

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 539.3:004

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.482-495

## Расчет предварительно напряженных конструкций на ударную нагрузку

В.В. Лалин<sup>1</sup>, О.Н. Перцева<sup>2</sup>, В.Р. Камалтдинов<sup>3</sup>,  
Г.В. Мартынов<sup>1</sup>, Д.Е. Монастырева<sup>1</sup>, Р.С. Тихонов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ);

г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> ПСС ГРАЙТЕК; г. Санкт-Петербург, Россия;

<sup>3</sup> Институт технологий преднапряжения (ИТП); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Конструкции с предварительным напряжением имеют широкое распространение и развиваются. Зачастую с применением преднапряжения изготавливаются покрытия зданий специального назначения, требующие расчетов на экстремальные воздействия. К таким воздействиям относится удар самолета, представляющий нестационарную нагрузку. Моделирование преднапряженных конструкций и расчет ударных нагрузок затруднительно реализовать в классических расчетных программах. Универсальным инструментом для решения таких задач является ПК SOFiSTiK. Данный программный комплекс помимо гибкого функционала интегрирован в среду информационного моделирования и позволяет взаимодействовать с самыми современными программными решениями.

**Материалы и методы.** Для описания методики выбрали покрытие особого назначения и выполнили расчет на удар самолета Learjet 23. Для моделирования предварительного напряжения использовали интерфейс SOFiPLUS. Вводимые элементы обладают полнотой свойств, отражают геометрию напряженных канатов, параметры сцепления и этапы возведения. Для описания ударного воздействия применили внутренний язык программирования CADINP. Величина воздействия задана в виде дискретной функции с 11 интервалами интегрирования.

**Результаты.** Полученные данные были обработаны, характер изменения деформаций покрытия в первые секунды падения самолета представлен графически. Также выведены изополя внутренних изгибающих моментов покрытия для подбора армирования и эпюра моментов балок от воздействия предварительного напряжения с учетом потерь натяжения.

**Выводы.** НПК SOFiSTiK позволяет решать сложные инженерные задачи с высокой степенью автоматизации. Моделирование преднапряженных конструкций становится нетрудоёмким процессом с гибкими параметрами настройки, исключая вероятность ошибки от ручных расчетов. Благодаря открытому программному коду возможен расчет на нетипичные экстремальные воздействия. Полученные графики и эпюры подтверждают прохождение проверок по предельным состояниям рассматриваемого покрытия, а также могут быть использованы для проектирования и расчета аналогичных конструкций особого назначения.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** моделирование, нестационарная нагрузка, предварительное напряжение, потери напряжения, большепролетное покрытие, экстремальное воздействие, взрыв, удар самолета, информационные технологии, ПК SOFiSTiK

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Лалин В.В., Перцева О.Н., Камалтдинов В.Р., Мартынов Г.В., Монастырева Д.Е., Тихонов Р.С. Расчет предварительно напряженных конструкций на ударную нагрузку // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 4. С. 482-495. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.482-495

## Calculation of prestressed structures for shock loading

Vladimir V. Lalin<sup>1</sup>, Olga N. Pertseva<sup>2</sup>, Vladimir R. Kamaltdinov<sup>3</sup>,  
Gleb V. Martynov<sup>1</sup>, Daria E. Monastireva<sup>1</sup>, Roman S. Tikhonov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> PSS GRAITEC; St. Petersburg, Russian Federation;

<sup>3</sup> Institute of technology of prestressing; Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** With the use of prestressing, coatings are made for special-purpose buildings, requiring calculations for extreme impacts. Such impacts include an airplane strike. Modeling of prestressed structures and calculation of shock loads

is difficult to implement in classical calculation programs. A universal tool for solving such problems is the PC SOFiSTIK. This software complex allows you to interact with the most modern software solutions.

**Materials and methods.** For the description of the method, special-purpose coating was selected and the strike calculation of the Learjet 23 aircraft was performed. For modeling prestressing, the SOFIPLUS interface is used. To describe the impact, the internal programming language CADINP is used.

**Results.** The nature of the change in the coating deformations in the first seconds of the aircraft crash is presented graphically. Also, iso-ares of internal bending moments of the coating were derived for the selection of reinforcement and the diagram of the moments of the beams from the action of prestressing, taking into account tension losses.

**Conclusions.** SOFiSTIK PC allows you to solve complex engineering problems with a high degree of automation. Thanks to the open source code, it becomes possible to calculate atypical extreme effects. The obtained graphs and diagrams confirm the passage of checks on the limiting states of the coating, and can also be used to design and calculate similar special-purpose structures.

**KEYWORDS:** modeling, unsteady loading, prestressing, stress loss, extreme impact, explosion, aircraft impact, information technology, SOFiSTIK PC

**FOR CITATION:** Lalin V.V., Pertseva O.N., Kamaltdinov V.R., Martynov G.V., Monastyreva D.E., Tikhonov R.S. Calculation of prestressed structures for shock loading. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(4):482-495. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.4.482-495 (rus.).

## ВВЕДЕНИЕ

Моделирование предварительно напряженных конструкций является одной из наиболее актуальных проблем для расчета зданий и сооружений. Данные конструкции отличаются натяжением арматуры в сжатой зоне бетона для улучшения трещиностойкости и сокращения деформаций.

Важный аспект расчета конструкций с предварительно напряженной арматурой — расчет потерь напряжения. Потери, возникающие от ползучести и усадки бетона, могут оказать значительное влияние на величину обжатия и, следовательно, жесткость конструкции в целом [1]. Проводились экспериментальные исследования по вычислению потерь, которые показали занижение значений, вычисляемых аналитически [2].

Существуют различные способы создания преднапряжения — с натяжением на упоры и на бетон, с трением в каналах и без него [3]. Технологии натяжения арматуры постоянно развиваются, что сопровождается многочисленными экспериментальными исследованиями [4]. Так, работа Н.Д. Рябенко посвящена анализу передачи усилий обжатия бетону и изучению свойств сцепления арматуры [5]. Созданная им установка позволила определить изменение деформаций арматуры в зависимости от длины заделки.

В условиях увеличивающихся объемов возведения сооружений с предварительным напряжением важно иметь и соответствующие средства проектирования. Классические для расчета зданий и сооружений программные комплексы — SCAD и Lira [6]. Согласно принятым методам расчета моделирование предварительно напряженных кон-

струкций сопровождается большим количеством ручных расчетов. Влияние от преднапряжения прикладывается к элементам обычными продольными и распределенными нагрузками. Методика расчета этих эквивалентных нагрузок представлена в работе Д.В. Портаева [7].

Учитывая вышеизложенное, можно отметить, что для моделирования и расчета предварительно напряженных конструкций необходимо применение новых актуальных методов.

Проектирование зданий и сооружений помимо расчета на обычные постоянные, длительные и кратковременные нагрузки зачастую требует учета особых воздействий. В зависимости от назначения здания и возможных последствий частичного или полного его разрушения определяют уровень ответственности здания. Объекты повышенной ответственности, оказывающие значительное влияние на экологические, социальные и экономические аспекты, предполагают защиту от экстремальных воздействий с достаточно низкой вероятностью возникновения.

Экстремальные нагрузки могут быть разделены по природе возникновения на техногенные и естественные. Последние связаны с многообразным влиянием окружающей среды, зависят от региона строительства и его сейсмической активности, экстремальных температур, пожарной опасности прилегающих зеленых территорий, особенностей ближайших акваторий, климатических и ураганных явлений.

Техногенные экстремальные нагрузки подразделяют на внутренние и внешние. Первые возникают соответственно внутри предприятий при неправильной эксплуатации, разрушении оборудования

и возникновении аварийных ситуаций. Внешние техногенные факторы — воздействия, возникающие в результате действия человека, такие как распространение опасных выбросов, взрывы и падения летательных аппаратов. Падение самолета представляет собой ударную нагрузку и оказывает на конструкцию наиболее значительное влияние, вызывая большие усилия и деформации [8–9].

Большое число работ посвящено расчету сооружений на динамические воздействия [10] и, в частности, на сейсмические. Описаны и обсуждены расчеты согласно современным нормативным документам [11]. Проведены аналитические расчеты в расчетном комплексе Lira [12, 13]. Однако расчет нестационарных воздействий, случайно изменяющихся во времени, не заложен в классические расчетные комплексы [14]. К такому типу нагрузок относится и ударная нагрузка от падения самолета. Описать ее можно только путем задания дискретной функции с вводом значений нагрузки для каждого интервала времени [15]. Проводились исследования и предложены аналитические методы расчета задач с нелинейной нагрузкой, установлены зависимости точности расчетов от интервалов интегрирования [16]. Способы моделирования таких воздействий в расчетных комплексах представлены не были. При выборе подходящего инструмента важно учесть интеграцию в нормативные базы, доступность потенциальным пользователям, а также совместимость с технологиями информационного моделирования (BIM).

С самого начала проектирования существовала проблема большого количества ошибок и неточностей в рабочих чертежах строительных проектов. Весомая причина таких недочетов — человеческий фактор. Сложность координации работы команды над практически независимыми разделами и невнимательность проектировщиков ведут к дорогостоящим нестыковкам и коллизиям в проектах. Возможностью решения такой проблемы начали заниматься еще в 1970-х годах в Америке. Ученый Чарльз Истман предложил внедрение способа описания проекта в виде информационного хранилища данных, относящихся к проектированию, так называемую систему описания строительства BDS (Building Description System). Такая система положила начало стремительно развивающемуся на сегодняшний день информационному моделированию BIM [17].

Дальнейшее развитие информационного внедрения получило отклик на государственном уровне [18], а именно произошло образование Совета по строительной информации FIC (Facility Information Council), который с 2008 г. преобразовался в Национальный комитет Соединенных Штатов Америки по BIM стандартизации NBIMS-US PC (National BIM Standard-United States Project Committee).

В Российской Федерации заявления о BIM на уровне Правительства сделаны в 2017 г. Были введены первые своды правил по информационному моделированию, и ожидается появление национальных стандартов для каждого этапа жизненного цикла (ЖЦ) проекта. В 2018 г. Президент РФ В. Путин дал поручение Правительству создать условия для перехода всей строительной отрасли на цифровые технологии. В течение пяти лет ожидается рост доли объектов с применением BIM до 80 % от общего объема строительства, а для государственных структур использование информационных моделей станет обязательным [19, 20].

Идея такой BIM-стандартизации заключается в том, чтобы получить полное отображение всех характеристик проекта в информационном виде с возможностью их отслеживания в любой момент времени.

На всех фазах строительства — большое количество участников и у каждого из них свои интересы. Проявляются такие тенденции, как технологическое усложнение объектов, увеличение количества систем для реализации в рамках объекта и сокращение сроков строительства. Все это приводит к росту параллельных процессов, повышению стоимости ошибки и усложнению управления такими проектами. Возникает понимание, что традиционный подход последовательной реализации уже не срабатывает, и проектами необходимо управлять иначе [21]. Вместе с развитием IT возникла идея создания единого информационного пространства, объединяющего участников строительного процесса, которые смогут закладывать свои интересы и требования в проект. В рамках проекта будет формироваться информационная модель объекта, представляющая управляемую среду, к которой привязаны все необходимые данные. Для реализации BIM в полной мере должно быть две составляющие — софт и методология, задающая правила для взаимодействия участников. Идея заключается в том, что все участники объединены в рамках одной информационной модели, и эта модель меняется по мере реализации ЖЦ [22]. Это позволяет на ранней стадии оценить экономическую привлекательность объекта, стандартизировать процесс проектирования и сформировать библиотеки элементов для создания объемной модели. Инженерно-технические работники в свою очередь могут использовать эту модель для подсчета объемов работ при возведении объекта и эксплуатации.

С самого начала BIM-моделирование стремилось упростить весь процесс проектирования, сделать проект более полным, охватывая все его разделы и области. Сегодня уже существуют понятия 3D, 4D и 5D моделирования. Они отличаются полнотой охватываемой информации о проекте. Так,

первое представляет собой модель с геометрическими характеристиками, соответствующими проекту. Второе отличается от первого тем, что помимо трех взаимно перпендикулярных направлений плоскостей добавлена еще функция времени, которая привязывается к срокам строительства и позволяет увидеть весь ЖЦ проекта с детализацией требуемых этапов. Последнее, самое передовое моделирование учитывает организацию строительного процесса, к модели подключается смета и календарный план. Современное BIM-моделирование продолжает совершенствоваться, добавив к проекту расчеты инсоляции, анимации, текстуры и характеристики материалов, а также подбор строительных машин.

Упомянутым критериям выбора расчетного комплекса в полной мере соответствует ПК SOFiStiK. Его отличает двусторонняя связь с BIM-средой, широкая нормативная база и гибкий функционал. Последнее достигается благодаря открытому языку программирования CADiNP. Используя текстовый ввод, можно решать практически любые пользовательские задачи, не ограничиваясь графическим интерфейсом.

Подытоживая вышесказанное, тема расчета конструкций на нестационарные нагрузки достаточно освещена, однако остается открытым вопрос автоматизации расчета на ударную нагрузку. Подходящим инструментом для решения задач может выступать программный комплекс ПК SOFiStiK.

Таким образом, целью данной работы является разработка методики расчета предварительно напряженных конструкций на ударную нагрузку в ПК SOFiStiK.

Из поставленной цели вытекают задачи:

1. Описание методики моделирования предварительно напряженных конструкций в ПК SOFiStiK.
2. Описание методики задания динамической ударной нагрузки в ПК SOFiStiK.
3. Создание расчетной модели реального сооружения.
4. Анализ результатов расчета.

## МЕТОДИКА

### Описание расчетной схемы рассматриваемого сооружения

Для наглядного описания методики моделирования предварительного напряжения и расчета на ударную нагрузку рассмотрим железобетонное покрытие здания особого функционального назначения.

Конструктивная схема состоит из железобетонного покрытия и стен нижележащего этажа (рис. 1). Толщина покрытия составляет 400 мм. Балки покрытия имеют шаг 1800 мм, сечение 500 x 1100 мм. Общая длина сооружения — 66 600 мм, ширина — 27 400 мм.

К одной стороне покрытия приложены вес вентиляционной трубы и поддерживающего каркаса. Балки с этой стороны выполнены с применением предварительного напряжения. Граничные условия приняты в виде жесткой заделки стен.

Ударная нагрузка от падения самолета приложена к наиболее нагруженной стороне. Изменение величины нагрузки принято по графику для марки самолета Learjet 23 (рис. 2).

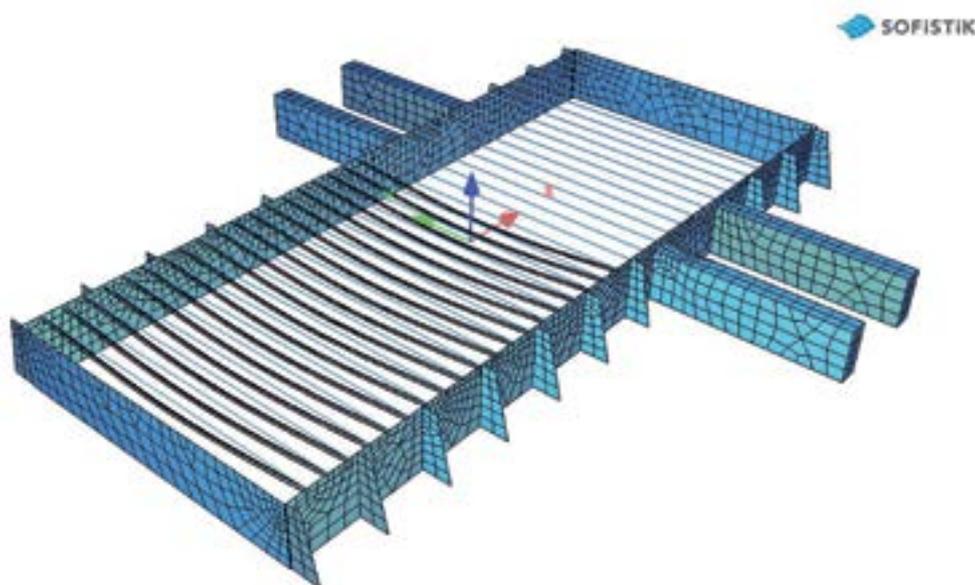


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

Fig. 1. General view of the calculation model

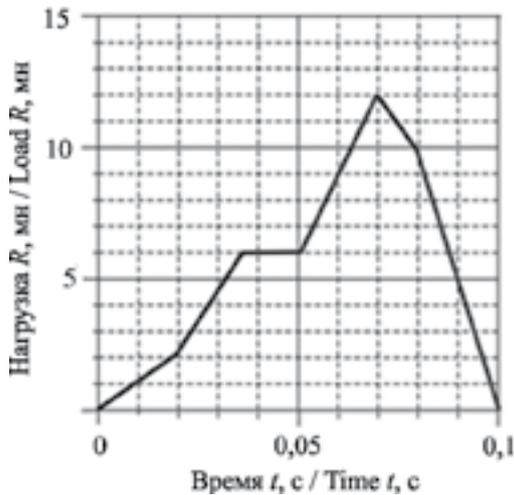


Рис. 2. Величина нагрузки Learjet 23

Fig. 2. Learjet 23 load value

### Моделирование предварительного напряжения в ПК SOFiSTiK

Для создания расчетной схемы в ПК SOFiSTiK существует несколько препроцессоров. Один из них — SOFiPLUS, работает на основе AutoCAD и позволяет создавать конструктивные элементы при помощи привычных инструментов среды.

Интерфейс SOFiLPUS — доступное средство для создания конструкций с предварительным напряжением. Для оптимизации процесса непосредственному созданию схемы предшествует формирование систем преднапряжения. Инструмент

«Системы преднапряжения» состоит из нескольких вкладок:

- Nominal force (номинальная сила).
- Immediate Losses (немедленные потери).
- Duct Geometry (геометрия канала).

Системы с заданным набором параметров будут присваиваться конструкциям, что ускорит процесс создания расчетной схемы.

Вкладка Nominal force (рис. 3) посвящена вводу основных параметров натяжения:

- Prestressing steel — марка стали для изготовления канатов.
- Number of strands — число проволок. Напрягаемые элементы представляют собой канаты, состоящие в свою очередь из проволок.
- Strand area — площадь одной проволоки.
- Area per tendon — автоматически вычисляемое значение площади каната.

Далее представлен автоматический расчет допустимых напряжений:

- $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты допуска, зависящие от нормативных документов;
- $f_t$ ,  $f_y$  — соответственно предел прочности и предел текучести применяемой стали. Напряжения умножаются на соответствующие коэффициенты допуска.

Согласно методике расчета программа выбирает наименьшее из полученных напряжений и умножает на вычисленную ранее площадь каната. Таким образом вычисляется допустимое усилие в канате.

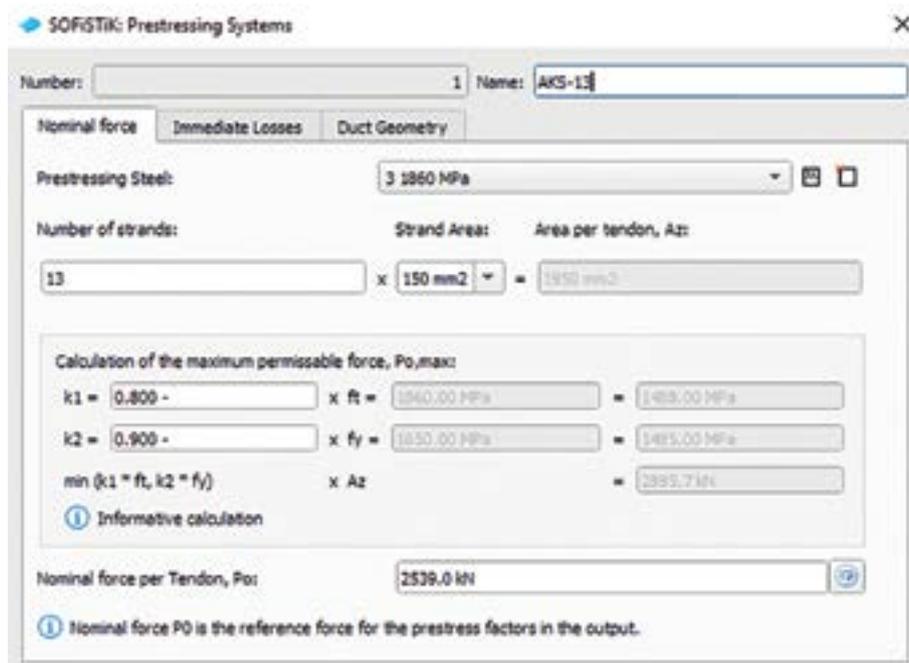


Рис. 3. Основные параметры натяжения

Fig. 3. Basic tension parameters

В поле Nominal force per tendon пользователем должно быть введено фактическое усилие натяжения каната, не превышающее расчетное допустимое.

Вкладка Immediate Losses посвящена вычислению моментальных потерь напряжения. Данный

**Табл. 1.** Моментальные потери напряжения. Параметры

**Table 1.** Immediate losses. Parameters

Параметр / Parameter	Назначение / Function
Проскальзывание при посадке анкера / Anchor slip	Величина проскальзывания каната при посадке анкера / The value of the cable slip in the course of anchor placement
Коэффициент трения / Friction coefficient	Коэффициент трения каната о стенки канала / The coefficient of cable friction against the duct surface
Коэффициент отклонения / Wobble coefficient	Коэффициент отклонения каната от оси канала / The coefficient of cable deviation from the duct axis

тип потерь возникает в конструкции еще до передачи напряжения на бетон. Величина потерь зависит от следующих регулируемых факторов (табл. 1).

Вкладка Duct geometry посвящена описанию каналов для протяжки канатов. В зависимости от принятого типа канатов, следует выбирать каналы определенной геометрии. Редактированию подлежат следующие параметры (табл. 2).

**Табл. 2.** Геометрия канала. Параметры

**Table 2.** Duct geometry. Parameters

Параметр / Parameter	Назначение / Function
Внешний диаметр канала / Outer diameter of the duct	Внешний диаметр канала / Outer diameter of the duct
Максимальное отклонение от оси канала / Maximum eccentricity in the duct	Характеризует максимально допустимое значение отклонения от оси канала / Characterizes maximum acceptable eccentricity in the duct
Минимальный радиус кривизны канала / Minimum radius of the curvature	Характеризует допустимое значение кривизны канала / Characterizes acceptable duct curvature
Длина прямого участка / Straight length	Длина прямого участка в опорных точках / Straight length in control points

После формирования систем предварительного напряжения следует приступить к описанию геометрии напрягаемого элемента. Для этой задачи в зависимости от типа конструкции, содержащей предварительно напряженные элементы, доступны следующие инструменты: Beam PT, Shell PT и Slab

PT. Работая с балочными элементами, геометрию каната можно создать функцией Tendon (Draw) по нанесенным линиям AutoCAD.

В рассматриваемом проекте был применен альтернативный способ создания функцией PT Editor. Ее применение требует предварительного ввода опорных осей. Созданный канат повторяет геометрию оси в плане, но при этом доступны параметры для ввода отклонений по нескольким направлениям в контрольных точках. В зависимости от формы раскладки напрягаемой арматуры доступны два варианта: Spline Geometry, Polygonal Geometry. В первом варианте арматура будет иметь плавную раскладку, а соответственно во втором раскладка с такими же отклонениями будет представлена в виде прямых отрезков. Для балок покрытия была принята часто применяемая параболическая форма канатов (рис. 4).

Размещенным канатам помимо типа системы преднапряжения задаются их частные характеристики, которые можно разделить на несколько групп:

- Construction Sequence — группа свойств, определяющих технологическую последовательность монтажа напрягаемого элемента, его натяжения и экструзии канала раствором.

- Prestressing — группа свойств применяемой технологии натяжения, включая направление натяжения, число канатов в одном канале и описание процедуры анкеровки.

Также доступны дополнительные пользовательские настройки.

Сформированная с применением преднапряжения расчетная схема экспортируется в структурный рабочий стол SOFiSTiK (SSD) для дальнейшего приложения нагрузок, формирования комбинаций и вывода усилий.

#### Задание ударной нагрузки в ПК SOFiSTiK

Ударная нагрузка — нетипичное для программных комплексов воздействие, и при помощи пользовательского интерфейса расчет схем с таким типом воздействий невозможен. Для решения таких проблем ПК SOFiSTiK позволяет использовать внутренний язык программирования CADiNP. Оболочка для ввода данных носит название TEDDY. Благодаря динамической справке нет необходимости запоминать всевозможные команды, достаточно лишь знать общую структуру ввода программного кода.

Как уже было сказано, ударная нагрузка относится к нестационарным воздействиям. Нестационарная нагрузка может быть задана функцией в дискретном виде. Для ввода нагрузок будет задействован модуль SOFiLOAD и его функции. Описание ударной нагрузки состоит из двух частей —

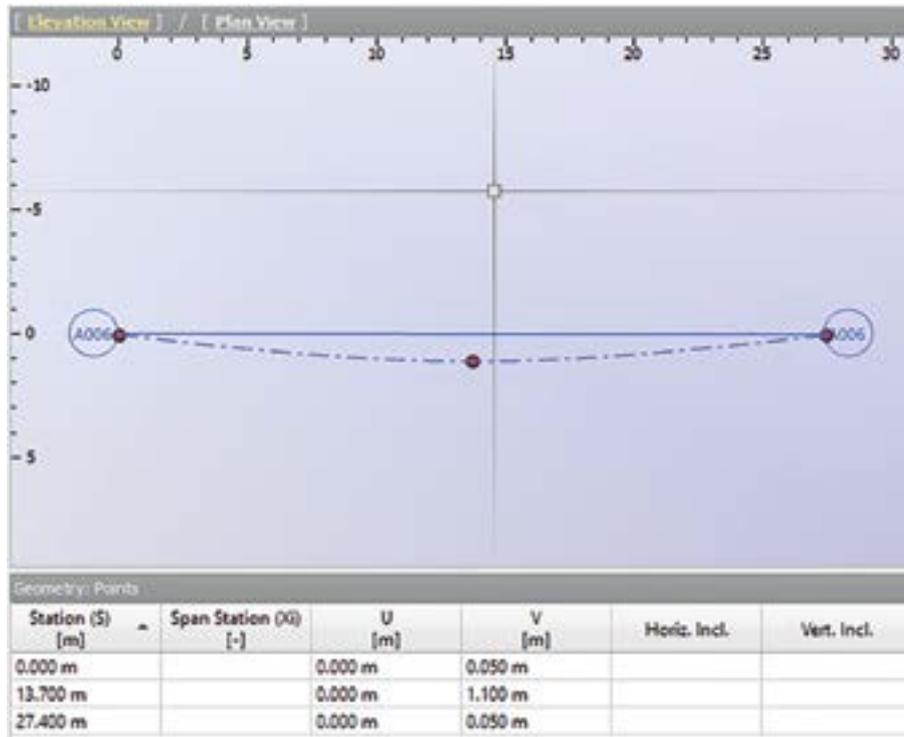


Рис. 4. Форма раскладки канатов

Fig. 4. Cable layout

приложения номинальной нагрузки и задания дискретных значений функции.

Первая часть осуществляется вызовом функции Quad. Ее запись включает место приложения нагрузки, направление и величину. Запись на рис. 5 обозначает приложение вектора нагрузки величиной 919 МН к группе элементов 100. Данная группа пластин покрытия была выбрана предварительно как место удара самолета.

```
LC 2 TYPE NONE;
quad grp 100 type pzz -919
quad grp 100 type pyy 919
```

Рис. 5. Функция Quad

Fig. 5. Quad function

Чтобы превратить статическую введенную нагрузку в нестационарную, применим команду FUNC. К вводу доступны параметр времени T и коэффициент включения нагрузки F (рис. 6). Описанию подлежат 11 временных интервалов от момента удара самолета до 0.1 с. В табличной форме каждому интервалу в соответствие ставится коэффициент силы.

Для решения задачи с дискретно заданной нагрузкой необходимо выполнить настройку процесса интегрирования функции. Подобные вычисления и динамический анализ выполняются за счет модуля DYNA (рис. 7). Для решения нашей задачи

```
FUNC T F
0 0;
0.01 0.083;
0.02 0.167;
0.03 0.375;
0.04 0.417;
0.05 0.417;
0.06 0.750;
0.07 1.000;
0.08 0.833;
0.09 0.417;
0.1 0
END
```

Рис. 6. Функция FUNC

Fig. 6. FUNC function

было принято интегрирование по методу Ньюмарка. Запись функции STEP означает разбиение области интегрирования на 1000 участков длиной 0.0001 с и вывода значений функции на каждом 100-м участке.

#### Стадии возведения сооружения и расчетные сочетания нагрузок

После создания расчетной схемы и описания нагрузок важным этапом описания задачи является описание стадий возведения сооружения. Данный аспект — особенно актуальный в силу применения систем с предварительным напряжением. Благода-

```

+PROG DYNA urs:15.2
HEAD Newmark method integration
CTRL OPT RLC +2
STEP N 1000 DT 0.0001 INT 100 THE 1.0
LC NO 2

```

Рис. 7. Фрагмент кода. DYNA

Fig. 7. Code snippet. DYNA

ря работе модуля CSM (Construction Stage Manager) возможно не только проанализировать напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций на различных этапах возведения, но и рассчитать вторые потери предварительного напряжения. Причиной таких потерь становится усадка и ползучесть бетона, и учет их необходим. Аналитическое вычисление значений по нормативным документам производится с большим количеством допущений, что может привести к ошибкам при анализе работы конструкций.

Основные вкладки интерфейса CSM — это «Стадии», «Группы» и «Нагрузки». Вкладка «Стадии» описывает общие параметры этапов возведения, такие как длительность, тип воздействия, влажность и температура окружающей среды. В данной задаче созданы следующие стадии (табл. 3).

Табл. 3. Стадии. CSM

Table 3. Stages. CSM

Стадия / Stage	Назначение / Function
Собственный вес / Dead load	Активация собственного веса / Imposed dead load
Предварительное натяжение / Prestress	Натяжение канатов / Prestress of cables
Ползучесть 1 / Creep 1	Ползучесть до стадии эксплуатации / Creep at the pre-operation stage
Кровля / Roof	Активация длительных нагрузок на кровлю / Sustained loading of roofs
Ползучесть 2 / Creep 2	Ползучесть на стадии эксплуатации / Creep at the operation stage

Натяжение канатов согласно технологии постнатяжения производится после твердения бетона и соответственно после активации стадии собственного веса.

Активация длительных нагрузок на кровлю выделена в отдельную стадию. Это сделано для корректного разделения ползучести на этапы до и после ввода в эксплуатацию.

Вкладка «Группы» позволяет замоделировать процесс возведения конструкции. Но для решения данной задачи принята единовременная активация всех конструктивных элементов.

Вкладка «Нагрузки» описывает появление тех или иных воздействий в расчетной схеме, а также период их существования. Помимо особой нагрузки от удара самолета к покрытию приложены следующие длительные воздействия (табл. 4). Помимо указанных параметров возможна корректировка величины воздействия при помощи коэффициента включения.

Табл. 4. Нагрузки. CSM

Table 4. Loads. CSM

Воздействие / Loadcase	Стадия ввода нагрузки / First activation	Время действия / Active till
Вес кровли / Roof weight	Кровля / Roof	Неограниченное / Unlimited
Вес металлического каркаса на кровле / Metal roof frame weight	Кровля / Roof	Неограниченное / Unlimited
Вес дымовой трубы / Chimney weight	Кровля / Roof	Неограниченное / Unlimited

Для выполнения расчета из заданных загруженных необходимо сформировать расчетные сочетания нагрузок. Соответствующий инструмент называется Combination rules (рис. 8). Для анализа НДС рассматриваемого сооружения были сформированы сочетания для проверки по двум предельным состояниям. Следующий необходимый этап перед расчетом — формирование суперпозиций. В инструменте Superposition Commands выбору подлежат типы конструктивных элементов и виды внутренних усилий для расчета (рис. 9).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для графического вывода данных расчета применяется программный модуль WinGRAF. Графический модуль дает возможность представить усилия в элементах и перемещения узлов в наглядном виде. Возникающие внутренние моменты для наглядного отображения возможно представить в виде изополей и других альтернативных видах. Для анализа НДС конструкции выведены изополя внутренних моментов покрытия (рис. 10, 11) и перемещения узлов (рис. 12).

Полученные эпюры внутренних усилий могут быть использованы для конструирования армирования покрытий особого назначения. На основе изополей перемещений был получен график зависимости развития деформаций от ударной нагрузки. На график нанесены максимальные значения перемещений для каждого из 11 интервалов приложения нагрузки (рис. 13). Полученные данные соответствуют ожиданиям и в целом не противоречат инженерной

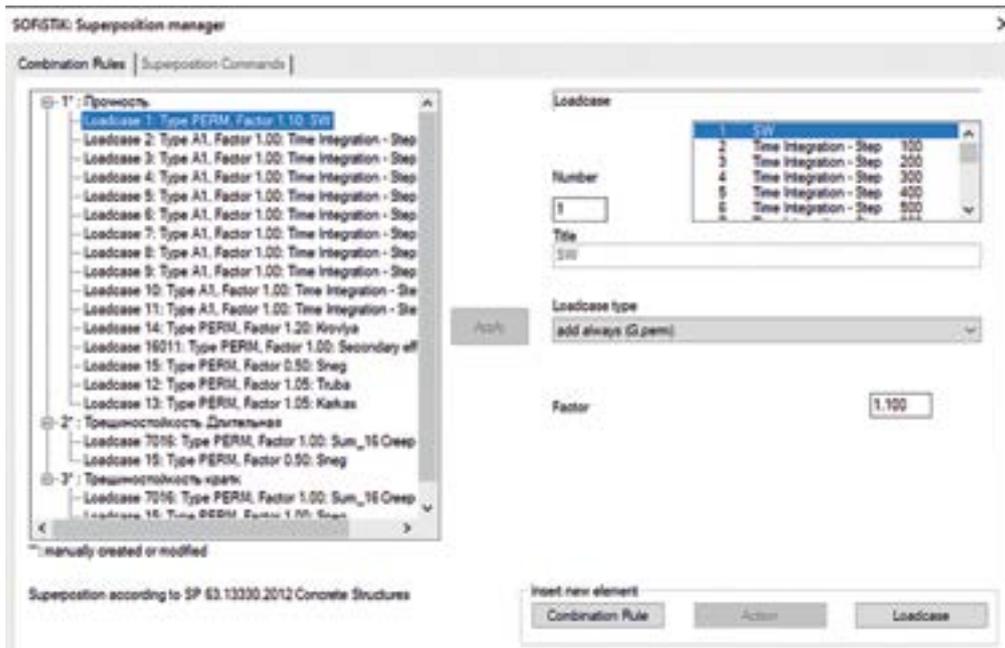


Рис. 8. Расчетные сочетания нагрузок

Fig. 8. Combination rules

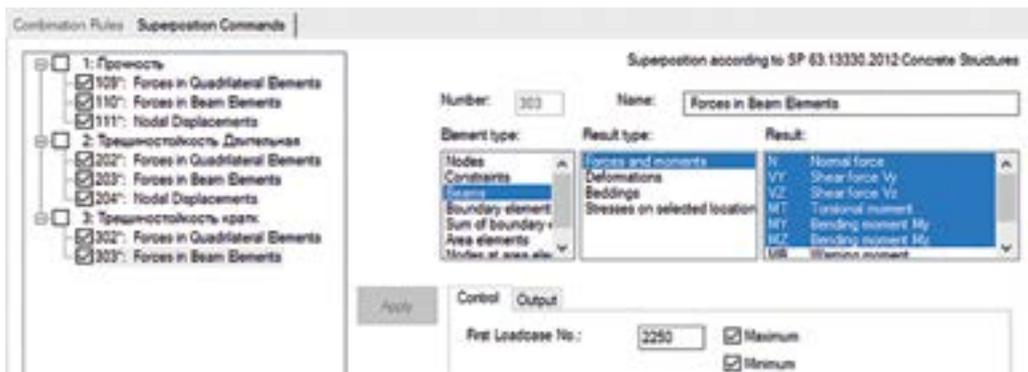


Рис. 9. Суперпозиции загрузений

Fig. 9. Superposition Commands

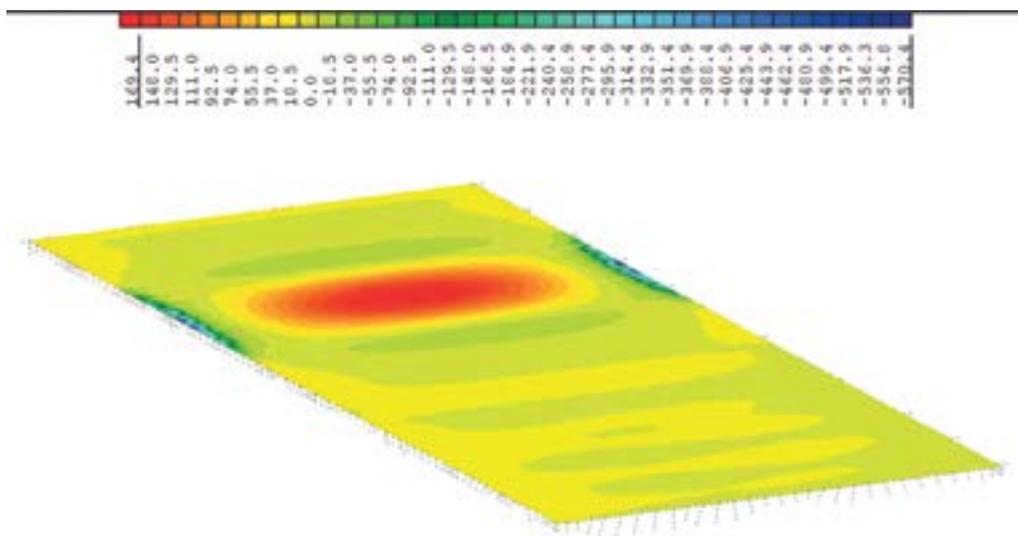


Рис. 10. Изополю внутренних моментов  $M_y$

Fig. 10. Iso-area of bending moments  $M_y$

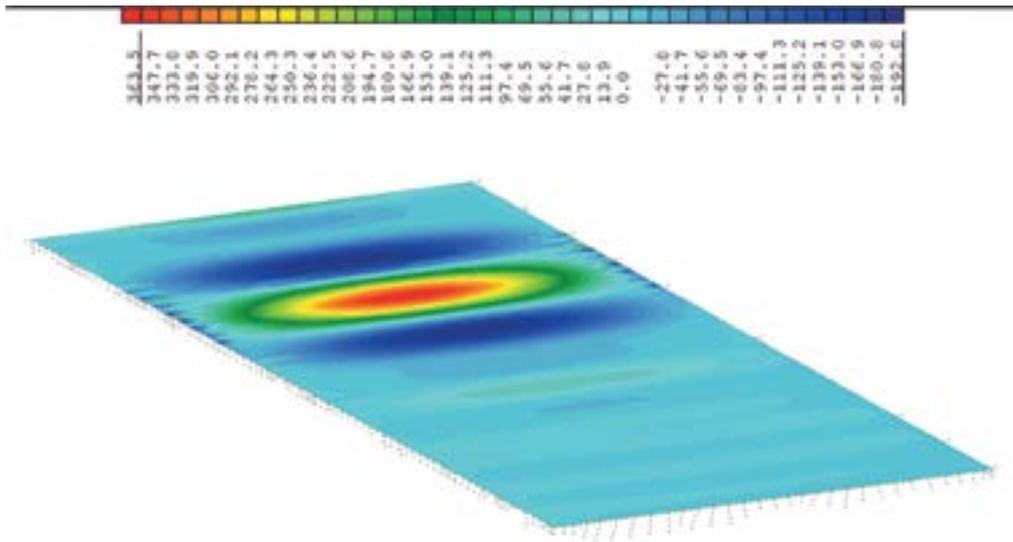


Рис. 11. Изополя внутренних моментов  $M_x$

Fig. 11. Iso-area of bending moments  $M_x$

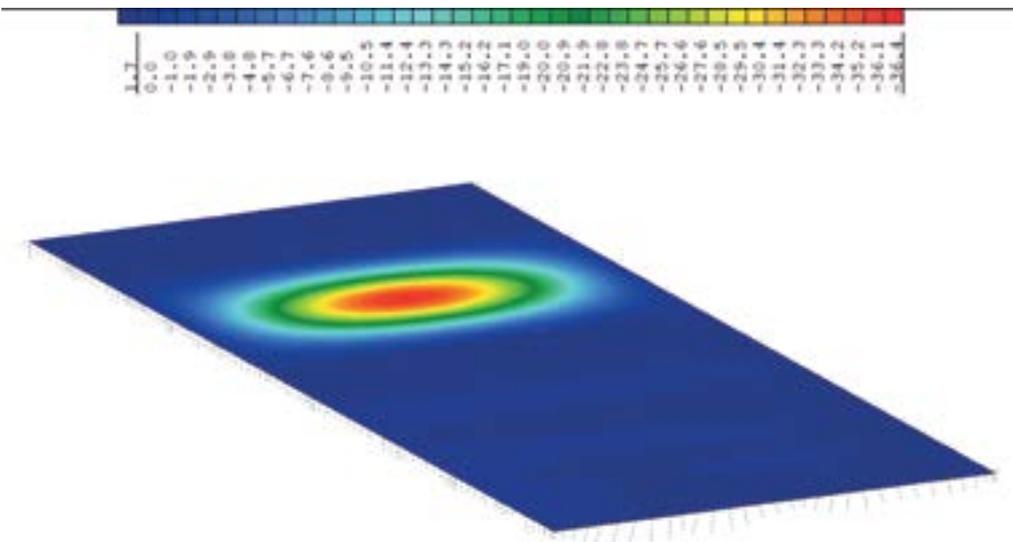


Рис. 12. Изополя перемещений узлов покрытия

Fig. 12. Iso-area of displacements of coating units

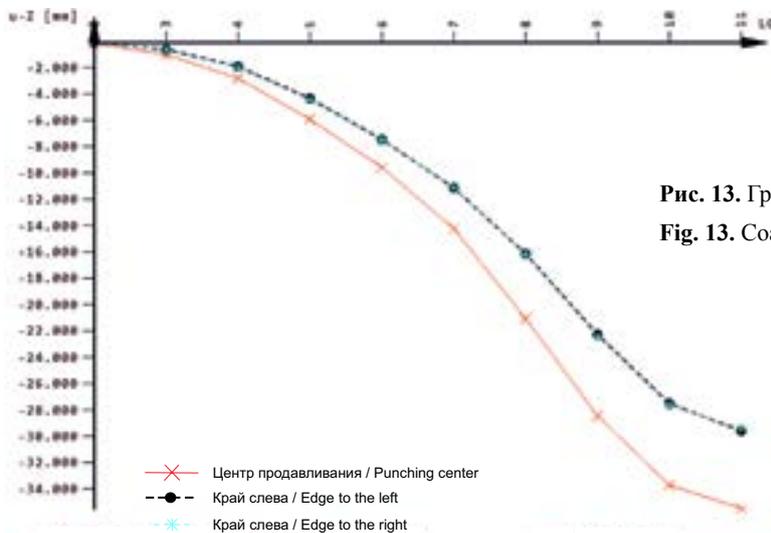


Рис. 13. График развития деформаций покрытия

Fig. 13. Coating strain graph

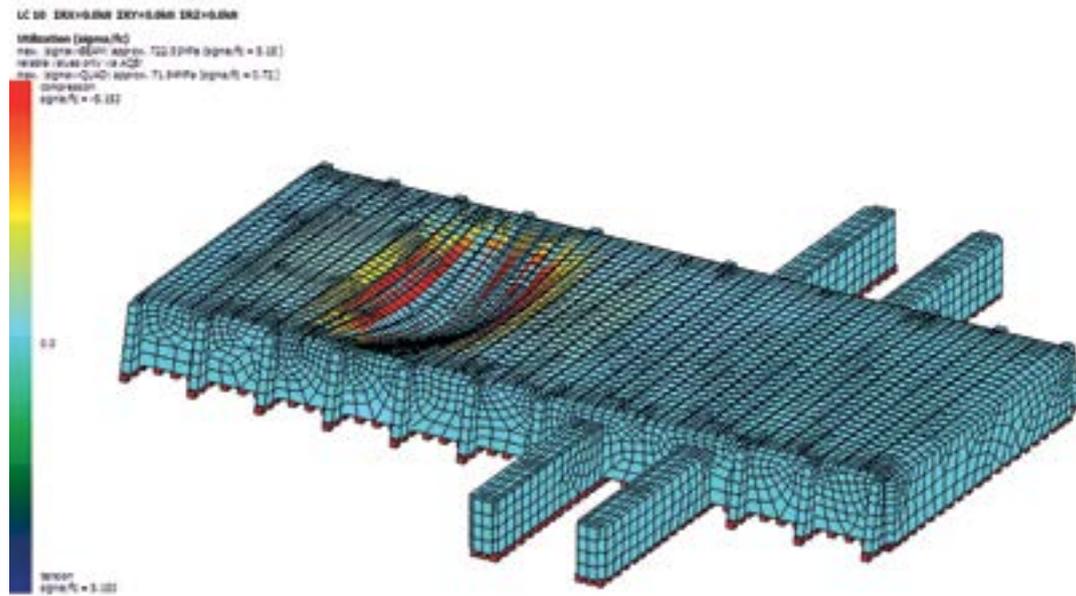


Рис. 14. Визуализация деформирования конструкции

Fig. 14. Structural deformation visualization

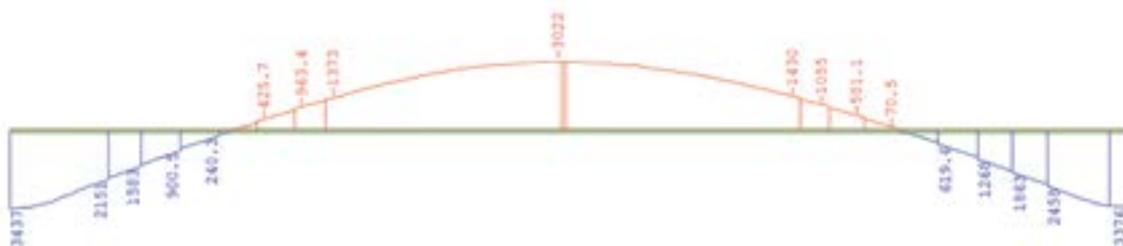


Рис. 15. Эпюра изгибающих моментов от воздействия предварительного напряжения

Fig. 15. Diagram of bending moments from the action of prestressing

логике. Значения перемещений узлов по краям зоны удара развивались одинаково, а максимальное значение смещения по вертикали для центральных узлов составило 36,4 мм. Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» предельное допустимое значение прогиба перекрытия пролетом более 24 м вычисляется по формуле:  $l/250$ , где  $l$  — длина пролета. Для рассматриваемого сооружения  $l = 27\,400$  мм, а допустимый прогиб соответственно  $27\,400/250 = 109,6$  мм. Таким образом, расчетное значение прогиба перекрытия не превышает нормативно допустимых.

Для общего понимания принципа работы конструкции модуль Animator позволяет увидеть анимированную объемную модель (рис. 14).

В ходе расчета предварительно напряженных балок перекрытия были вычислены усилия от натяжения канатов. В расчет усилий также входит расчет потерь напряжения, произведенный автоматически и в соответствии с нормативными документами.

На рис. 15 представлена эпюра моментов в балке покрытия от независимого воздействия предварительного напряжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере железобетонного ребристого предварительно напряженного перекрытия пошагово описано моделирование и расчет на ударное воздействие в ПК SOFiSTiK.

Время, затраченное на ввод систем предварительного напряжения, составило не более часа, а непосредственное создание конструкций происходило с высокой степенью автоматизации. Потери напряжения были вычислены автоматически и в соответствии с СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции». Стандартные методы моделирования таких конструкций требуют ручных расчетов потерь напряжения для каждого отдельно взятого элемента, выполняются со значи-

тельными допущениями и высокой трудоемкостью. Расчет в ПК SOFiSTiK позволяет оценить НДС конструкции в любой момент времени, а также учесть стадийность возведения сооружения с учетом технологических особенностей монтажа конструкций с преднапряженной арматурой.

Для решения задачи по расчету на динамическое ударное воздействие был задействован язык программирования CADINP. Открытая и доступная пользователю структура кода демонстрирует гибкость программного комплекса для решения нестандартных инженерных задач. Из-за невозможности описания воздействия удара самолета конкретной функцией, расчет в классических программных комплексах не представляется возможным без значительных упрощений. В данном расчете результирующий код на CADINP занял не более 26 строчек кода, половина из которых являются стандартными и не

требуют изменений. В результате проведен временной анализ ударной нагрузки, а также сформирована суперпозиция результатов для дальнейшего анализа, подбора армирования и локальных проверок.

По результатам расчета был составлен график развития деформаций покрытия от удара самолета. Полученные данные будут использованы для проектирования сооружений особого назначения. Описанные способы расчета конструкций могут применяться при разработке оболочек атомных электростанций и других сооружений повышенной ответственности.

Принимая во внимание все указанное выше, можно характеризовать методику моделирования и расчета предварительно напряженных конструкций на ударное воздействие в ПК SOFiSTiK как высокоэффективную, не трудоемкую и дающую точные результаты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Yao D., Jia J., Wu F., Yu F. Shear performance of prestressed ultra high strength concrete encased steel beams // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 52. Pp. 194–201. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.006
2. Парфенов С.Г., Моргунов М.В. Экспериментальные исследования потерь предварительного напряжения арматуры в железобетонных элементах из мелкозернистого бетона // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2018. Т. 22. № 1. С. 112–117. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-1-112-117
3. Баранова Ю.А., Пушкарева В.О., Маношкина Г.В. Технология предварительного напряжения монолитного железобетона в построчных условиях (постнапряжение) // *Новые технологии в учебном процессе и производстве*. 2017. С. 76–78.
4. Peng H., Zhang J., Shang S., Liu Y., Cai C.S. Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 127. Pp. 62–72. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.026
5. Рябенко Н.Д., Тур В.В. Установка для определения длины зоны передачи напряжений предварительно напряженной арматуры железобетонных элементов // *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2017. № 16. С. 98–105.
6. Корчагина Е.И. Изучение методики расчета вспарушенных монолитных железобетонных плит перекрытий с предварительным напряжением арматуры // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса*. 2017. С. 281–283.
7. Портаев Д.В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий. М. : Изд-во АСВ, 2011. 247 с.
8. Rao B., Chen I., Fang Q., Hong J., Xiang H.B., Liu Z.X. Dynamic responses of reinforced concrete beams under double-end-initiated close-in explosion // *Defence Technology*. 2018. Vol. 14. Issue 5. Pp. 527–539. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.024
9. Li Z., Liu Y., Yan J.B., Huang F.L., Yu W.L. Experimental investigation of p-section concrete beams under contact explosion and close-in explosion conditions // *Defence Technology*. 2018. Vol. 14. Issue 5. Pp. 540–549. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.025
10. Кумпяк О.Г., Мешчелов Н.В. Oblique-section compressive and flexural strength of yield-supported concrete structures under dynamic load // *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. English version appendix*. 2015. No. 1. Pp. 51–59.
11. Тяпин А.Г. Особенности расчета на сейсмические воздействия ответственных сооружений АЭС // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2014. № 5. С. 34–38.
12. Тymoшko A., Yugov A. Comparison of efficiency of LIRA 9.6 and SAP2000 program complexes in the dynamic calculation of high-rise object // *Metal constructions*. 2015. Vol. 21. No. 4. Pp. 207–216.
13. Клепов М.В., Иванов С.Ю. Учет демпфирования колебаний при динамических нагрузках в ПК «Ли́ра» // *Смотр-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета*. 2019. С. 393–394.
14. Рахимов А.Р., Перцева О.Н. Анализ современного состояния BIM-технологии в строительной индустрии для моделирования нестационарных воздействий // *StudArctic Forum*. 2017. Т. 4. № 8 (8). С. 56–60. DOI: 10.15393/j102.art.2017.2201

15. Chen W., Hao H., Chen S. Numerical analysis of prestressed reinforced concrete beam subjected to blast loading // *Materials & Design* (1980–2015). 2015. Vol. 65. Pp. 662–674. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.033
16. Завьялов И.С. Решение нелинейного динамического уравнения методом неупругого анализа // XXIII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области. 2019. 238 с.
17. Чжоу З.А. Использование плагинов в BIM-программах при проектировании элементов мостов // *Мир транспорта*. 2018. Т. 16. № 2 (75). С. 68–73.
18. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. et al. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 75. Pp. 1046–1053. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.083
19. Ревенков Е.Д. Внедрение BIM-технологий в промышленное и гражданское строительство в России // *Скиф. Вопросы студенческой науки*. 2018. № 8 (24). С. 155–158.
20. Анахин Н.Ю., Грошев Н.Г., Оноприйчук Д.А. Использование BIM-технологий в строительной отрасли России // *Поколение будущего*. 2018. С. 5–9.
21. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — literature review and future needs // *Automation in Construction*. 2014. Vol. 38. Pp. 109–127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023
22. Scheffer M., Mattern H., König M. BIM project management. *Building Information Modeling*. 2018. Pp. 235–249. DOI: 10.1007/978-3-319-92862-3\_13

Поступила в редакцию 31 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 24 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2020 г.

О Б АВТОРАХ: **Владимир Владимирович Лалин** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; РИНЦ ID: 536375, Scopus: 56091980300; vllalin@yandex.ru;

**Ольга Николаевна Перцева** — специалист отдела САПР; **ПСС ГРАЙТЕК**; 191040, г. Санкт-Петербург, Лиговский пр., д. 56-г; SPIN-code: 3534-3621, ORCID: 0000-0003-3185-2970; olya\_perceva@mail.ru;

**Владимир Рафаильевич Камалтдинов** — специалист по расчетам строительных конструкций; **Институт технологий преднапряжения (ИТП)**; 117545, г. Москва, ул. Подольских курсантов, вл. 22, стр. 5; olya\_perceva@mail.ru;

**Глеб Вадимович Мартынов** — студент; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-code: 5046-0475, ORCID: 0000-0002-2179-8811; martynovgleb@rambler.ru;

**Дарья Евгеньевна Монастырева** — студентка; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 3376-6249; 02dm12@rambler.ru;

**Роман Сергеевич Тихонов** — студент; **Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)**; 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29; SPIN-код: 5030-1678, ORCID: 0000-0002-9247-6537; tikhonovrs96@mail.ru.

## REFERENCES

1. Yao D., Jia J., Wu F., Yu F. Shear performance of prestressed ultra-high strength concrete encased steel beams. *Construction and Building Materials*. 2014; 52:194-201. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.006
2. Parfenov C.G., Morgunov M.V. Experimental investigations of the losses of prestressing in fine reinforced concrete elements. *Proceedings of the Southwest State University*. 2018; 22(1):112-117. DOI: 10.21869/2223-1560-2018-22-1-112-117 (rus.).
3. Baranova YU.A., Pushkareva V.O., Manoshkina G.V. Technology of prestressed of monolithic reinforced concrete in conditions of construction (post tension). *New technologies in the educational process and production*. 2017; 76-78. (rus.).
4. Peng H., Zhang J., Shang S., Liu Y., Cai C.S. Experimental study of flexural fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates. *Engineering Structures*. 2016; 127:62-72. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.08.026

5. Ryabenko N.D., Tur V.V. Installation for determining the length of the stress transmission zone of prestressed reinforcement of reinforced concrete elements. *Bulletin of Polotsk State University*. 2017; 16:98-105. (rus.).
6. Korchagina E.I. Studying the calculation method of cracked monolithic reinforced concrete floor slabs with prestressing reinforcement. *Scientific support of the agro-industrial complex*. 2017; 281-283. (rus.).
7. Portaev D. *Calculation and design of monolithic prestressed structures of civil buildings*. Moscow, Publishing House Association of Construction Universities, 2011; 247. (rus.).
8. Rao B., Chen I., Fang Q., Hong J., Xiang H.B., Liu Z.X. Dynamic responses of reinforced concrete beams under double-end-initiated close-in explosion. *Defence Technology*. 2018; 14(5):527-539. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.024
9. Li Z., Liu Y., Yan J.B., Huang F.L., Yu W.L. Experimental investigation of p-section concrete beams under contact explosion and close-in explosion conditions. *Defence Technology*. 2018; 14(5):540-549. DOI: 10.1016/j.dt.2018.07.025
10. Kumpyak O.G., Meshcheulov N.V. Oblique-section compressive and flexural strength of yield-supported concrete structures under dynamic load. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building, English version appendix*. 2015; 1:51-59.
11. Tyapin A.G. Features of the seismic calculation of critical structures of nuclear power plants. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2014; 5:34-38. (rus.).
12. Tymoshko A., Yugov A. Comparison of efficiency of LIRA 9.6 and SAP2000 program complexes in the dynamic calculation of high-rise object. *Metal constructions*. 2015; 21(4):207-216.
13. Klepov M.V., Ivanov S.YU. Accounting for vibration damping under dynamic loads in the PC "Lira". *Review-competition of scientific, design and technological works of students of Volgograd State Technical University*. 2019; 393-394. (rus.).
14. Rahimov A.R., Pertseva O.N. Analysis of the current state of BIM-technology in the building industry for simulation of non-stationary loadings. *StudArctic Forum*. 2017; 4(8)(8):56-60. DOI: 10.15393/j102.art.2017.2201 (rus.).
15. Chen W., Hao H., Chen S. Numerical analysis of prestressed reinforced concrete beam subjected to blast loading. *Materials & Design (1980-2015)*. 2015; 65:662-674. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.09.033
16. Zav'yalov I.S. The solution of a nonlinear dynamic equation by inelastic analysis. *XXIII regional conference of young researchers of the Volgograd region*. 2019; 238. (rus.).
17. Chzho Z.A. The use of plug-ins in BIM-programs for the design of bridge elements. *World of Transport*. 2018; 16(2)(75):68-73. (rus.).
18. Ghaffarianhoseini A., Tookey J., Ghaffarianhoseini A., Naismith N., Azhar S., Efimova O. et al. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017; 75:1046-1053. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.083
19. Revenkov E.D. Introduction of BIM technologies in industrial and civil engineering in Russia. *Skiff. Student Science Issues*. 2018; 8(24):155-158. (rus.).
20. Anahin N.Yu., Groshev N.G., Onoprijchuk D.A. The use of BIM-technologies in the construction industry of Russia. *Generation of the future*. 2018; 5-9. (rus.).
21. Volk R., Stengel J., Schultmann F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*. 2014; 38:109-127. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023
22. Scheffer M., Mattern H., König M. *BIM project management*. Building Information Modeling. 2018; 235-249. DOI: 10.1007/978-3-319-92862-3\_13

Received October 31, 2019.

Adopted in a revised form on November 24, 2019.

Approved for publication March 29, 2020.

**B I O N O T E S :** **Vladimir V. Lalin** — Doctor of Technical Sciences, Professor, head of department; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; ID RISC: 536375, Scopus: 56091980300; vllalin@yandex.ru;

**Olga N. Pertseva** — CAD specialist; **PSS GRAITEC**; 56-g Ligovskiy prospekt, St. Petersburg, 191040, Russian Federation; SPIN-код: 3534-3621, ORCID: 0000-0003-3185-2970; olya\_perceva@mail.ru;

**Vladimir R. Kamaltdinov** — specialist in design of civil engineering structures; **Institute of technology of prestressing**; pos. 22, build. 5, Podolsky cadets st., Moscow, 117545, Russian Federation; olya\_perceva@mail.ru;

**Gleb V. Martynov** — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 5046-0475, ORCID: 0000-0002-2179-8811; martynovgleb@rambler.ru;

**Daria E. Monastyreva** — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 3376-6249; 02dm12@rambler.ru;

**Roman S. Tikhonov** — undergraduate student; **Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU)**; 29 Polytechnicheskaya, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; SPIN-code: 5030-1678, ORCID: 0000-0002-9247-6537; tikhonovrs96@mail.ru.