

## Расчет тонких упругих оболочек

УДК 69.001.12/.18:72:624.074.4

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-3-226-232

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КУПОЛЬНО-КОНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЦИРКА

В.Р. МУСТАКИМОВ<sup>1</sup>, С.Н. ЯКУПОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
ул. Зеленая, д. 1, Казань, Россия, 420043<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН»  
ул. Лобачевского, д. 2/31, Казань, Россия, 420111

(поступила в редакцию: 26 октября 2017 г.; принята к публикации: 26 апреля 2018 г.)

В статье представлены некоторые результаты комплексного историко-архивного, производственно-технологического и расчетно-теоретического исследования купольно-конической конструкции здания Казанского цирка. Приводится оценка состояния конструкций по истечении 50 лет непрерывной и безаварийной эксплуатации. Проведено пространственное моделирование и осуществлены поверочные численные расчеты с использованием объемных конечных элементов (МКЭ) на базе программного комплекса «MicroFe». При этом учтены: история эксплуатации конструкции, включая данные инженерных и численных расчетов (1976 г.); особенности конструирования и технология возведения; результаты натурных испытаний и физический износ конструкций. На первом этапе произведен расчет пространственной модели верхней купольной конструкции, позволивший оценить и установить напряженно-деформированное состояние (НДС) каркаса из лепестков-ребер как оставляемой оснастки купольно-ребристого покрытия. На втором этапе приняты расчетные пространственные схемы с учетом совместной работы основания и надземных конструкций. В расчете учтены вертикальные и горизонтальные нагрузки от всех региональных природно-климатических воздействий, а также технологические нагрузки при цирковых представлениях. На основании результатов комплексных расчетно-теоретических исследований НДС купольно-конической конструкции здания Казанского цирка, обладающего статусом уникального объекта, разработаны мероприятия по устранению дефектов.

**Ключевые слова:** купольно-конические конструкции, опорное кольцо, лепестковый элемент, радиально-кольцевое армирование

### INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAINED STATE OF DOME-CONICAL STRUCTURES OF THE KAZAN STATE CIRCUS

V.R. MUSTAKIMOV<sup>1</sup>, S.N. YAKUPOV<sup>2</sup><sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering  
1 Zelenaya St., Kazan, 420043, Russia<sup>2</sup>Institute of Mechanics and Engineering, Kazan Science Center, Russian Academy of Sciences  
2/31 Lobachevsky St., Kazan, 420111, Russia

(received: October 26, 2017; accepted: April 26, 2018)

Some results of the complex historical-archival, production-technological and computational-theoretical study of the dome-conical structure of the Kazan circus are presented. The state of structures after 50 years of continuous and trouble-free operation is evaluated. Spatial modelling was carried out and numerical verification was carried out using volumetric

finite elements (FEM) based on the software package “MicroFe”. This takes into account: the history of operation of the structure, including the data of engineering and numerical calculations (1976); the features of construction and technology of construction; the results of field tests and physical depreciation of structures. At the first stage, the spatial model of the upper dome structure was calculated, which allowed to estimate and establish the stress-strain state of the frame made of petals-ribs as the left snap of the dome-ribbed coating. In the second stage adopted the estimated spatial scheme with the collaboration of the foundation and superstructure. The calculation takes into account vertical and horizontal loads from all regional climatic influences, as well as technological loads at circus performances. On the basis of complex computational and theoretical studies of stress-strain state dome-conical structure of the building of the Kazan circus, which has the status of a unique object, made conclusions and developed measures to eliminate defects.

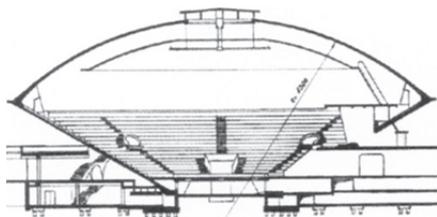
**Keywords:** dome-conical constructions, support ring, petal element, radial-ring reinforcement

### Историко-архивные данные

Пятьдесят лет тому назад (7 ноября 1967 г.) в Казани был возведен уникальный по архитектурной форме и конструктивным решениям объект – здание государственного цирка на 2000 мест в виде «летающей тарелки» (рис. 1).



а



б

**Рис. 1. Общий вид (а) и разрез (б) здания Казанского государственного цирка**  
[Fig. 1. General view (a) and section (b) of the building of the Kazan state circus]

Объемно-пространственная структура объекта была сформирована специалистами проектного института «Татаргражданпроект» (ныне ГУП «Татинвестгражданпроект») за счет сочленения двух пространственных тел вращения – усеченного конуса в нижней части и пологого сферического купола в верхней части здания, которые объединены между собой предварительно напряженным распорным кольцом диаметром 62 м.

Идея строительства здания цирка в Казани возникла после того, как в 1961 г. сгорел старый цирк, возведенный из деревянных конструкций [1]. Место для размещения здания нового цирка выбрано в историческом центре города, в прибрежной зоне

реки Казанки, имеющей особые инженерно-геологические и гидрогеологические условия [2].

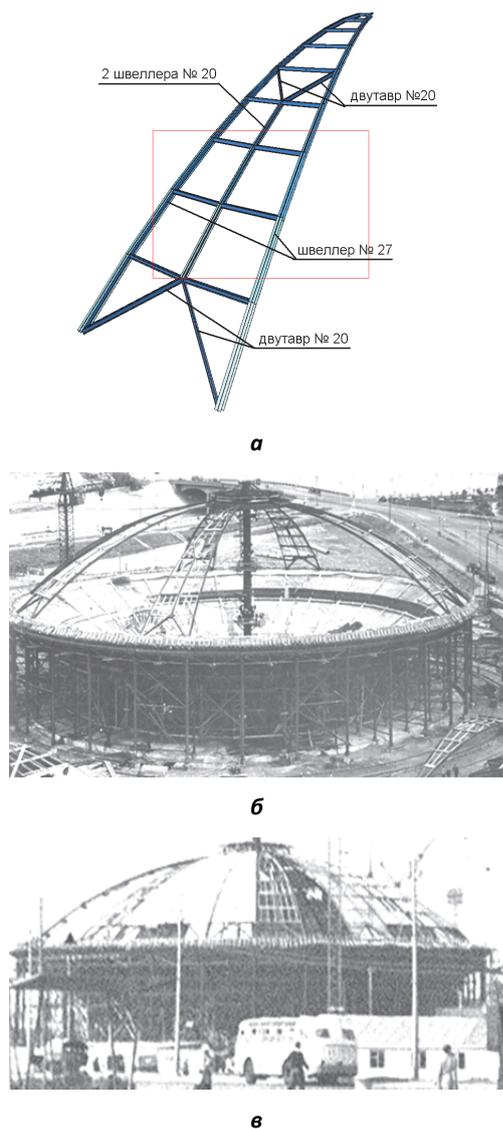
### Особенности сооружения и технологии возведения

Проектирование купольно-конической конструктивной системы здания цирка в семидесятых годах XX века для отечественных инженеров было непростой задачей.

Здание возведено на насыпных грунтах, подстилаемых водонасыщенными песками, с расчетным сопротивлением  $R = 250$  кПа. Уровень подземных вод колеблется в диапазоне  $WL = 3,50–4,20$  м (50,64–50,98 м БС). В связи с этим был предусмотрен комплекс инженерных мероприятий для подземной части здания, включая: кольцевой свайный фундамент из свай  $Cy-8-300$  и  $Cy-10-300$ , забитых с шагом  $l = 3d$  м ( $d$  – диаметр свай) с отметки дна котлована (52,0 м БС); систему горизонтального самотечного дренажа; оклеечную вертикальную и горизонтальную гидроизоляцию конструкций подвальных помещений. Достоверность выполненных при строительстве конструктивных, гидроизоляционных и водопонизительных работ, а также их техническое состояние, были установлены при проведении авторами комплексного инженерного обследования.

Главными несущими элементами надземной части цирка являются: снизу – чаша амфитеатра с местами для зрителей, выполненная в форме усеченного конуса с меньшим основанием, обращенным вниз; сверху – пологий сферический купол, имеющий верхнее и нижнее опорные кольца. Нижняя, коническая часть здания, воспринимает постоянную и временную нагрузку, передавая ее через пилоны на плиту кольцевого ленточного ростверка и отдельно стоящие ростверки свайного фундамента. Верхняя часть цирка решена в виде тонкостенного купола из монолитного железобетона, который опирается на решетчатую конструкцию с регулярным расположением радиаль-

ных и кольцевых элементов из прокатных профилей. Радиально-кольцевое армирование железобетонного купола и лепестки-ребра из стальных спаренных швеллеров № 27, № 20 и двутавров № 20 объединены в единую пространственную решетчатую конструкцию (рис. 2, а). Жесткость конструкции каждого лепестка-ребра обеспечена за счет крестовых связей из стальных прокатных двутавров № 20, связующим центральным элементом из спаренных швеллеров № 20 замкнутого поперечного сечения и обрешетки.



**Рис. 2. Возведение купольно-конических конструкций здания Казанского цирка (июнь 1966 г.):**

*а* – конструкция опорного лепестка-ребра, изготовленного из стальных прокатных профилей; *б* – монтаж лепестков-ребер с центральной опорой и опорными кольцами;

*в* – монтаж оснастки для железобетонного купола

**[Fig. 2. Erection of dome-conical structures of the building of the Kazan Circus (June 1966):**

*a* – the construction of a supporting lobe-rib made of steel rolling profiles; *б* – assembly of petal-ribs with central support and support rings;

*в* – installation of equipment for reinforced concrete dome]

Технологической особенностью при возведении железобетонной скорлупы купола являлось то, что армирование и укладка бетона осуществлены на оснастку без установки инвентарных стоек. Была использована технологическая система «оставляемой опорно-пролетной оснастки с временной центральной опорой» из сочлененной стальной трубы (рис. 2, б).

Лепестки-ребра установлены вплотную друг к другу по всему периметру, последовательно сочленены на электросварке с образованием замкнутых поперечных сечений из спаренных швеллеров № 27.

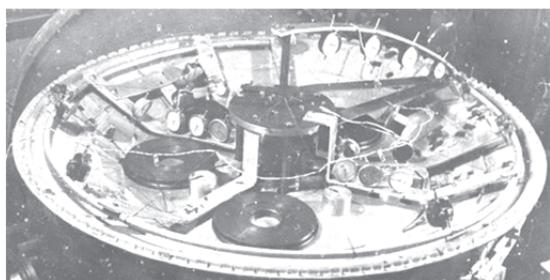
К решетчатой опорной оставляемой оснастке подвешен съемный деревянный настил опалубки (рис. 2, б, в). Стержни кольцевой арматуры железобетонного купола приварены электросваркой к верхнему поясу лепестков-ребер.

В области сопряжения нижней – конической и верхней – купольной частей купольно-конического здания выполнено предварительно напряженное железобетонное кольцо  $d_{н.к} = 62$  м, воспринимающее основные растягивающие усилия от горизонтальных распорных нагрузок купола. Натяжение арматуры производилось на бетон электротермическим методом. В результате предварительного обжатия по наружному периметру железобетонного распорного кольца длиной окружности  $L_{н.к} = 194,7$  м произошло уменьшение общей длины до  $L_{н.к} = 194,4$  м. При этом в конструктивной системе купольно-конической конструкции сформировались сжимающие напряжения вместо напряжений растяжения, вызывающие образование трещин в бетоне, то есть получен эффект предварительного напряжения. Было зафиксировано, что обжатие распорного кольца привело к естественному процессу отслоения оснастки купольной конструкции с образованием зазора до 50 мм между поверхностью железобетона и опалубки.

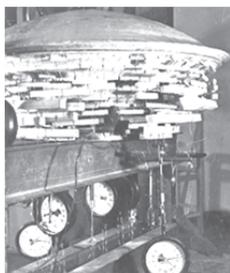
Через шесть лет после ввода в эксплуатацию зданию цирка присвоен статус памятника архитектуры регионального значения [3].

### Об испытаниях и обследовании сооружения

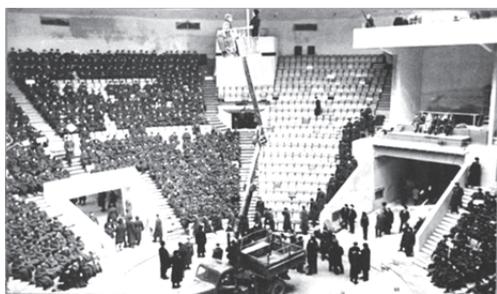
Учитывая уровень ответственности и уникальность конструктивной системы здания, кроме расчетов было выполнено масштабное моделирование купольно-конического здания с использованием метода подобия. Предварительно в КНИИСиП произвели модельные, а перед сдачей в эксплуатацию – натурные испытания несущих конструкций здания цирка (рис. 3).



а



б



в



г

**Рис. 3. Испытание здания цирка на статические нагрузки:**

а, б – масштабные модели; в, г – натурные испытания  
**[Fig. 3. Circus building static load test:**  
 а, б – scale models; в, г – full-scale tests]

В 2009 и повторно в 2017 гг. авторами статьи проведено инженерное обследование несущих и ограждающих конструкций здания.

Установлено, что при проектной марке бетона М300 освидетельствованная по состоянию на 27.10.2009 г. марка составляет М318...М378, то есть на 6–13% превышает проектную марку. Освидетельствование прочности осуществлено методами неразрушающего контроля (рис. 4, а, б).

Вскрытием установлено, что фибролит толщиной 180 мм уложен по слою пароизоляции (рис. 4, в). Проведены испытания крепежного анкера на выдергивание (рис. 4, г).



а



б



в



г

**Рис. 4. Инструментальные исследования конструкции купола цирка:**

а – при помощи измерителя прочности ИПС-МГ4.03;  
 б – прибором Шмидта; в – исследование кровли из вскрытого шурфа; г – испытание анкера  
**[Fig. 4. Instrumental investigations of the design of the circus dome:**  
 а – with the aid of measuring the strength IPS-MG4.03;  
 б – device of Schmidt; в – investigation of a roof from the opened hole; г – anchor test]

### Поверочные расчеты

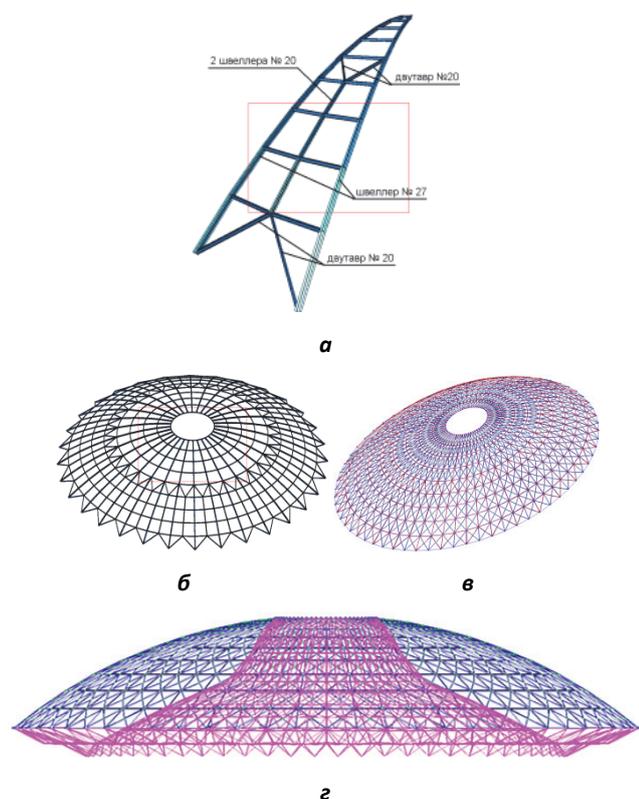
Расчет несущих конструкций производился инженерными, а также численными методами на базе ЭВМ. Было оценено состояние конструкции по истечении 50 лет непрерывной и безаварийной эксплуатации. Проведено пространственное моделирование и осуществлены поверочные численные расчеты с использованием объемных конечных элементов (МКЭ) на базе программного комплекса «MicroFe». При этом учтены: история эксплуатации конструкции, включая данные инженерных и численных расчетов (1976 г.); особенности конструирования и технология возведения; результаты натурных испытаний и физический износ конструкций.

*Первый этап.* Произведен расчет пространственной модели верхней купольной конструкции, позволивший оценить и установить напряженно-деформированное состояние (НДС) каркаса из

лепестков-ребер как оставляемой оснастки купольно-ребристого покрытия (рис. 5).

По результатам поверочных расчетов можно констатировать следующее.

1. Максимальный расчетный прогиб железобетонного монолитного купола толщиной 60 мм (марка бетона М300 – В25) с опорными лепестками-ребрами из стальных прокатных профилей составил 3,618 мм – для стальных ребер и 3,980 мм – для железобетонной части купола. Следовательно, расчетные значения прогибов от внешней нагрузки не превышают величины выгиба 50 мм конструктивной системы ребристого купола, образовавшегося после предварительного натяжения на бетон стальной арматуры нижнего опорного пояса, соединяющего купольный и конический элементы купольно-конической конструкции здания цирка.



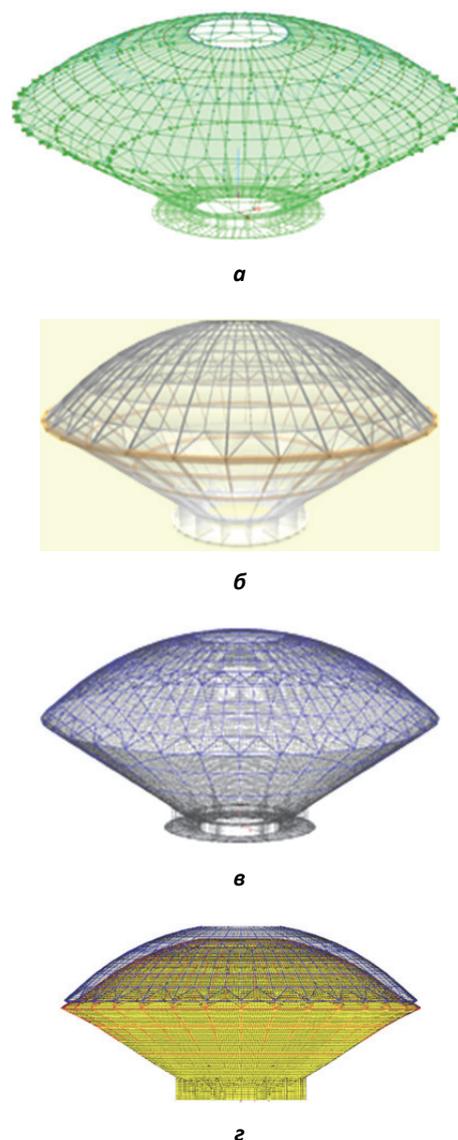
**Рис. 5. Схемы моделей стального каркаса из лепестков-ребер:**

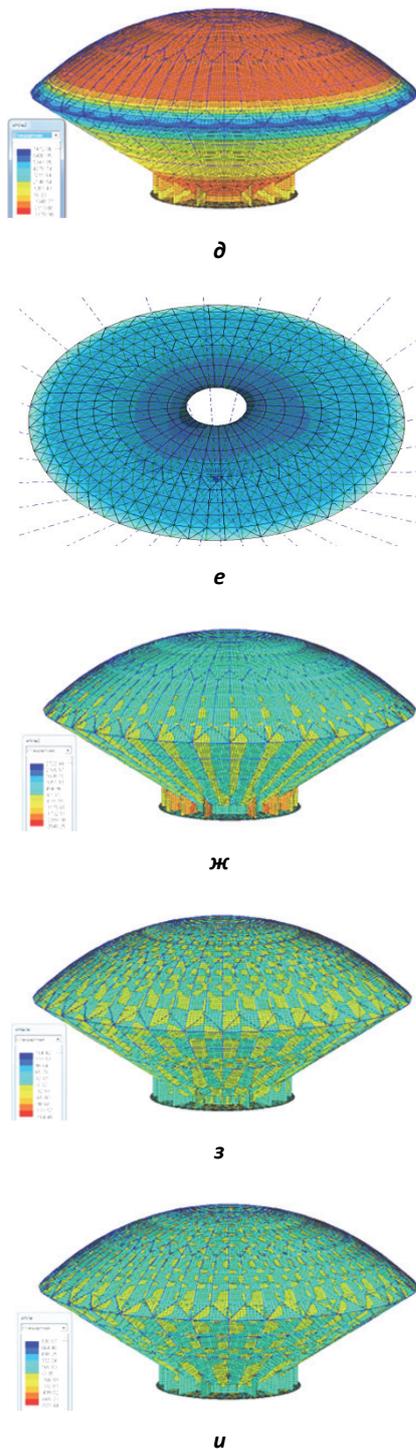
- a* – трехмерная расчетная модель лепестка-ребра из прокатных швеллеров и двутавров;  
*б* – пространственная модель из лепестков-ребер;  
*в* – схема пространственной конечно-элементной модели (ПКЭМ) купола из лепестков-ребер;  
*z* – исходная и деформированная модель купола
- [Fig. 5. Schematic models of the steel frame of the petal-fins:**
- a* – three-dimensional design model of the petal-rib from rolling channels and I-beams;  
*б* – three-dimensional model of petals-ribs;  
*в* – the scheme of the 3D finite elements model (FEM) of the dome of petals-ribs;  
*z* – the original and deformed model of the dome]

2. Установлено, что армирование купола достаточно для надежной работы конструкции: по расчету требуются радиальная и кольцевая рабочие арматуры в железобетонной части купола диаметром 6 мм класса А-III (А400); сканирование арматуры показало, что в куполе установлена арматура диаметром 10 мм класса А-III (А400).

*Второй этап.* На втором этапе приняты расчетные пространственные схемы (рис. 6). В расчете учтены вертикальные и горизонтальные нагрузки от всех региональных природно-климатических воздействий, а также технологические нагрузки при цирковых представлениях.

По результатам комплексных исследований НДС модели купольно-конической конструкции здания цирка проведен поверочный расчет всех конструктивных элементов каркаса здания. На рис. 7 приведен пример системного расчета составного сечения лепестков-ребер здания.



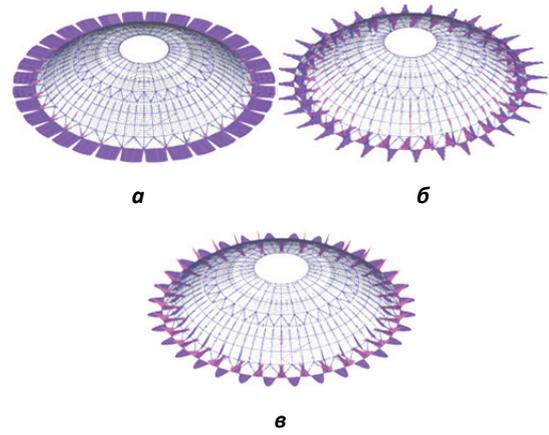


**Рис. 6. Некоторые результаты исследований НДС модели здания цирка:**

*а* – купольно-коническая модель; *б* – 3D-модель;  
*в* – конечно-элементная модель; *г* – исходная и деформированная схемы; *е* – мозаика перемещений;  
*д* – усилия  $S_r$  в конструкциях; *ж* – усилия  $S_{srs}$  в конструкциях;  
*з* – усилия  $M_{srs}$  в конструкциях; *и* – усилия  $Q_r$  в конструкциях

**[Fig. 6. Some results of investigations of the stress-strained state of the circus building model:**

*a* – dome-conical model; *б* – 3D-model;  
*в* – finite elements model; *г* – the original and deformed scheme;  
*е* – isofields of displacements; *д* – the efforts  $S_r$  in structures;  
*ж* – the efforts  $S_{srs}$  in structures; *з* – the efforts  $M_{srs}$  in structures;  
*и* – the efforts  $Q_r$  in structures]



**Рис. 7. Результаты поверочного расчета:**  
*а* – распределение расчетных продольных усилий  $N$  в стержневых элементах ребер купола ( $N_{max} = 3097,35$  кН);  
*б* – то же, поперечных  $Q$  ( $Q_{max} = 101,36$  кН);  
*в* – то же, изгибающих моментов  $M$  ( $M_{max} = -94,173$  кН•м)

**[Fig. 7. The results of calibration calculation:**

*a* – distribution of the design longitudinal forces  $N$  in the bar elements of the dome ribs ( $N_{max} = 3097.35$  кН);  
*б* – the same transverse  $Q$  ( $Q_{max} = 101.36$  кН);  
*в* – the same bending moments  $M$  ( $M_{max} = -94.173$  кН•м)]

## Выводы

На основании комплексных расчетно-теоретических исследований НДС купольно-конической конструкции здания Казанского цирка, обладающего статусом уникального объекта, можно сделать следующие общие выводы.

1. Для достоверной оценки состояния здания необходимо учесть историю его создания: формирование и реализацию идеи архитектурно-конструктивной и объемно-пространственной структуры каркаса; оптимизацию равнопрочного распределения основных несущих конструктивных элементов на базе системы «расчет – моделирование – испытание»; строительно-технологические методы и приемы, влияющие на несущую способность и надежность каркаса; предварительное обжатие конструкции нижнего опорного кольца, воспринимающего растягивающие усилия.

2. Результаты исследований НДС при помощи программного комплекса «MicroFe» для конструктивной системы купольно-конического каркаса с вариантами моделирования его работы на разных этапах строительства и эксплуатации, а также с учетом результатов инженерного обследования, физического износа и истории формирования НДС, позволяют с определенной степенью достоверности оценить фактическое напряженно-деформированное состояние конструкции здания.

3. По результатам проведенных авторами и другими специалистами инженерных инструментальных обследований строительных конструкций

купольно-конической конструкции здания цирка можно констатировать, что техническое состояние всех несущих и ограждающих конструктивных элементов здания в целом, в соответствии с п.п. 3.11, ГОСТ 31937-2011, оценивается как работоспособное. Таким образом, эксплуатация здания Казанского цирка в течение 50 лет существенно не изменила прочность и устойчивость конструкции: здание пригодно к дальнейшей безаварийной эксплуатации по своему функциональному назначению.

© Мустакимов В.Р., Якупов С.Н., 2018

### Список литературы

1. Ефимов Д.Д. Казанский цирк как памятник архитектуры периода советского модернизма: история проектирования и строительства, истоки формообразования, значение для развития архитектуры цирков // Известия КГАСУ. 2017. № 2 (40). С. 7–17.
2. Мустакимов В.Р. Проблемы геотехники в современном строительстве и реконструкции зданий и сооружений Казани // Известия КГАСУ. 2006. № 2 (6). С. 66–68.
3. Федеральный закон № 73-ФЗ от 25.06.2002 г. «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации». Ст. 64.
4. Krivoshapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Mamiyeva I.A. Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells. IJRRAS. 2014. № 18 (2). Pp. 95–108.
5. Peerdeman B. Analysis of Thin Concrete Shells Revisited: Opportunities due to Innovations in Materials and Analysis Methods. Master's thesis. The Netherlands: Delf University of Technology, 2008. Pp. 30–50.

### References

1. Efimov D.D. (2017). The Kazan Circus as an architectural heritage-listed building of the Soviet modernism period: history of design and construction, origins of the architectonic formation, importance for the development of architecture of circuses. *News of the KSUAE*, 2(40), 7–17. (In Russ.)
2. Mustakimov V.R. (2006). Problems of geotechnics in modern construction and reconstruction of buildings and structures in Kazan. *News of the KSUAE*, 2(6), 66–68. (In Russ.)
3. Federal Law No. 73-FZ of 25.06.2002. *On Objects of Cultural Heritage (Monuments of History and Culture) of Peoples of the Russian Federation*. Art. 64. (In Russ.)
4. Krivoshapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Mamiyeva I.A. (2014). Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells. *IJRRAS*, 18(2), 95–108.

5. Peerdeman B. (2008). *Analysis of Thin Concrete Shells Revisited: Opportunities due to Innovations in Materials and Analysis Methods*, Master's thesis, Delf University of Technology, the Netherlands, 30–50.

### Об авторах

**Мустакимов Валерий Раифович** – кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры, ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет». *Область научных интересов:* конструкции зданий и сооружений, механика грунтов, основания и фундаменты зданий и сооружений. *Контактная информация:* e-mail – mustakimovvr@yandex.ru.

**Якупов Самат Нухович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук». *Область научных интересов:* конструкции зданий и сооружений, механика тонкостенных конструкций, механика пленок и мембран, композиционные структуры, адгезия. *Контактная информация:* e-mail – tamas\_86@mail.ru.

### About the authors

**Mustakimov Valeriy Raifovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Architecture, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE). *Scientific interests:* construction of buildings and structures, soil mechanics, foundations of buildings and structures. *Contact:* e-mail – mustakimovvr@yandex.ru.

**Yakupov Samat Nuhovich** – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Institute of Mechanics and Engineering – Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences». *Scientific interests:* structures of buildings and structures, mechanics of thin-walled structures, mechanics of films and membranes, composite structures, adhesion. *Contact:* e-mail – tamas\_86@mail.ru.

### Для цитирования

Мустакимов В.Р., Якупов С.Н. Исследование напряженно-деформированного состояния купольно-конических конструкций Казанского государственного цирка // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 3. С. 226–232. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-3-226-232.

### For citation

Mustakimov V.R., Yakupov S.N. (2018). Investigation of the stress-strained state of dome-conical structures of the Kazan state circus. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 14(3), 226–232. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-3-226-232.