





АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS OF ANALYSIS OF STRUCTURES


DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-1-73-88
УДК 69

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Памятная стела на локальной сферической опоре: проектно-конструкторские решения, расчетное обоснование

Д.В. Петров , А.Г. Юдов, В.В. Доценко, О.Ю. Жабунина,
Е.В. Калатуров, Н.М. Натънчик, А.В. Абрамов, М.В. Никульшин 

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Российская Федерация

 m.v.nikulshin@vniitf.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 января 2022 г.

Доработана: 15 февраля 2022 г.

Принята к публикации: 20 февраля 2022 г.

Аннотация. Представлена конструкция архитектурно-художественной композиции «Памятная стела на локальной сферической опоре» (Стела КБ-1), проанализированы проектно-конструкторские решения и расчетное обоснование прочности и устойчивости конструкции к внешним воздействиям в условиях наиболее интенсивных климатических воздействий с параметрами, задаваемыми согласно строительным нормам и правилам. Стела КБ-1 представляет собой установленный вертикально габаритно массивный макет мирного ядерного взрывного устройства массой 2,8 т и высотой 2,8 м с полусферическими крышками. В соответствии с техническим заданием требовалось максимально точно сохранить внешний облик устройства, поместив его на небольшой локальной опоре. Особенность конструкции заключается в ее угловой подвижности относительно опоры. Для обеспечения устойчивого равновесного состояния стелы в месте опоры организован шарнир, стела установлена свободно нижней сферой на промежуточную подставку со специально подобранной сферической поверхностью. Дополнительно существенно снижен центр масс стелы путем облегчения (утонения стенок) верхней части корпуса

Петров Дмитрий Витальевич, доктор физико-математических наук, главный конструктор, начальник конструкторского бюро № 1, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика Е.И. Забабахина, Российская Федерация, 456770, Снежинск, ул. Васильева, д. 13; ORCID: 0000-0003-2903-8013, eLIBRARY AuthorID: 1149234; D.V.Petrov@vniitf.ru

Юдов Александр Георгиевич, первый заместитель главного конструктора, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика Е.И. Забабахина, Российская Федерация, 456770, Снежинск, ул. Васильева, д. 13; A.G.Yudov@vniitf.ru

Доценко Владислав Валерьевич, заместитель начальника отдела, начальник лаборатории, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика Е.И. Забабахина, Российская Федерация, 456770, Снежинск, ул. Васильева, д. 13; Vlad_Dotsenko@inbox.ru

Жабунина Ольга Юрьевна, кандидат технических наук, начальник группы, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика Е.И. Забабахина, Российская Федерация, 456770, Снежинск, ул. Васильева, д. 13; Jabuni@yandex.ru

Калатуров Егор Владимирович, инженер-конструктор 3 категории, Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики имени Е.И. Забабахина, Российская Федерация, 456770, Снежинск, ул. Васильева, д. 13; E.V.Kalaturov@vniitf.ru

Натънчик Надежда Михайловна, инженер-исследователь специзделий 2 категории, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика Е.И. Забабахина, Российская Федерация, 456770, Снежинск, ул. Васильева, д. 13; natin4iknadezhda@yandex.ru

Абрамов Алексей Витальевич, главный специалист, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика Е.И. Забабахина, Российская Федерация, 456770, Снежинск, ул. Васильева, д. 13; A.V.Abramov@vniitf.ru

Никульшин Максим Викторович, кандидат технических наук, начальник отдела, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт имени академика Е.И. Забабахина, Российская Федерация, 456770, Снежинск, ул. Васильева, д. 13; M.V.Nikulshin@vniitf.ru

© Петров Д.В., Юдов А.Г., Доценко В.В., Жабунина О.Ю., Калатуров Е.В., Натънчик Н.М., Абрамов А.В., Никульшин М.В., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Для цитирования

Петров Д.В., Юдов А.Г., Доценко В.В., Жабунина О.Ю., Калатуров Е.В., Натънчик Н.М., Абрамов А.В., Никульшин М.В. Памятная стела на локальной сферической опоре: проектно-конструкторские решения, расчетное обоснование // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18. № 1. С. 73–88. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-73-88>

и установки дополнительного груза в нижней его части. В результате при действии внешних боковых нагрузок стела приобретает устойчивое положение с возможными колебаниями по типу «неваляшки» и с возвратом в исходное состояние. Для обоснования прочности и устойчивости Стелы КБ-1 при внешних нагрузках выполнены аналитические и численные расчетные исследования. Показано, что разработанная конструкция удовлетворяет предъявляемым нормативным требованиям и безопасна в эксплуатации.

Ключевые слова: архитектурно-художественная композиция, стела, сферическая опора, численная модель, ветровая нагрузка, прочность, устойчивость, безопасность

Memorial stele on a compact spherical support: design-and-engineering solutions, design-basis justification

Dmitrii V. Petrov¹, Aleksandr G. Yudov, Vladislav V. Dotsenko, Olga Yu. Zhabunina, Egor V. Kalaturov, Nadezhda M. Natynchik, Aleksei V. Abramov, Maksim V. Nikulshin²

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russian Federation
✉ m.v.nikulshin@vniitf.ru

Article history

Received: January 12, 2022

Revised: February 15, 2022

Accepted: February 20, 2022

For citation

Petrov D.V., Yudov A.G., Dotsenko V.V., Zhabunina O.Yu., Kalaturov E.V., Natynchik N.M., Abramov A.V., Nikulshin M.V. Memorial stele on a compact spherical support: design-and-engineering solutions, design-basis justification. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(1):73–88. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-73-88>

Abstract. The article presents the design of the architectural and artistic composition “Memorial stele on a local spherical support” (KB-1 Stele), as well as the analysis of design solutions and the calculated justification of the strength and stability of the KB-1 Stele to external influences in conditions of the most intense climatic influences with parameters set according to building codes and regulations. The design of the KB-1 Stele is a vertically installed overall mass model of a peaceful nuclear explosive device weighing 2.8 tons and 2.8 meters high with hemispherical covers. In accordance with the terms of reference, it was required to preserve the appearance of the device as accurately as possible by placing it on a small local support. The peculiarity of the design lies in its angular mobility relative to the support. To ensure a stable equilibrium state of the stele, a hinge is organized at the place of support, the stele is installed freely by the lower sphere on an intermediate stand with a specially selected spherical surface. Additionally, the center of mass of the stele is significantly reduced by lightening (thinning the walls) of the upper part of the body and installing additional cargo in its lower part. As a result, under the action of external lateral loads, the stele acquires a stable position with possible fluctuations in the tumbler type and with a return to its original state. Analytical and numerical computational studies were performed to substantiate the strength and stability of the KB-1 Stele under external loads. It is shown that the developed design meets the regulatory requirements and is safe in operation.

Keywords: architectural composition, artistic composition, stele, spherical support, numerical model, wind load, strength, stability, safety

Dmitrii V. Petrov, Dr. Sci. in Physics and Mathematics, chief designer, Chief of Design Bureau No 1, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, 13 Vasilyeva St, Snezhinsk, 456770, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2903-8013, eLIBRARY AuthorID: 1149234; D.V.Petrov@vniitf.ru

Aleksandr G. Yudov, First Deputy Chief Designer, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, 13 Vasilyeva St, Snezhinsk, 456770, Russian Federation; A.G.Yudov@vniitf.ru

Vladislav V. Dotsenko, Deputy Chief of Department, Head of Laboratory, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, 13 Vasilyeva St, Snezhinsk, 456770, Russian Federation; Vlad_Dotsenko@inbox.ru

Olga Y. Zhabunina, Candidate of Engineering Science, Head of Group, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, 13 Vasilyeva St, Snezhinsk, 456770, Russian Federation; Jabuni@yandex.ru

Egor V. Kalaturov, 3rd Category Design Engineer, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, 13 Vasilyeva St, Snezhinsk, 456770, Russian Federation; E.V.Kalaturov@vniitf.ru

Nadezhda M. Natynchik, 2nd Category Special Product Research Engineer, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, 13 Vasilyeva St, Snezhinsk, 456770, Russian Federation; natin41knadezhda@yandex.ru

Aleksei V. Abramov, chief specialist, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, 13 Vasilyeva St, Snezhinsk, 456770, Russian Federation; A.V.Abramov@vniitf.ru

Maksim V. Nikulshin, Candidate of Engineering Science, Head of Group, Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, 13 Vasilyeva St, Snezhinsk, 456770, Russian Federation; M.V.Nikulshin@vniitf.ru

Введение

В 2019 г. исполнилось 90 лет со дня рождения выдающегося ученого, академика Б.В. Литвинова (12.11.1929), более 30 лет возглавлявшего первое конструкторское бюро (КБ-1) в качестве главного конструктора РФЯЦ-ВНИИТФ. В честь этого события и в порядке подготовки в 2020 г. к юбилейным мероприятиям, посвященным 65-летию РФЯЦ-ВНИИТФ и 60-летию КБ-1, было принято решение о разработке и установке вблизи входа в здание КБ-1 архитектурно-художественной композиции (АХК) «Стела КБ-1». Цель проекта – сохранение памяти о разработчиках и испытателях ядерных зарядов, формирования гордости за нашу Родину, уважения к старшему поколению.

Основой для разработки АХК явился музейный экспонат, представляющий собой габаритно-массовый макет мирного ядерно-взрывного устройства (ЯВУ), состоящий из цилиндрической части и двух сферических крышек. Такое уникальное «чистое» ЯВУ большой мощности использовалось для мирных подземных ядерных взрывов наружного действия. Физическая схема первичного ядерного узла предложена физиком-теоретиком РФЯЦ-ВНИИТФ Ю.С. Вахрамеевым и успешно испытана 11 мая 1965 г. на Семипалатинском ядерном полигоне.

Борис Васильевич Литвинов активно продвигал тематику мирных ядерных взрывов. В своей книге «Атомная энергия не только для военных целей» он отметил: «Принципиальной разницы между ЯВУ для промышленного применения и для военного нет. Но технически – очень большая разница. Очень большая. Изделие для военного применения проще. Дело в том, что при конструировании промышленного заряда мы должны все время думать о том, что он работает внутри страны. Мы обязаны предложить такую конструкцию, чтобы при работе, скажем, при интенсификации добычи нефти, свести к минимуму радиационное загрязнение. Это – хорошая инженерная задача».

В данном проекте авторы решили соригинальничать и решить тоже *хорошую инженерную задачу*, предложив поставить ЯВУ вертикально (высота 2,8 м) и свободно в виде стелы на импровизированный пьедестал с сохранением устойчивости под собственным весом (2,8 т), при этом стела должна выглядеть изящно и быть безопасной при возможных внешних воздействиях, включая ураган.

Для справки в табл. 1 приводятся характеристики воздействия ветра по шкале Бофорта.

Таблица 1

Характеристики воздействия ветра по шкале Бофорта

| Средняя скорость, м/с | Баллы Бофорта | Характеристика ветра | Оценка ветра визуально |
|-----------------------|---------------|----------------------|--|
| 18,3–21,5 | 9 | Шторм | Небольшие наружные повреждения зданий, особенно крыш |
| 21,6–25,1 | 10 | Сильный шторм | Клонит к земле и ломает деревья |
| 25,2–29,0 | 11 | Жестокий шторм | Вырывает с корнями деревья, переворачивает машины |
| Более 29,0 | 12 | Ураган | Опустошительные масштабные разрушения |

Table 1

Wind characteristics on the Beaufort wind scale

| Average speed, m/s | Beaufort number | Type of wind | Observed land conditions |
|--------------------|-----------------|---------------|---|
| 18.3–21.5 | 9 | Strong gale | Slight structural damage, roofs removed |
| 21.6–25.1 | 10 | Storm | Trees bowed down and broken off |
| 25.2–29.0 | 11 | Violent storm | Trees uprooted, vehicles turned over |
| Over 29.0 | 12 | Hurricane | Devastating large-scale damages |

При традиционной установке стелы как неподвижного памятника требуется мощный фундамент, препятствующий выворачиванию объекта «с корнем», и жесткое (повышенной прочности) закрепление к фундаменту стелы, что весьма непросто при сохранении визуального облика ЯВУ.

Для достижения устойчивого состояния стелы предложено оригинальное решение: в месте закрепления стелы организовать шарнир, уменьшив тем самым нагрузку на фундамент, установить стелу свободно нижней сферой на промежуточную подставку со специально подобранной сферической поверхностью, обеспечивающей возможность качения (сфера по сфере) при принудительном наклоне стелы. А также существенно изменить центр масс стелы путем механической доработки изнутри верхней части корпуса

и установки дополнительного груза в нижней его части. При этом в условиях действия внешних боковых нагрузок стела приобретает устойчивое положение с возможными колебаниями по принципу неваляшки, с возвратом в исходное состояние.

Приводятся результаты проектно-конструкторских работ, предварительных и поверочных расчетных исследований стелы в условиях действия собственного веса и наиболее интенсивных нормативных климатических воздействий. Выявлены зависимости влияния различных факторов на устойчивость и прочность конструкции. Определены возможные амплитуды колебаний. Исследовано состояние конструкции в процессе длительного периода эксплуатации. Определены допустимые уровни воздействия и сделан вывод об устойчивости стелы, надежности ее закрепления и безопасности при эксплуатации.

Конструкция АХК «Стела КБ-1»

АХК «Стела КБ-1» высотой 3 м представляет собой корпус мирного ядерного взрывного устройства, установленный вертикально на подставку, закрепленную в центре плоского бетонного основания площадью 9 м². Конструктивно-компоновочная схема стелы приведена на рис. 1.

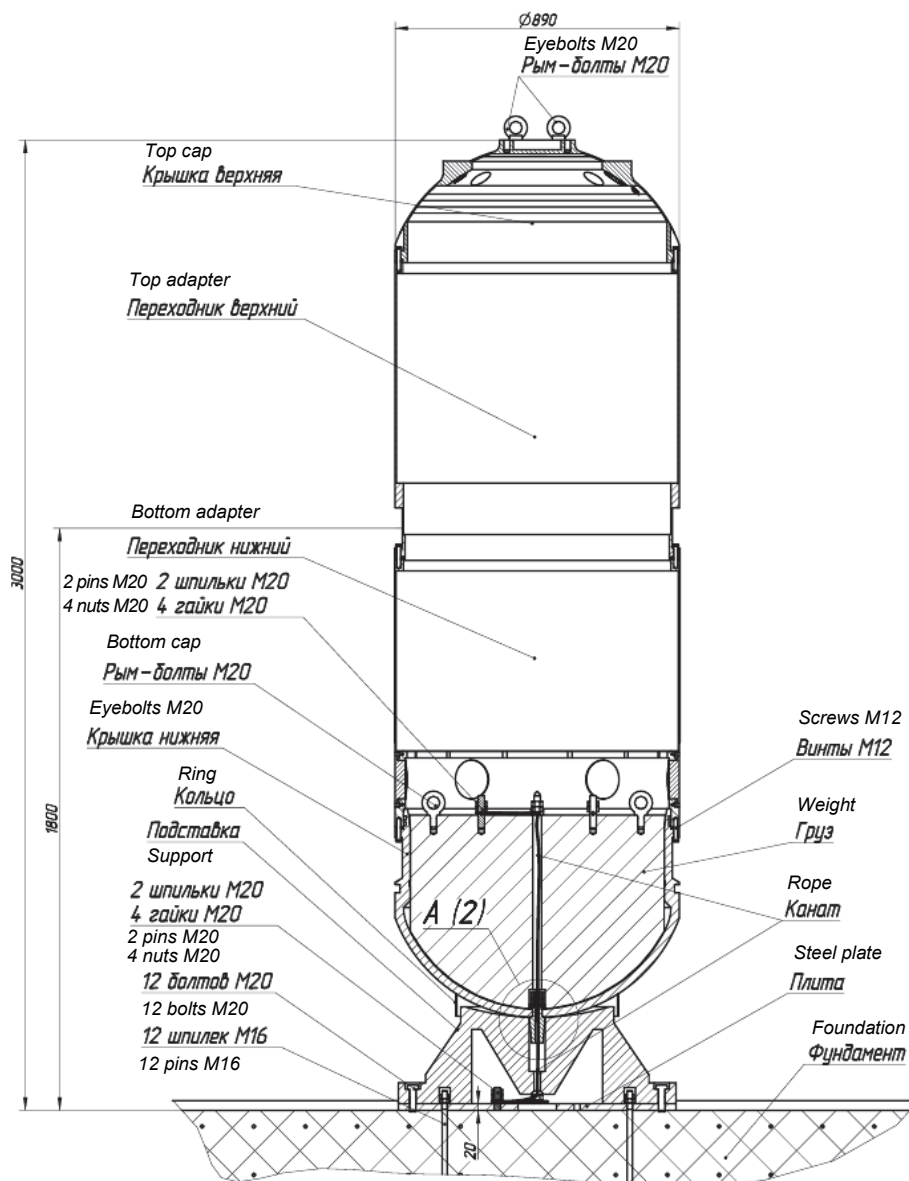


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема стелы
Figure 1. Structural scheme of the stele

Стела состоит из корпуса ЯВУ, дополнительного груза, подставки, крепежных и страховочных элементов. Корпус ЯВУ представляет собой цилиндр, закрытый полусферическими крышками, и состоит из следующих конструктивных элементов: крышки нижней, переходника нижнего, переходника верхнего и крышки верхней. Все элементы корпуса соединены друг с другом 12 болтами М12. Материал корпуса – сталь 20.

Для достижения устойчивого вертикального положения корпуса и обеспечения возможности качения при принудительном наклоне, стела установлена нижней сферой на специально подобранную сферическую поверхность в подставке, при этом осуществлено снижение ее центра масс до необходимых значений. С этой целью толщина стенок переходников и крышки верхней путем доработки уменьшена с первоначальных 20–25 до 2–3 мм, во внутреннюю полость нижней крышки установлен стальной груз массой 1900 кг.

Для точного позиционирования корпуса и с целью недопущения его проскальзывания на подставке при принудительном наклоне в полюсе нижней крышки установлена ось диаметром 49 мм с опорной конической поверхностью, ограничивающей наклон стелы до 10° . Материал оси – сталь 40Х. Ось устанавливается в отверстие диаметром 50 мм, выполненное в полюсе сферической части подставки.

Для дополнительной страховки от несанкционированного изменения положения корпуса ЯВУ относительно подставки применен стальной канат 9.6-Г-В-Ж-Н-Р-Т-1960 ГОСТ 2688–80, который протянут через отверстия в подставке и грузе, при этом один конец каната закреплен на монтажной плите бетонного основания, другой – на верхнем торце груза. Усилие разрыва каната составляет 6000 кг. Для подъема стелы и груза предусмотрено по 4 рым-болта М20.

Для демонтажа стелы необходимо выкрутить винты, скрепляющие переходник с крышкой нижней, снять верхнюю часть корпуса (в сборе с переходниками и верхней крышкой), затем выкрутить винты, стопорящие стальной канат, и демонтировать груз с нижней крышкой. Изображение окончательного монтажа стелы приведено на рис. 2.

Масса стелы (без подставки) – 2800 кг. Момент инерции стелы (без подставки) относительно поперечной оси, проходящей через нижний полюс корпуса ЯВУ, $- J = 1,08 \times 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, расстояние между центром масс и нижним полюсом корпуса ЯВУ – $b = 584 \text{ мм}$.



Рис. 2. Установка верхней части стелы на нижнюю тяжелую часть (фото А.Г. Юдова)
Figure 2. Mounting the stela top part on the heavy bottom part (photo by A.G. Yudov)

Для горизонтального выравнивания подставки в ее конструкции предусмотрены 6 регулировочных болтов М20. Для соединения подставки со стальной плитой, установленной на фундаменте, используются 6 болтов М20.

Сферический стык «корпус – подставка» закрыт кольцом («юбкой») для исключения попадания осадков и посторонних предметов, которые могут воспрепятствовать качанию стелы на подставке.

Все поверхности элементов стелы покрыты грунтовкой, а на внешнюю поверхность дополнительно нанесено высококачественное лакокрасочное покрытие, защищающее стелу от воздействий окружающей среды в течение длительного времени эксплуатации.

Требования по назначению нагрузки

В нормах и правилах¹ определены общие технические требования по назначению нагрузок при строительстве зданий и сооружений. Согласно данным требованиям, на стелу действуют:

- постоянная нагрузка от собственного веса;
- кратковременные нагрузки – воздействия при установке, обслуживании (подъеме);
- климатические факторы – ветровая, климатическая и снеговая нагрузки.

Максимальная снеговая нагрузка для Челябинской и Свердловской областей, относящихся к III снеговому району, составляет $S_g = 1500 \text{ Па}^2$. Площадь плоской части верхней крышки ($\varnothing 600 \text{ мм}$) равна $F = 0,283 \text{ м}^2$. С учетом требуемого коэффициента надежности $\gamma = 1,4$ максимальное действующее на стелу усилие от снеговой нагрузки составляет

$$P = S_g F \gamma = 1500 \times 0,283 \times 1,4 = 597 \text{ Н.}$$

Согласно климатической карте³ температурный диапазон Челябинской области составляет от -50 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$. В указанном интервале температур стальные конструкции имеют стабильные механические свойства материалов и одинаковый коэффициент температурного расширения. Поэтому влияние фактора изменения внешней температуры на состояние стелы отсутствует.

В соответствии с СП 20.13330.2016 нормативное значение основной ветровой нагрузки w следует определять как сумму средней (основной) w_m и пульсационной w_p составляющих.

Основная ветровая нагрузка w_m , которая может воздействовать на стелу, оценивается по формуле

$$w_m = w_0 k(z_b) c, \quad (1)$$

где w_0 – нормативное значение ветрового давления; $k(z_b)$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте z_b ; c – аэродинамический коэффициент.

Для Челябинской области, относящейся ко II ветровому району, $w_0 = 0,3 \text{ кПа}$. Для высоты сооружения $z < 3 \text{ м}$ и типа местности В (городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м) коэффициент $k(z_b)$ равен $0,5$.

Коэффициент c для цилиндрических конструкций зависит от угла β в плане сооружения, отсчитываемого от плоскости симметрии цилиндра (рис. 3).

Для β от 0 до 30° давление от ветра направлено к поверхности, величина c изменяется от 1 до 0 . При β от 30 до 180° коэффициент $c < 0$ (происходит «отток» от поверхности). Величина c зависит от числа Рейнольдса Re (для параметров стелы по формулам из СП 20.13330.2016 – $Re = 3,6 \times 10^4$) и изменяется от $-1,4$ ($\beta = 90^\circ$) до 0 ($\beta = 30^\circ$). При $\beta = 180^\circ$ коэффициент $c = -0,26$.

Учитывая, что боковые составляющие давления уравниваются, а на возможное опрокидывание стелы преимущественно влияют компоненты, действующие вдоль плоскости симметрии, в расчетах рассматриваются только компоненты продольного воздействия, при величине коэффициента $c = 1,26$.

Для вышеприведенных значений по формуле (1) получаем

$$w_m = 0,3 \times 0,5 \times 1,26 = 0,19 \text{ кПа.}$$

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85. М.: Стандартинформ, 2018; ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2015.

² СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85. М.: Стандартинформ, 2018.

³ СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23 01–99. М.: Стандартинформ, 2021.

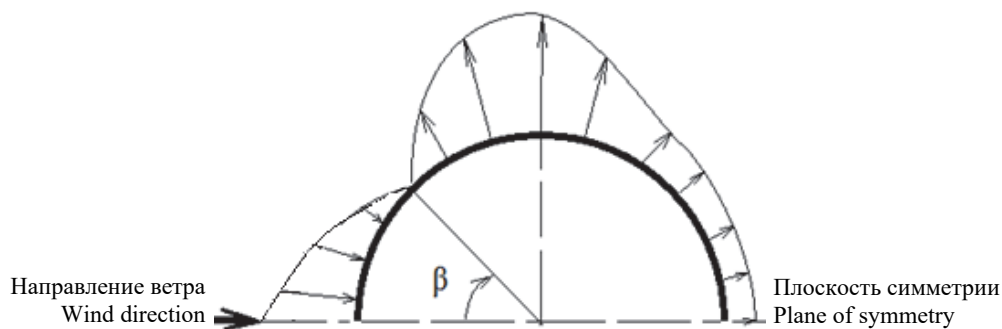


Рис. 3. Распределение аэродинамического коэффициента c по цилиндрической поверхности
Figure 3. Distribution of the aerodynamic coefficient c over the cylindrical surface

Пульсационная w_p составляющая ветровой нагрузки для сооружений, у которых первая частота собственных колебаний f больше предельного значения собственной частоты f_{lim} , вычисляется по формуле

$$w_p = w_m \zeta(z) \nu, \quad (2)$$

где $\zeta(z)$ – коэффициент пульсации давления ветра; ν – коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра.

Величина f_{lim} , вычисляется по формуле

$$f_{lim} = \frac{\sqrt{w_0 k(z) \gamma}}{940 T_{g,lim}}, \quad (3)$$

где параметр $T_{g,lim}$ для стальных конструкций равен 0,0077.

Для вышеприведенных значений по формуле (3) получаем

$$f_{lim} = \frac{\sqrt{0,3 \times 0,5 \times 1,4}}{940 \times 0,0077} = 0,06 \text{ Гц.}$$

Согласно первоначальным расчетам, первая частота собственных колебаний стелы $f = 0,87$ Гц больше величины $f_{lim} = 0,06$ Гц, тогда по формуле (2) для параметров стелы и типа местности В – $\zeta(z) = 1,22$, $\nu = 0,89$ (СП 20.13330.2016) получаем

$$w_p = 0,19 \times 1,22 \times 0,89 = 0,2 \text{ кПа.}$$

Таким образом, действующая на стелу основная ветровая нагрузка с учетом рекомендуемого (СП 20.13330.2016) коэффициента надежности $\gamma = 1,4$ равна

$$w = (w_m + w_p) \gamma = 0,55 \text{ кПа.}$$

Площадь наветренной поверхности стелы приблизительно равна 1 м^2 .

Следовательно, сила от ветрового воздействия на стелу оценивается величиной

$$P = wS = 550 \text{ Н.}$$

Для представления об уровне нагружения стелы при данном давлении выполнена оценка скорости ветра для полученного значения давления. Нормальное ветровое давление на препятствие можно определить по формуле [1]

$$P = 0,5\rho V^2, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха; V – скорость ветра.

Отсюда при $P = 550$ Па, $\rho = 1,2$ кг/м³ скорость ветра равна 30,3 м/с.

Согласно шкале Бофорта, расчетная нагрузка $V = 30,3$ м/с относится к ураганным, приводящим к опустошительным масштабным разрушениям.

Аналитическая оценка состояния стелы при действии внешней статической нагрузки

Заданные в нормах СП 20.13330.2016 требования – постоянная нагрузка от собственного веса, кратковременные нагрузки при установке и обслуживании (подъеме), а также снеговая нагрузка – являются статическими и действуют на стелу в продольном направлении.

Анализ конструкции стелы и способа ее установки показывает, что наибольшие напряжения от собственного веса реализуются в зоне контакта полюса нижней крышки и полусферической подставки. В условиях подъема и перемещения на корпус стелы действует растягивающее усилие от собственного веса.

В области контакта полюса нижней крышки и подставки реализуются сжимающие напряжения обусловленные весом стелы (2797 кг) и возможной снеговой нагрузки (60 кг).

Максимальные напряжения в зоне контакта можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{P}{F} = \frac{mg}{F}, \quad (5)$$

где m – суммарная масса стелы и снеговой нагрузки; F – площадь поперечного сечения.

Стела опирается на подставку по кольцу вокруг центрального отверстия, площадь контакта можно оценить по формуле

$$F = \pi dh, \quad (6)$$

где d – радиус отверстия; h – ширина опорной площадки.

Анализ геометрии контактной поверхности показал, что ширина опорной площадки составляет не менее $h = 5$ мм, тогда при $d = 50$ мм, $m_{\text{стела}} = 2797$ кг по формулам (5) и (6) получено

$$\sigma = \frac{2797 \times 9,81}{\pi 50 \times 5} = 34,9 \text{ МПа.}$$

С учетом снеговой нагрузки $\sigma = 35,6$ МПа.

Полученное значение напряжений существенно меньше предела текучести подставки и нижней крышки стелы (сталь 20 – $\sigma_T = 245$ МПа). Запас прочности стелы и подставки по пределу текучести равен $K_T = 7$. Следует отметить, что фактически ширина опорной площадки стелы, вероятнее всего, выше принятого значения $h = 5$ мм. Уточненное значение уровня напряжений в стеле и подставке получено в численном расчете.

Корпус стелы и груз транспортируются отдельно. Установка или снятие стелы с подставки проводится с частичной разборкой. Первоначально снимаются переходники и крышка верхняя, затем извлекается груз, далее снимается крышка нижняя. При таком порядке работ уровни нагружения конструктивных деталей стелы от собственного веса незначительны и необходимость расчета отсутствует.

В случае нерегламентированного (аварийного) варианта нагружения при снятии или установке возможен подъем стелы с грузом, а также подъем стелы с грузом с не демонтированным страховочным стальным канатом. В этом случае массивная нижняя часть стелы ($m_{\text{стела}} = 2797$ кг) и закрепленный канат дополнительно нагружают утоненные до $h_{\text{ст}} = 2$ мм цилиндрические стенки переходников и крышки верхней ($d = 890$ мм).

Для оценки уровня напряжений стенок при подъеме стелы с грузом воспользуемся формулой

$$\sigma = \frac{mg}{F} = \frac{2797 \times 9,81}{\pi 890 \times 2} = 4,9 \text{ МПа.}$$

Полученное напряжение более чем в 10 раз ниже предела текучести материала стелы стали 20 ($\sigma_T = 245$ МПа).

При установленном канате с усилием разрыва $P_k = 60\,000$ Н (6000 кг) получаем

$$\sigma = \frac{mg + P_k}{F} = 15,6 \text{ МПа.}$$

Полученное напряжение также более чем в 10 раз ниже предела текучести материала стелы, в данном случае разрыв каната произойдет существенно раньше начала пластического деформирования корпуса стелы. Таким образом, прочность конструкции стелы при установке обеспечивается.

Поверочный расчет.

Численное моделирование состояния стелы под действием внешних нагрузок

Расчеты состояния стелы при действии внешних нагрузок выполнены методом конечных элементов с помощью программы «ЛОГОС-Прочность»⁴ (рис. 4).

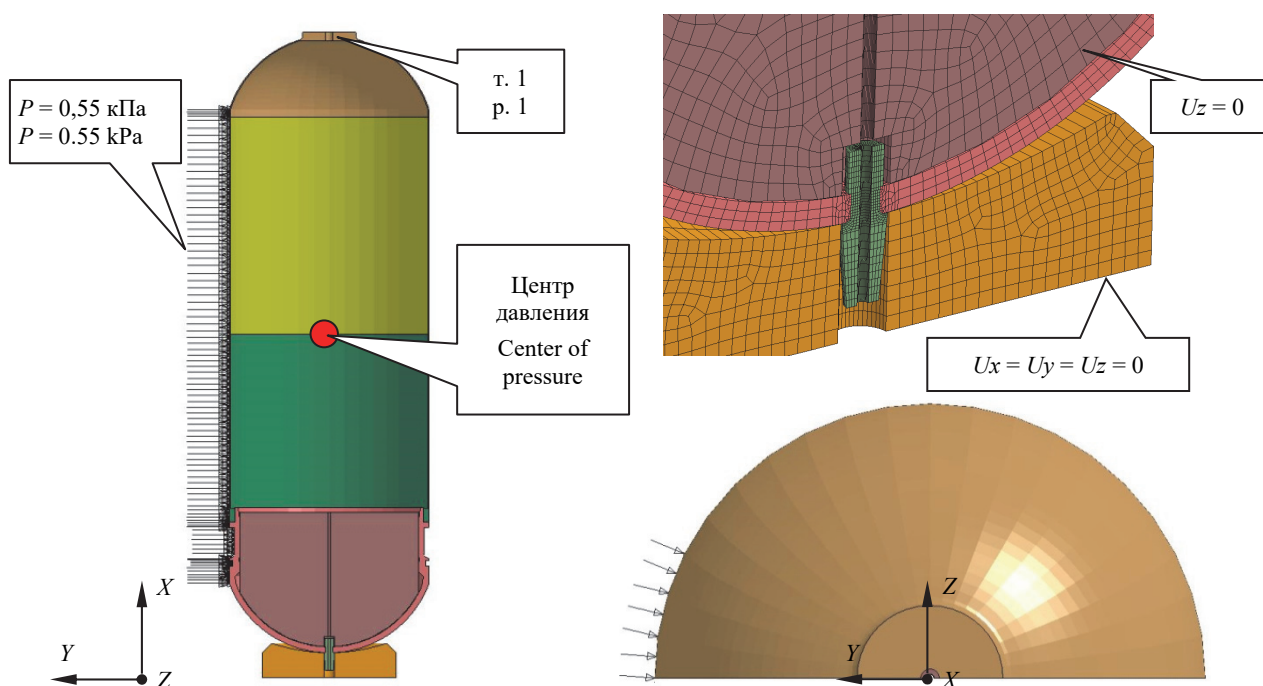


Рис. 4. Расчетная конечно-элементная модель стелы
Figure 4. The finite-element stele model

Дискретизация деталей конструкции выполнена твердотельными конечными элементами. Конечно-элементная модель содержит 31 240 элементов и 39 800 узлов. Взаимодействие деталей выполнено с помощью контактных элементов. Коэффициент трения между контактирующими деталями принят равным 0,2 (трение сталь по стали). Закрепление модели осуществляется по нижней поверхности подставки (рис. 4). Плоскость симметрии учитывается заданием ограничений по перемещениям узлов ($U_z = 0$).

Расчет проведен в квазистатической постановке нагружением конструкции линейно возрастающим давлением $P = 0,55$ кПа, действующим в поперечном направлении (вдоль оси Y). Равномерно распределенное давление задано по площадке в соответствии с рис. 4: угол $\beta = 30^\circ$, длина зоны приложения нагрузки по цилиндрической части составляет 2120 мм. Площадь приложения ветровой нагрузки около 1 м^2 . В расчете не проводился учет нелинейного (синусоидального) распределения нагрузки, показанного на рис. 3. Это приводит к завышению действующего усилия приблизительно в 1,4 раза, что идет в запас прочности и устойчивости конструкции. Дополнительно в расчете учитывается действие силы тяжести.

⁴ Лицензионное соглашение № 7551-0-96/2019 на использование пакета программ «ЛОГОС» от 23 декабря 2019 г.

На рис. 5 представлено деформированное состояние стелы при действии заданной нормируемой ветровой нагрузки $P = 0,55$ кПа (55 кг). Рисунок показывает, что стела при рассматриваемом воздействии отклоняется на величину 168,2 мм. Угол наклона составляет $\alpha = 3,7^\circ$. Ось не касается внутренней поверхности отверстия подставки, поэтому напряженное состояние конструкции определяется только реализованным пятном контакта между нижней крышкой подставкой.

Максимальные напряжения (рис. 5) в нижней крышке составляют $\sigma_{\text{экв}} = 42$ МПа, запас по пределу текучести $K_T = 5,8$. Напряжения в подставке $\sigma_{\text{экв}} = 28$ МПа, запас прочности $K_T = 8,7$. В остальных конструктивных элементах стелы напряжения не превышают $\sigma_{\text{экв}} = 5$ МПа. Все полученные значения напряжений также не превышают пределов выносливости материалов. Таким образом, подобное нагружение стелы может осуществляться практически неограниченное число (10^8) раз [2].

Для исследования состояния стелы в условиях нерегламентированных воздействий проведен расчет на повышенную нагрузку. Полученные расчетные значения удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента (табл. 2)⁵. Отличие не превышает 3 %.

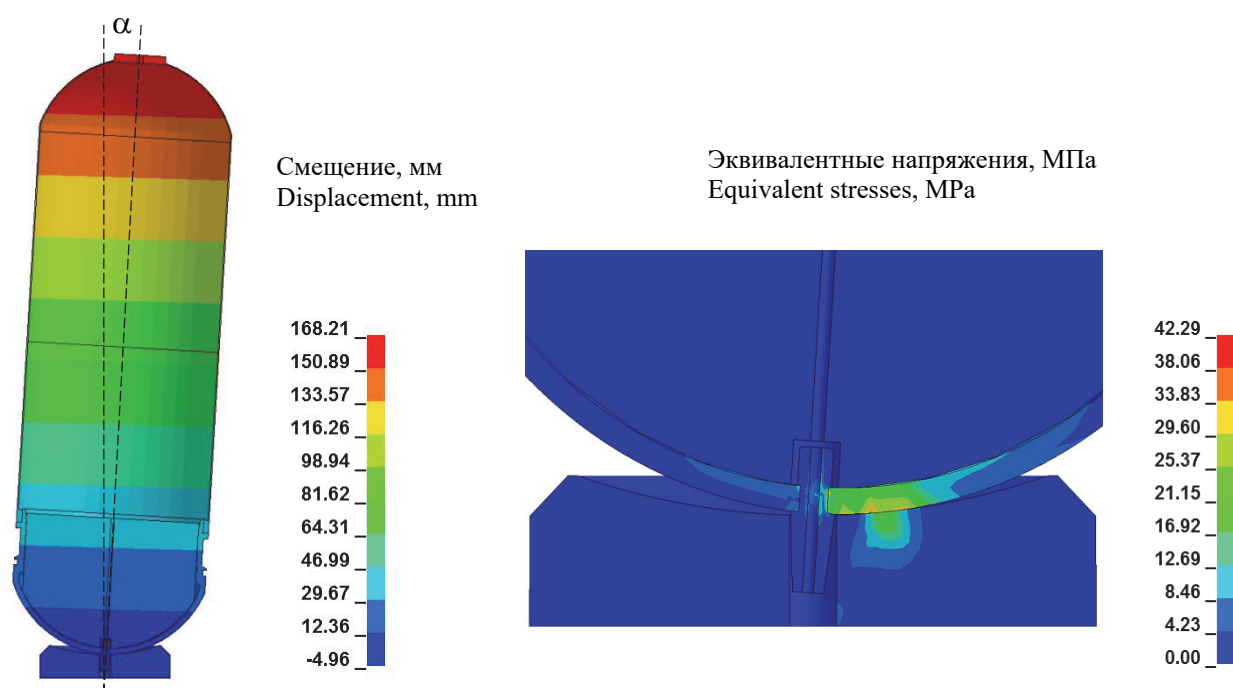


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние стелы
Figure 5. The finite-element stela model

Таблица 2

Результаты расчетов и экспериментов

| № | Усилие F , кг | Максимальное перемещение, мм | | α , ° | После снятия усилия |
|---|-----------------|------------------------------|--------------------------|--------------|---|
| | | Расчетное | Экспериментальное | | |
| 1 | 55 | 168 | 170 | 3,7 | Корпус стелы возвращается в исходное вертикальное положение |
| 2 | 110 | 254 | 260 | 5 | Корпус стелы возвращается в исходное вертикальное положение |
| 3 | 150 | 300 | Измерения не проводились | 6,1 | Корпус стелы возвращается в исходное вертикальное положение |

⁵ О проведении испытаний стелы: протокол РФЯЦ-ВНИИТФ №064-04/298 / рук. А.Г. Юдов, отв. исп. Е.В. Калатуров. Снежинск, 2020. 2 с.

Calculation and experimental results

| No | Force F , kg | Maximum displacement, mm | | α , ° | After force removal |
|----|----------------|--------------------------|--------------|--------------|---|
| | | Calculated | Experimental | | |
| 1 | 55 | 168 | 170 | 3.7 | Stele casing returns to its initial vertical position |
| 2 | 110 | 254 | 260 | 5 | Stele casing returns to its initial vertical position |
| 3 | 150 | 300 | Not measured | 6.1 | Stele casing returns to its initial vertical position |

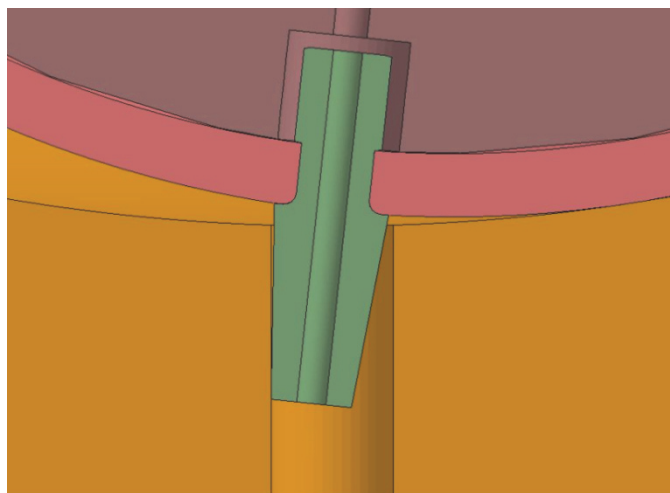


Рис. 6. Замыкание оси при действии нагрузки $P = 115$ кг
Figure 6. Pivot closure under load $P = 115$ kg

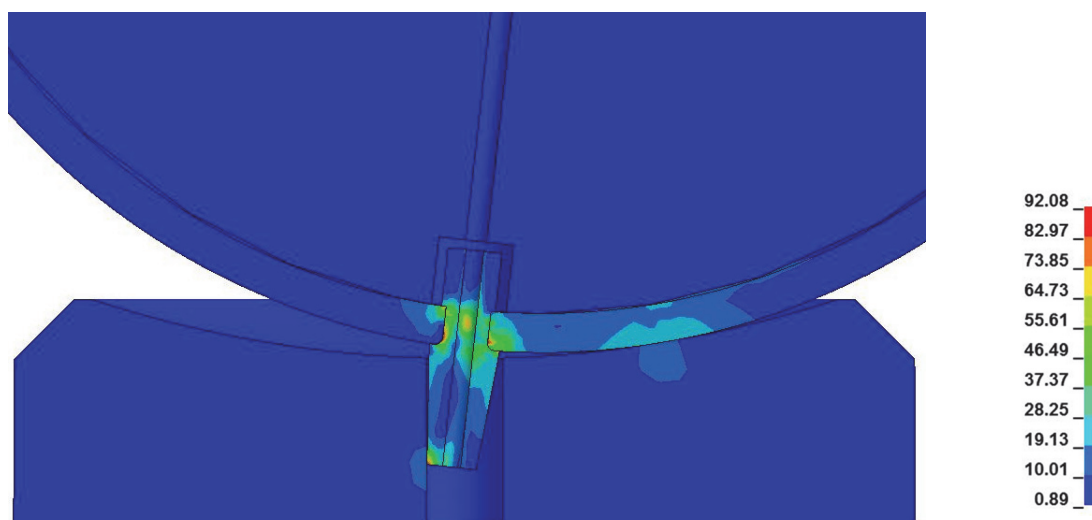


Рис. 7. Напряженное состояние конструкции при действии тройной нагрузки, МПа
Figure 7. Stress structural state under the triple load, MPa

Необходимо отметить, что при действии усилия ≈ 115 кг происходит выбор зазора между осью и внутренней поверхностью отверстия подставки (рис. 6). На рис. 7 приведено распределение эквивалентных напряжений при действии тройной нагрузки (усилие 165 кг), максимальные напряжения в нижней крышке стелы составляют $\sigma_{\text{экв}} = 87$ МПа (коэффициент запаса $K_T = 2,8$), в оси – $\sigma_{\text{экв}} = 92$ МПа ($K_T = 8,5$).

Для оценки предельного состояния проведены расчеты на увеличенную нагрузку. На рис. 8 приведен график изменения перемещений т. 1 в зависимости от внешней нагрузки. Анализ рис. 13 показывает, что до нагрузки ≈ 115 кг стела свободно перемещается (сфера по сфере), от 115 до 820 кг повороту стелы

мешает ось (ось взаимодействует с подставкой), при действии нагрузки более 820 кг ось перестает контактировать с подставкой и происходит опрокидывание стелы. Запас по опрокидыванию равен $K_{уст} \approx 15$. Смещение верхней точки т. 1 стелы при этом составляет около 500 мм, угол наклона $\alpha = 10^\circ$. В момент опрокидывания происходит выбор свободного хода стального каната и далее конструкция удерживается за счет его прочности (запас прочности каната по отношению к весу всей стелы составляет $K_b = 2,1$).

Таким образом, результаты расчетов и экспериментов показали, что разработанная конструкция удовлетворяет предъявляемым требованиям. При действии нормативной предельной ветровой нагрузки, возможной на территории Челябинской области ($P = 0,55$ кПа, $V = 30,3$ м/с), прочность и устойчивость стелы сохраняется, что подтверждается результатами эксперимента. Дополнительные исследования показали, что устойчивость конструкции сохраняется при превышении внешнего ветрового воздействия в 15 раз.

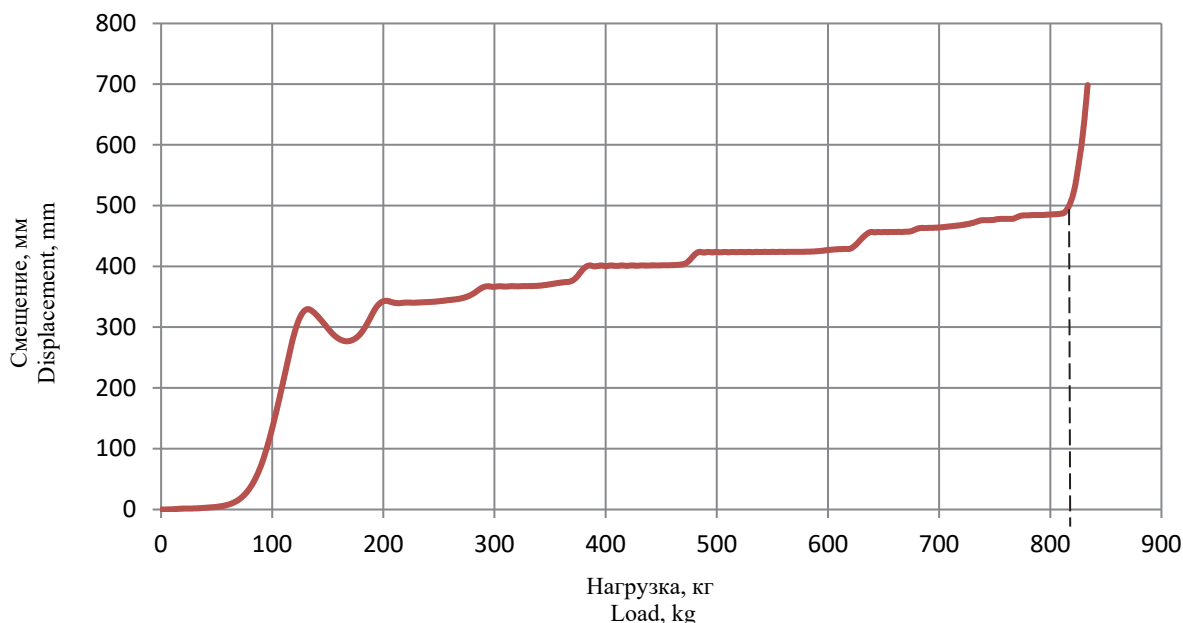


Рис. 8. График перемещений т. 1 стелы от внешней нагрузки
Figure 8. Displacements of the upper stele point under external load

В соответствии с СП 131.13330.2012 расчеты на ветровую нагрузку сооружений проводятся по аналитическим методикам с учетом постоянной и пульсационной составляющей. В качестве нагрузки задается статическое давление, а в определенных случаях (в зависимости от собственной частоты колебаний) в расчетную нагрузку может закладываться коэффициент динамичности, который учитывается при статическом расчете. В предельном случае этот коэффициент составляет $K_{дин} = 3$. Также следует отметить, что подход, изложенный в СНИПах, применяется для неподвижных сооружений. В действительности ветровая нагрузка может быть импульсной, и тогда для получения точной картины состояния «качающейся» стелы требуется проведение динамического исследования.

Применяемый метод конечных элементов позволяет учитывать динамический характер приложения нагрузки. В качестве исходной ветровой нагрузки принят импульс с временем нарастания нагрузки, равным 1 с, выдержкой на заданном значении в течение 1 с и последующим резким спадом. В качестве амплитудного значения задано максимальное статическое давление $P = 0,55$ кПа (55 кг). Необходимо отметить, что подобный импульс по длительности и своему уровню может быть создан человеком при приложении мускульной силы. В расчетах учитывалось усилие от собственного веса стелы.

На рис. 9 приведена полученная расчетная зависимость смещения верхней точки стелы (т. 1) от времени. Максимальное смещение верхней части стелы при приложении принятой импульсной нагрузки составляет 140 мм. Период колебаний $\approx 2,5$ с, частота колебаний $f \approx 0,4$ Гц.

Анализ распределения напряжений (рис. 10) показывает, что при движении нижней поверхности стелы по подставке происходит перераспределение напряжений в зависимости от положения пятна контакта между деталями. Максимальные напряжения $\sigma_{экр} = 136$ МПа реализуются в нижней крышке в мо-

мент начала движения стелы и замыкания по кромке подставки. Полученный уровень напряжения не превышает предела текучести ($\sigma_T = 245$ МПа) и усталости ($\sigma_{-1} = 164$ МПа) материала нижней крышки.

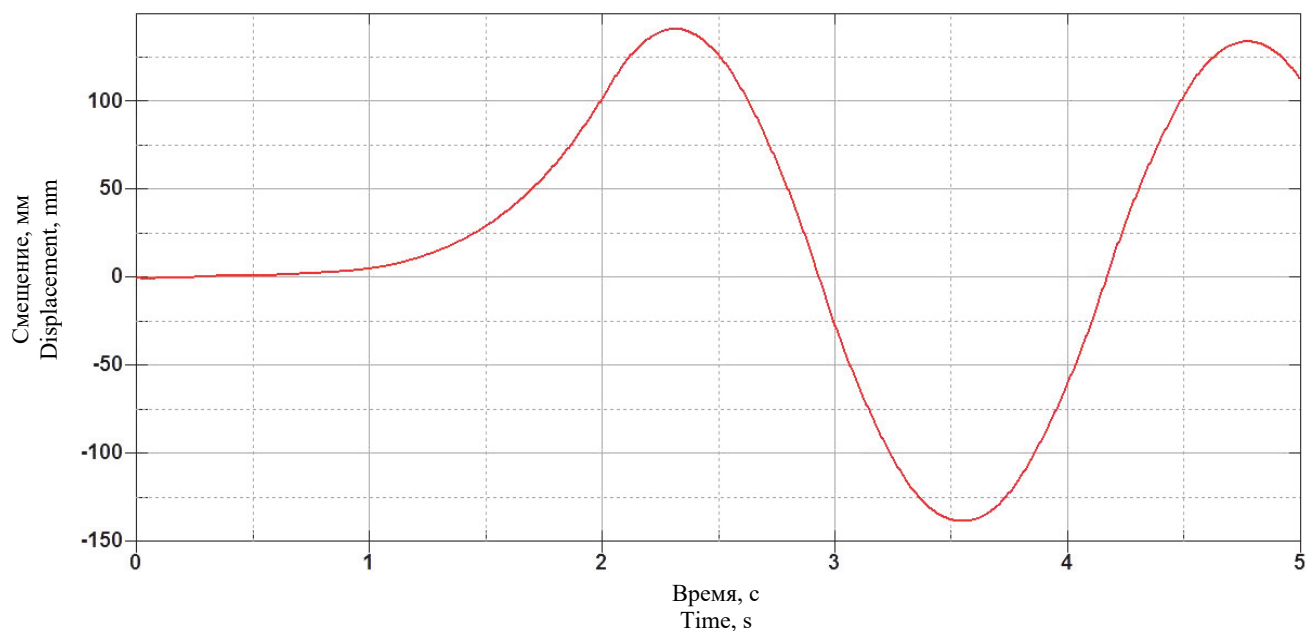


Рис. 9. График изменения смещения т. 1
Figure 9. Diagram of the upper stele point displacement

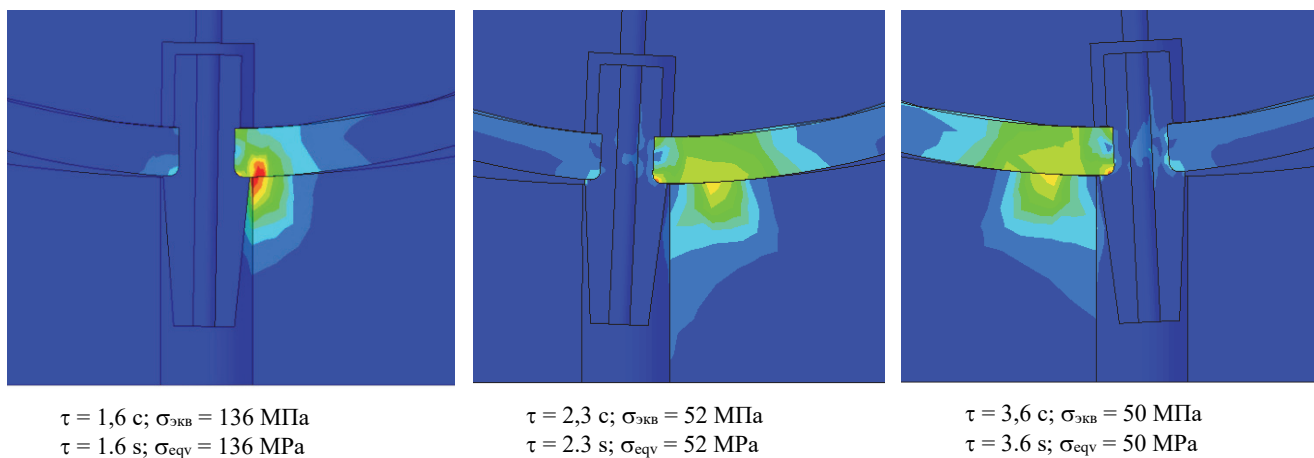


Рис. 10. Напряженное состояние нижней части стелы в области контакта с поставкой в процессе нагружения
Figure 10. Stress state of the bottom stele part in the contact area under loading

Для оценки состояния стелы при повышенном импульсном нагружении выполнялись расчеты на действие нагрузки, увеличенной по амплитуде до 7 раз. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния сведены в табл. 3.

Результаты расчетов показывают, что стела сохраняет свою устойчивость при нагрузке, в 7 раз превышающей заданное исходное значение. Максимальное смещение верхней точки стелы (т. 1) составляет 500 мм, что соответствует углу наклона $\alpha = 10^\circ$. Максимальные пластические деформации оси $\varepsilon = 5,4$ % реализуются в зоне контакта оси и внутренней поверхности отверстия в подставке. Полученное значение не превышает предельного значения $\delta = 10$ % и приведет к местному смятию материала. Пластические деформации в нижней крышке $\varepsilon = 5$ % возникают в зоне сопряжения с осью и не превышают предельного значения ($\delta = 25$ %). Прочность стелы сохраняется.

Таблица 3

Результаты расчетов нагружения конструкции импульсной нагрузкой

| Расчетный случай | Внешнее усилие, кг | Сила ветра, м/с | Смещение т. 1, мм | НДС оси | НДС стелы (нижняя крышка) |
|----------------------|--------------------|-----------------|-------------------|---------|---------------------------|
| 0,55 кПа | 55 | 30,3 | 140 | 40 МПа | 136 МПа |
| 1,1 кПа ($K = 2$) | 110 | 42 | 343 | 320 МПа | 150 МПа |
| 1,65 кПа ($K = 3$) | 165 | 52,4 | 410 | 600 МПа | 0,8 % |
| 2,75 кПа ($K = 5$) | 275 | 67 | 470 | 750 МПа | 4 % |
| 3,85 кПа ($K = 7$) | 385 | 80 | 500 | 5,4 % | 5 % |

Table 2

Calculation results of structure pulsed loading

| Design case | External force, kg | Wind force, m/s | Displacement p. 1, mm | SSS of pivot | SSS of stele (bottom cap) |
|----------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|--------------|---------------------------|
| 0.55 kPa | 55 | 30.3 | 140 | 40 MPa | 136 MPa |
| 1.1 kPa ($K = 2$) | 110 | 42 | 343 | 320 MPa | 150 MPa |
| 1.65 kPa ($K = 3$) | 165 | 52.4 | 410 | 600 MPa | 0.8% |
| 2.75 kPa ($K = 5$) | 275 | 67 | 470 | 750 MPa | 4% |
| 3.85 kPa ($K = 7$) | 385 | 80 | 500 | 5.4% | 5% |

Дополнительные проектировочные расчетные исследования

Приведенные далее исследования проводились на этапе предварительного (проектировочного) расчетного обоснования стелы. С помощью данных расчетов выявлены зависимости влияния различных факторов на устойчивость и прочность конструкции. Ниже приведены основные направления исследований:

- оценка влияния радиуса сферической поверхности подставки;
- определение запаса по непроскальзыванию и влияние коэффициента трения;
- определение влияния постороннего предмета между стелой и подставкой;
- оценка влияния наклона подставки;
- оценка действия коррозии.

Оценка влияния радиуса сферической поверхности подставки

Для нахождения в состоянии устойчивого равновесия стела установлена на подставку со сферической поверхностью. Для оценки смещения и угла наклона исследовались следующие радиусы: $r_{сф} = 600, 700, 800$ и 1000 мм. В качестве нагрузки задано действие на стелу собственного веса и ветровой импульсной нагрузки. Принятый в расчете коэффициент трения равен $0,2$. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Анализ результатов расчетов показывает, что смещения стелы при радиусе $r_{сф} = 600$ мм практически незаметны. Эффект «качания» стелы реализуется при радиусе подставки от 700 мм. При радиусе подставки более 1000 мм амплитуды колебаний достигают 200 мм, что может привести к снижению уровня безопасности конструкции. По результатам анализа полученных результатов в качестве основного варианта принят радиус $r_{сф} = 800$ мм.

Таблица 4

Расчетная оценка влияния радиуса сферической части подставки

| Радиус сферы, мм | Смещение т. 1, мм | Угол, ° | Частота колебаний, Гц |
|------------------|-------------------|---------|-----------------------|
| 600 | 16,5 | 0,35 | 2,2 |
| 700 | 80 | 1,7 | 0,55 |
| 800 | 108 | 2,4 | 0,42 |
| 1000 | 173 | 3,8 | 0,3 |

Table 4

Estimates of the effect of spherical support radius

| Sphere radius, mm | Displacement of p. 1, mm | Angle, ° | Rocking frequency, Hz |
|-------------------|--------------------------|----------|-----------------------|
| 600 | 16.5 | 0.35 | 2.2 |
| 700 | 80 | 1.7 | 0.55 |
| 800 | 108 | 2.4 | 0.42 |
| 1000 | 173 | 3.8 | 0.3 |

Определение влияния коэффициента трения

Стела установлена на открытой местности и эксплуатируется в условиях различных внешних природных воздействий. В результате этого возможно изменение коэффициента трения между нижней крышкой и подставкой. Снижение коэффициента трения может привести к проявлению эффекта проскальзывания в данной контактной паре при меньших внешних нагрузках. Для исследования влияния трения проведены расчеты со следующими значениями:

$f = 0,05$ – сталь по стали (трение скольжения со смазкой);

$f = 0,2$ – сталь по стали (без смазки);

$f = 0,5$ – сталь по дереву (для случая засорения контактной поверхности).

Первоначально выполнены расчеты на действие ветровой импульсной нагрузки ($P = 0,55$ кПа) и собственного веса. Анализ результатов показал, что снижение коэффициента трения не оказывает существенного влияния на характер и уровень перемещения стелы.

Далее проводилось исследование влияния коэффициента трения при повышенных нагрузках. В качестве внешнего воздействия задано постоянно возрастающее статическое давление от 0,55 кПа до момента резкого возрастания угла поворота стелы. Результаты расчетов показывают, что при коэффициенте трения $f = 0,05$ проскальзывание стелы относительно подставки происходит при давлении, в 1,8 раза превышающем заданную величину $P = 0,55$ кПа. При коэффициенте $f = 0,2$ проскальзывание реализуется при нагрузке, увеличенной в 5,5 раз. В случае с $f = 0,5$ проскальзывание не реализуется, а при семикратной нагрузке происходит опрокидывание стелы.

Влияние постороннего предмета между стелой и подставкой

Вышеприведенные исследования показали, что конструкция (радиус опоры) и состояние контактной зоны между стелой и подставкой оказывают влияние на амплитуду колебаний и динамику конструкции. Численно рассмотрен случай появления постороннего предмета в зоне контакта: камень, ветка, стальной болт или гайка. В качестве расчетного варианта принята упругая стальная шайба диаметром 20 мм и высотой 5 мм (рис. 11). Расчет выполнен на действие собственного веса и ветровой импульсной нагрузки.

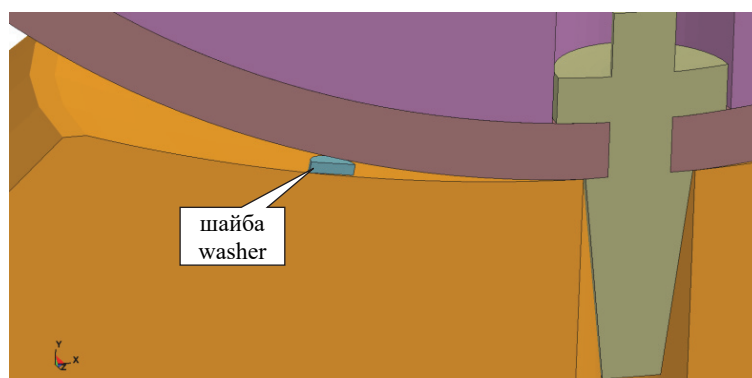


Рис. 11. Расчетная схема
Figure 11. Design scheme

Расчет показал, что из-за взаимодействия стелы с шайбой смещения т. 1 снижаются с 130 до 75 мм. Уровень напряжений в шайбе значительно выше реализованного в корпусы стелы и в подставке, где действующие напряжения не превышают пределов текучести материалов. Прочность нижней крышки и подставки сохраняется.

Для исключения возможности попадания посторонних предметов между нижней крышкой корпуса стелы и подставкой в итоговый вариант конструкции введена защитная «юбка» – кольцо (рис. 2).

Оценка влияния наклона подставки

Стела установлена на железобетонную плиту размером 3×3 м, выполненную с двумя рядами арматурной сетки Ø12 мм в виде решетки с шагом 150 мм, 7 вертикально установленными стальными трубами Ø40×2500 мм и тремя центральными трубами Ø110×2500 мм. Данная плита соответствует требованиям строительных норм и правил и является надежной опорной поверхностью для стелы.

Предположено, что в случае колебаний температур и влажности возможно смещение грунта и появление наклона подставки. Реализация этого случая маловероятна, но для оценки его последствий выполнен расчет устойчивости стелы. В расчетной схеме допущено появление наклона железобетонной плиты на 1° , что эквивалентно подъему одного края подставки на 10 мм.

Результаты расчета показали, что наклон опоры оказывает влияние на уровень смещений стелы. Происходит возрастание перемещений с 130 до 340 мм, при этом реализованные перемещения не приводят к потере устойчивости стелы.

Для полного исключения возникновения подобного случая в конструкцию подставки введена система регулировочных винтов, которая позволяет проводить выравнивание подставки по горизонтальной плоскости.

Оценка действия коррозии

Корпус стелы выполнен из стали 20, которая при нахождении на открытой местности подвержена коррозии. Согласно [3], в условиях влажного воздуха с загрязнениями (например, хлор) глубинный показатель коррозии для углеродистой стали может достигать 0,1 мм/год. Для хромистой стали 40Х, из которой выполнена ось, данный показатель составляет 0,075 мм/год. Таким образом, за 10 лет толщина нижней крышки стелы может снизиться с 26 до 25 мм. Толщина оси с 49 до 48,25 мм. Данные показатели практически не выходят за пределы допусков изготовления.

Анализ расчетных результатов НДС (рис. 6, 8, 11) показывает, что подобное снижение толщины не оказывает влияния на прочность конструкции. Реализованные в расчетах напряжения, деформации нижней крышки и оси являются поверхностными и не распространяются на всю толщину деталей.

Следует также отметить, что приведенные уровни коррозионного уменьшения толщины являются предельными и не учитывают покрытие стелы специальной грунтовкой и краской по автомобильной технологии.

Можно сделать вывод, что влияние коррозии на прочность стелы является незначительным. При проведении периодических регламентных работ в соответствии с конструкторской документацией будет выполняться осмотр конструктивных элементов стелы и измерение их толщины в случае появления очагов коррозии.

Заключение

Рассмотрена конструкция АХК «Стела КБ-1». Приведены основные технические решения, направленные на сохранение устойчивости и прочности стелы в условиях внешних нагрузок.

По результатам поверочных расчетов и экспериментов определено следующее:

- в условиях действия внешних боковых нагрузок стела имеет устойчивое положение, при отклонении стелы реализуются колебания по типу неваляшки с возвратом в исходное состояние;
- коэффициент запаса по устойчивости к предельной ветровой нагрузке равен $K = 15$;
- при действии импульсной нагрузки максимальное отклонение верхней части стелы может достигать 140 мм, коэффициент запаса устойчивости по амплитуде импульсной нагрузки составляет не менее 7;
- возникающие при действии предельной ветровой нагрузки колебания стелы допустимы неограниченное число раз.

На основании выполненных исследований показано, что в условиях наиболее интенсивных климатических воздействий разработанная конструкция обеспечивает надежность и безопасность эксплуатации в соответствии с требованиями действующих строительных норм и правил.

Список литературы

1. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Стройиздат, 1972. 100 с.
2. Трошенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник: в 2 ч. Ч. 1. Киев: Наукова думка, 1987. 347 с.
3. Дятлова В.Н. Коррозионная стойкость металлов и сплавов: справочник. М.: Машиностроение, 1964. 349 с.

References

1. Savitsky G.A. *Wind load on constructions*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1972. (In Russ.)
2. Troshenko V.Y., Sosnovsky L.A. *Fatigue resistance of metals and alloys: reference book* (part 1). Kiev: Naukova Dumka Publ.; 1987. (In Russ.)
3. Dyatlova V.N. *Corrosion resistance of metals and alloys: reference book*. Moscow: Mashinostroeniye Publ.; 1964. (In Russ.)