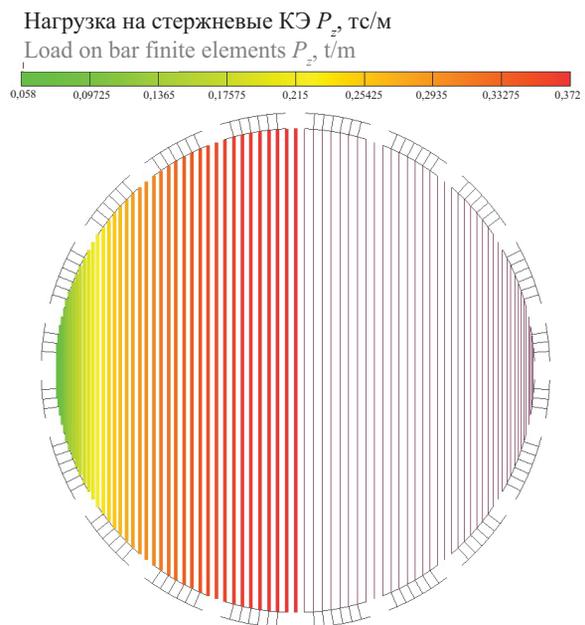


Рис. 21. 4-й вариант. Нормативная снеговая нагрузка на покрытие

Fig. 21. Option 4. Normative snow load on the covering

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам исследования способов применения параметрического программирования выполнен сбор нагрузок на расчетную конечно-элементную схему здания велодрома с покрытием двойкой кривизны по ортогональной вантовой сети.

Определены 4 типа снеговой нагрузки и 2 типа ветровой нагрузки. Использование Grasshopper позволило уйти от упрощения и интерполяции как ве-

Табл. 1. Значение ветровых нагрузок на покрытие, ветер по X

Table 1. Value of wind loads on the covering, wind along X

Точки и сечение Points and cross-sections	Средняя составляющая W_m , т/м ² Average component W_m , t/m ²	Пульсационная составляющая W_p , т/м ² Ripple component W_p , t/m ²	Основное значение W , т/м ² Basic meaning W , t/m ²	Пиковое значение W_z , т/м ² Peak value W_z , t/m ²
Точка A Point A	0,009	0,019	0,028	0,012
Сечение B–B Section B–B	–0,014	–0,019	–0,033	–0,018
Точка C Point C	0	0	0	0

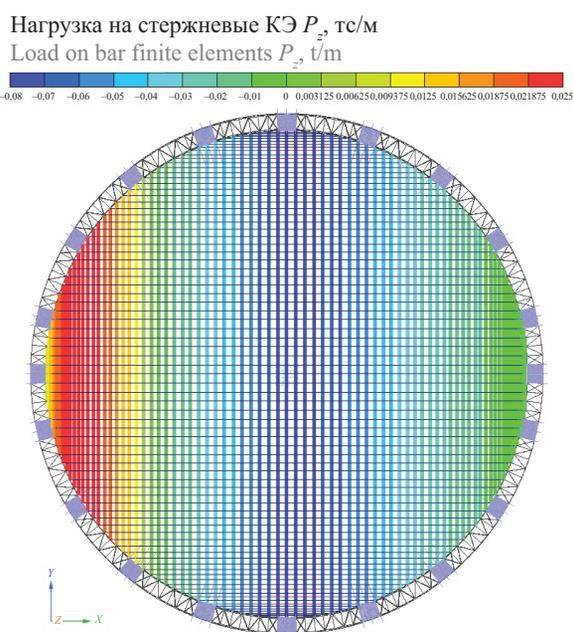


Рис. 22. Вертикальная составляющая основной ветровой нагрузки (ветер по направлению X)

Fig. 22. Vertical component of the main wind load (wind in X direction)

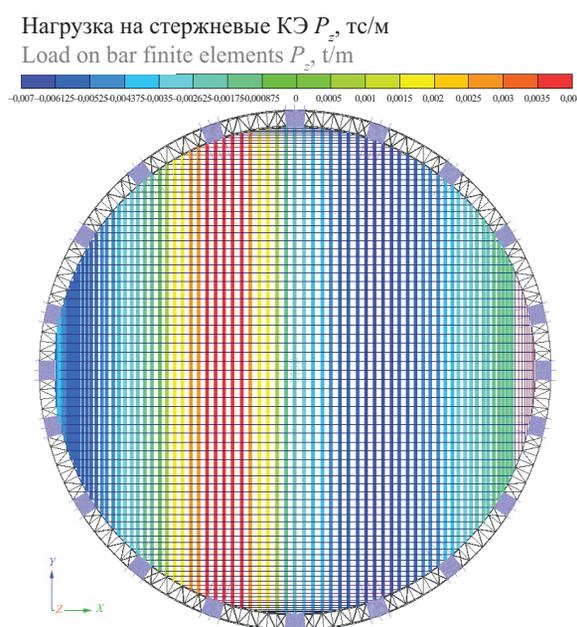


Рис. 23. Горизонтальная составляющая основной ветровой нагрузки (ветер по направлению X)

Fig. 23. Horizontal component of the main wind load (wind in X direction)

Табл. 2. Значение ветровых нагрузок на покрытие, ветер по Y

Table 2. The value of wind loads on the covering, wind along Y

Точки и сечение Points and cross-sections	Средняя составляющая W_m , т/м ² Average component W_m , t/m ²	Пульсационная составляющая W_p , т/м ² Ripple component W_p , t/m ²	Основное значение W , т/м ² Basic meaning W , t/m ²	Пиковое значение W_z , т/м ² Peak value W_z , t/m ²
Точка A Point A	0,013	0,019	0,032	0,017
Сечение B–B Section B–B	–0,023	–0,019	–0,042	–0,026
Точка C Point C	–0,058	–0,019	–0,077	–0,069

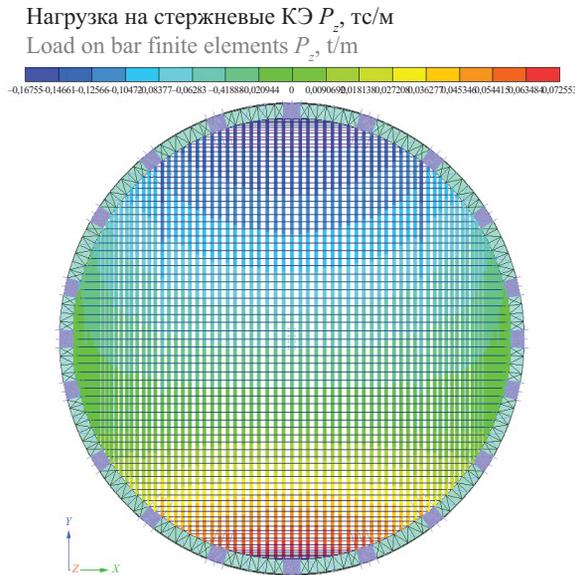


Рис. 24. Вертикальная составляющая основной ветровой нагрузки (ветер против направления по Y)

Fig. 24. Vertical component of the main wind load (wind against the Y direction)

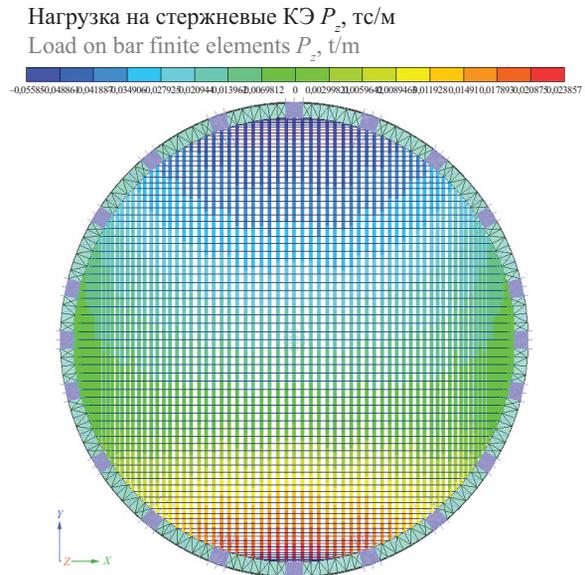


Рис. 25. Горизонтальная составляющая основной ветровой нагрузки (ветер против направления по Y)

Fig. 25. Horizontal component of the main wind load (wind against the Y direction)

1. Собственный вес
2. Давление грунта (нормативная)
3. Нагрузка от веса кровли по вантам (нормативная)
4. Нагрузка от веса кровли опорного кольца (нормативная)
5. Нагрузка от веса конструкции пола опорного кольца (нормативная)
6. Нагрузка от веса витражной системы (нормативная)
7. Нагрузка от веса пола по ЖБ перекрытию (нормативная)
8. Полезная нагрузка - пост. (нормативная)
9. Полезная нагрузка кратковрем. (нормативная)
10. Снеговая нагрузка по СП - Вариант 1 (нормативная)
11. Снеговая нагрузка по СП - Вариант 2 (нормативная)
12. Снеговая нагрузка - Вариант 3 (нормативная)
13. Снеговая нагрузка - Вариант 4 (нормативная)
14. Основная ветровая нагрузка, ветер X (нормативная)
15. Основная ветровая нагрузка, ветер Y (нормативная)

Рис. 26. Список нагрузок

Fig. 26. Load list

1. Self weight
2. Earth pressure (normative)
3. Load from the weight of the roof by strouds (normative)
4. Load from the weight of the roof support ring (normative)
5. Load from the weight of the support ring floor structure (normative)
6. Load from the weight of the stained glass system (normative)
7. Load from the weight of the floor on the concrete floor (normative)
8. Payload - constant (normative)
9. Payload short-term (normative)
10. Snow load according to the Code of Rules - Option 1 (normative)
11. Snow load according to SP - Option 2 (normative)
12. Snow load Option 3 (normative)
13. Snow load Option 4 (normative)
14. Main wind load, wind X (normative)
15. Main wind load, wind U (normative)

личины давления на 1 м^2 , так и значений грузовых площадей в каждой точке вантовой сети от действия снега и ветра в нескольких вариантах воздействия. Такой подход в совокупности с результатами аэродинамических испытаний и автоматизированной передачей данных в расчетные комплексы позволит более точно определять НДС сложных покрытий, а также уйти от перерасчета и переназначения сложных неравномерно распределенных линейных

и нелинейных нагрузок в расчетных схемах при изменении исходных данных с экономией трудовых и временных затрат на контроль этих процессов.

В качестве примера оптимизации временных затрат можно привести пример применения одного и того же фрагмента кода в качестве исходных данных для определения значений трех видов загружений в 3800 точках покрытия с учетом нелинейных зон распределения коэффициентов этих нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stavric M., Marina O.* Parametric modeling for advanced architecture // International Journal of Applied Mathematics and Informatics. 2011. Vol. 5. Issue 1. Pp. 9–16.
2. *Danhaive R., Mueller T.* Combining parametric modeling and interactive optimization for high-performance and creative structural design // International As-

sociation for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium. 2015.

3. *Kyratzi S., Azariadis P.* Integrated design intent of 3D parametric models // Computer-Aided Design. 2022. Vol. 146. P. 103198. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103198

4. Салех М. Особенности разработки уникальных архитектурных решений с использованием цифровых методов на основе визуального программирования // Строительные материалы и изделия. 2022. Т. 5. № 1. С. 54–59. DOI: 10.34031/2618-7183-2022-5-1-54-59. EDN NOYMKD.

5. Jovanovic D., Radovic L. Parametric modelling in architecture // The 5th international conference mechanical engineering in XXI century. 2020. Pp. 347–352.

6. Kalkan E., Okur F., Altunışık A. Applications and usability of parametric modeling // Journal of Construction Engineering, Management & Innovation. 2018. Vol. 1. Issue 3. DOI: 10.31462/jcemi.2018.03139146

7. Sacks R., Barak R. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice // Automation in Construction. 2008. Vol. 17. Issue 4. Pp. 439–449. DOI: 10.1016/j.autcon.2007.08.003

8. Schling E., Barthel R. Šuchov's bent networks: The impact of network curvature on Šuchov's gridshell designs // Structures. 2021. Vol. 29. Pp. 14961506. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.021

9. Gusevs J., Serdjuks D., Artebjakina G.I., Afanasjeva E.A., Goremikins V. Behaviour of load-carrying members of velodromes' long-span steel roof // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 65. Issue 05. Pp. 3–16. DOI: 10.5862/MCE.65.1

10. Abramczyk J., Chrzanowska K. Complex building forms roofed with transformed shell units and defined by saddle surfaces // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 24. Pp. 8942. DOI: 10.3390/ma15248942

11. Lai M., Eugster S.R., Reccia E., Spagnuolo M., Cazzani A. Corrugated shells: An algorithm for generating double-curvature geometric surfaces for structural analysis // Thin-Walled Structures. 2022. Vol. 173. P. 109019. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109019

12. Bleicher A., Behnke R., Schlaich M. Double Curvature for Volkswagen // IASS Symposium 2017 — Interfaces: architecture.engineering.science. 2017.

13. Аверин А. Расчетные модели гибких нитей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 9 (741). С. 5–19. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19. EDN YFKYTO.

14. Timchenko R., Popov S., Krishko D., Rajeshwar G., Aniskin A. Cable-stayed coverings for large-span public buildings // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 280. P. 07008. DOI: 10.1051/e3s-conf/202128007008

15. Нугуманова А.Д., Кашеварова Г.Г. Расчет вантовых конструкций на примере оттяжек мачты // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2015. № 3. С. 103–110. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.3.07. EDN UNJOKX.

16. Коваленко Н.И., Разин С.Н. Математическое моделирование взаимодействия гибкой нити, моделирующей зажатую пряжу, с цилиндрической

поверхностью при наличии внешней распределенной нагрузки // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2015. № 6 (360). С. 205–209. EDN VHKSXP.

17. Кужахметова Э.Р. Напряженно-деформированное состояние цилиндрично-плитно-вантового покрытия здания (сооружения) с различными формами наружного опорного контура // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 95–110. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110. EDN RUOFTA.

18. Кужахметова Э. Расчет вант с учетом геометрической и физической нелинейности // Известия КГТУ. 2019. № 55. С. 252–266. EDN BBJSFC.

19. Kim N.-I., Thai S., Lee J. Nonlinear elastoplastic analysis of slack and taut cable structures // Engineering with Computers. 2016. Vol. 32. Issue 4. Pp. 615–627. DOI: 10.1007/s00366-016-0440-7

20. Chen Y., Meng F., Gong X. Parametric modeling and comparative finite element analysis of spiral triangular strand and simple straight strand // Advances in Engineering Software. 2015. Vol. 90. Pp. 63–75. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.06.011

21. El-Dardiry E., Hamdy G., Fayed N., Konswaah M.R. Optimum design of wide span cable-stayed roof structures // International Journal of Scientific and Engineering Research. 2018. Vol. 9. Issue 5.

22. Peng Y., Zhao W., Zhou J. Reliability analysis of a large curved-roof structure considering wind and snow coupled effects // Disaster Prevention and Resilience. 2022. Vol. 1. Issue 4. P. 8. DOI: 10.20517/dpr.2022.02

23. Попов Н., Лебедева Д., Богачев Д., Березин М.М. Воздействие ветровых и снеговых нагрузок на большепролетные покрытия // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 71–76. EDN XISJCT.

24. Сафуллин И.И. Исследование ветровых воздействий на ЖК «Лазурные небеса» // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4 (30) С. 413–417. EDN TSMPMD.

25. Дагаев В. Расчет большепролетного сооружения с вантовым покрытием двоякой кривизны : выпускная квалификационная работа специалиста. СПб., 2022. С. 1–255. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2022/vr/vr22-1775_

26. Дагаев В.А., Школяр Ф.С. Построение конечно-элементной схемы вантового покрытия двоякой кривизны с помощью Grasshopper // Неделя науки ИСИ : сб. мат. Всеросс. конф. 2022. С. 322–325. EDN XKVFKM.

27. Бабаева К. Расчетные нагрузки для основных типов висячих покрытий. Научно-техническая информация Госстроя СССР. 1965. № 10. С. 26.

Поступила в редакцию 11 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 августа 2023 г.

Одобрена для публикации 28 августа 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: **Владислав Алексеевич Дагаев** — инженер, подразделение «Конструкции, проектирование»; **Спектрум-Холдинг**; 199178, г. Санкт-Петербург, 7-я линия Васильевского острова, д. 76, лит. А; РИНЦ ID: 951859; dagaev@spgr.ru;

Георгий Максимович Пурвин — инженер, подразделение «Конструкции, проектирование»; **Спектрум-Холдинг**; 199178, г. Санкт-Петербург, 7-я линия Васильевского острова, д. 76, лит. А; purvin@spgr.ru;

Филипп Сергеевич Школяр — кандидат технических наук, старший преподаватель; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 69808774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; shkolyar.fs@gmail.com.

Вклад авторов:

Дагаев В.А. — идея, формирование концепции, построение математической модели, анализ результатов.

Пурвин Г.М. — доработка исходного текста статьи, научное редактирование.

Школяр Ф.С. — научное руководство, формирование структуры исследования, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Stavric M., Marina O. Parametric modeling for advanced architecture. *International Journal of Applied Mathematics and Informatics*. 2011; 5(1):9-16.
2. Danhaive R., Mueller T. Combining parametric modeling and interactive optimization for high-performance and creative structural design. *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. 2015.
3. Kyratzi S., Azariadis P. Integrated design intent of 3D parametric models. *Computer-Aided Design*. 2022; 146:103198. DOI: 10.1016/j.cad.2022.103198
4. Saleh M.S. Features of developing unique architectural solutions using digital methods based on visual programming. *Construction Materials and Products*. 2022; 5(1):54-59. DOI: 10.34031/2618-7183-2022-5-1-54-59. EDN NOYMKD. (rus.).
5. Jovanovic D., Radovic L. Parametric modeling in architecture. *The 5th international conference mechanical engineering in XXI century*. 2020; 347-352.
6. Kalkan E., Okur F., Altunışık A. Applications and usability of parametric modeling. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*. 2018; 1(3). DOI: 10.31462/jcemi.2018.03139146
7. Sacks R., Barak R. Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice. *Automation in Construction*. 2008; 17(4):439-449. DOI: 10.1016/j.autcon.2007.08.003
8. Schling E., Barthel R. Šuchov's bent networks: The impact of network curvature on Šuchov's grid-shell designs. *Structures*. 2021; 29:1496-1506. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.12.021
9. Gusevs J., Serdjuks D., Artebjakina G.I., Afa-našjeva E.A., Goremikins V. Behaviour of load-carrying members of velodromes' long-span steel roof. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 65(05):3-16. DOI: 10.5862/MCE.65.1
10. Abramczyk J., Chrzanowska K. Complex building forms roofed with transformed shell units and defined by saddle surfaces. *Materials*. 2022; 15(24):8942. DOI: 10.3390/ma15248942
11. Lai M., Eugter S.R., Reccia E., Spagnuolo M., Cazzani A. Corrugated shells: An algorithm for generating double-curvature geometric surfaces for structural analysis. *Thin-Walled Structures*. 2022; 173:109019. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109019
12. Bleicher A., Behnke R., Schlaich M. Double curvature for Volkswagen. *IASS Symposium 2017 — Interfaces: architecture.engineering.science*. 2017.
13. Averin A.N. Calculation models of flexible threads. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2020; 9(741):5-19. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-5-19. EDN YFKYTO. (rus.).
14. Timchenko R., Popov S., Krishko D., Rajeshwar G., Aniskin A. Cable-stayed coverings for large-span public buildings. *E3S Web of Conferences*. 2021; 280:07008. DOI: 10.1051/e3sconf/202128007008
15. Nugumanova A.D., Kashevarova G.G. Computation of cable-stayed constructions on the example of anchor stays. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2015; 3:103-110. DOI: 10.15593/2224-9826/2015.3.07. EDN UNJOKX. (rus.).
16. Kovalenko N.I., Razin S.N. Computer simulation of a flexible string, modeling sandwiched strand, with the cylindrical surface when an external load distribution. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*. 2015; 6(360):205-209. EDN VHSKSP. (rus.).

17. Kuzhakhmetova E.R. Stress-strain state cylinder-plate-cable-stayed roof buildings (structures) with various forms of external support contour. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020; 16(2):95-110. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-2-95-110. EDN RUOFTA. (rus.).
18. Kuzhakhmetova, E. Calculation of cables taking into account geometric and physical nonlinearity. *KSTU News*. 2019; 55:252-266. EDN BBJSCF. (rus.).
19. Kim N.-I., Thai S., Lee J. Nonlinear elastoplastic analysis of slack and taut cable structures. *Engineering with Computers*. 2016; 32(4):615-627. DOI: 10.1007/s00366-016-0440-7
20. Chen Y., Meng F., Gong X. Parametric modeling and comparative finite element analysis of spiral triangular strand and simple straight strand. *Advances in Engineering Software*. 2015; 90:63-75. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.06.011
21. El-Dardiry E., Hamdy G., Fayed N., Konswoah M.R. Optimum design of wide span cable-stayed roof structures. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 2018; 9(5).
22. Peng Y., Zhao W., Zhou J. Reliability analysis of a large curved-roof structure considering wind and snow coupled effects. *Disaster Prevention and Resilience*. 2022; 1(4):8. DOI: 10.20517/dpr.2022.02
23. Popov N.A., Lebedeva I.V., Bogachev D.S., Berezin M.M. Impact of wind and snow loads on large-span roofs. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 12:71-76. EDN XISJCT. (rus.).
24. Safullin I.I. Numerical modeling of wind effects on high-rise building “Lazurnie nebesa” (Kazan). *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2014; 4(30):413-417. EDN TSMPPM. (rus.).
25. Dagaev V. *Calculation of a large-span structure with a cable-stayed roof of double curvature*. St. Petersburg, 2022; 1-255. DOI: 10.18720/SPBPU/3/2022/vr/vr22-1775 (rus.).
26. Dagaev V., Shkolyar F. Construction of a finite element scheme for a cable-stayed cover of double curvature using Grasshopper. *Nedelya Nauki ISI : collection of materials of the All-Russian Conference*. 2022; 322-325. EDN XKVFKM. (rus.).
27. Babaeva K. *Design loads for the main types of hanging roofs*. Scientific and technical information of the USSR State Construction Committee. 1965; 10:26. (rus.).

Received June 11, 2023.

Adopted in revised form on August 13, 2023.

Approved for publication on August 28, 2023.

BIONOTES: **Vladislav A. Dagaev** — engineer, “Structures, Design” division; **Spectrum-Holding**; lit. A 76, 7th line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; ID RSCI: 951859; dagaev@spgr.ru;

Georgii M. Purvin — engineer, “Structures, Design” division; **Spectrum-Holding**; lit. A 76, 7th line of Vasilyevsky Island, St. Petersburg, 199178, Russian Federation; purvin@spgr.ru;

Filipp S. Shkolyar — Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Politekhnikeskaya st., St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RSCI: 69808774, ResearcherID: GLR-0652-2022, ORCID: 0000-0003-2872-0723; shkolyar.fs@gmail.com.

Contribution of the authors:

Vladislav A. Dagaev — idea, concept formation, mathematical model construction, analysis of results.

Georgii M. Purvin — finalization of the original text of the article and its scientific editing.

Filipp S. Shkolyar — scientific guidance, the formation of the structure of the study, the final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.