

УДК: 624.074  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.8  
EDN: GWHICI



## Моделирование стадийности строительства, эксплуатации и конструктивной безопасности большепролетных уникальных зданий

С.Р. Раззаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Научно-производственное объединение «Пространственные конструкции, сейсмостойкость зданий и сооружений», г. Жамбай, Узбекистан  
<sup>2</sup>Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет, г. Самарканд, Узбекистан

**Аннотация:** *Постановка задачи.* Обеспечение конструктивной безопасности большепролетных уникальных зданий и сооружений с применением пространственных оболочечных конструкций, выполненных на натуральных конструкциях, подверженных длительным статическим и кратковременным динамическим воздействиям высокого уровня является важной задачей. *Цель работы* заключается в моделировании поведения различных геометрических форм железобетонных пространственных оболочечных конструкций при статических и динамических воздействиях высокой интенсивности для выявления характерных особенностей и обеспечения конструктивной безопасности на стадиях строительства и эксплуатации. *Задачами исследований являются:* с применением метода моделирования обеспечение эксплуатационной безопасности, исследование изменений конструкционных свойств материалов и динамических параметров, оценка влияния климатических условий, податливости конструкций, учет наличия повреждений; исследование внешних воздействий, введение элементов жесткости для обеспечения сейсмостойкости и эксплуатационной безопасности.

*Результаты.* В работе предложен способ обеспечения конструктивной безопасности большепролетных уникальных зданий при длительных эксплуатационных и сейсмических воздействиях различной интенсивности, введение пространственных элементов жесткости, включение которых способствует выходу из резонансного состояния пространственной системы.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в возможности обеспечения конструктивной безопасности большепролетных уникальных зданий на стадиях строительства и эксплуатации, что позволяет расширить область применения эффективных видов пространственных оболочечных конструкций в регионах со сложными природно-климатическими условиями.

**Ключевые слова:** уникальные большепролетные здания, пространственные оболочечные конструкции, моделирование, стадийность, строительство, эксплуатация, конструктивная безопасность

**Для цитирования:** Раззаков С.Р. Моделирование стадийности строительства, эксплуатации и конструктивной безопасности большепролетных уникальных зданий. //Известия КГАСУ, 2024, № 4(70), с. 83-94, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.8, EDN: GWHICI

# Modelling the stages of construction, operation and structural safety of long-span unique buildings

S.R. Razzakov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research and production association “Spatial structures, seismic resistance of buildings and structures”, Zhambay, Uzbekistan

<sup>2</sup>Samarkand State University of Architecture and Construction, Samarkand, Uzbekistan

**Abstract:** *Problem statement.* The main problem of the study is to ensure the structural safety of long-span unique buildings and structures using spatial shell structures made on full-scale structures subjected to long-term static and short-term dynamic impacts of a high level. *The purpose of the work is* to simulate the behavior of various geometric shapes of reinforced concrete spatial shell structures under static and dynamic effects of high intensity in order to identify characteristic features and ensure structural safety at the construction and operation stages. *The objectives of the research are:* ensuring operational safety using the modeling method, investigating changes in the structural properties of materials and dynamic parameters, assessment of the impact of climatic conditions, flexibility of structures, taking into account the presence of damage; study of external influences, introduction of stiffening elements to ensure seismic resistance and operational safety.

*Results.* The paper proposes a method for ensuring the structural safety of long-span unique buildings under prolonged operational and seismic impacts of varying intensity, the introduction of spatial stiffness elements, the inclusion of which contributes to the exit from the resonant state of the spatial system.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry lies in the possibility of ensuring the structural safety of long-span unique buildings at the stages of construction and operation, which makes it possible to expand the scope of effective types of spatial shell structures in regions with difficult natural and climatic conditions.

**Keywords:** unique long-span buildings, spatial shell structures, modeling, staging, construction, operation, structural safety

**For citation:** Razzakov S.R. Modelling the stages of construction, operation and structural safety of long-span unique buildings // News of KSUAE, 2024, № 4(70), p. 83-94, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.8, EDN: GWHICI

## 1. Введение

В настоящее время теория и практика применения большепролетных пространственных конструкций для уникальных зданий и сооружений имеет высокую применимость и активно развивается [1-3].

В районах Центральной Азии, Закавказья и других регионах история возведения оболочек для покрытий общественных зданий относится к глубокой древности [4-6]. Сохранение этих ансамблей на сегодняшний день свидетельствует о долговечности и надежности их применения для районов с высокой сейсмичностью, резко изменяющимися климатическими характеристиками и слабыми грунтовыми условиями [7-9]. Более того, интенсивные сейсмические воздействия ограничивают внедрение большепролетных уникальных зданий. [10,11]. Для решения этой проблемы получила развитие нелинейная теория расчета пространственных систем [12-14] разработаны методы расчета оболочек, пластин и стержневых конструкций с учетом длительности эксплуатации [3,15,16], сейсмических воздействий [12,17,18], региональных особенностей районов строительства [19, 20]. Повышение сейсмостойкости конструкций осуществлялось разработкой и применением новых эффективных конструкций оболочек покрытий с применением пространственных элементов жесткости. Применение таких конструкций [3,9,12] способствует уравниванию реактивных сил между отдельными частями оболочки, вызванных резонансными колебаниями, и способствует выходу оболочки из этого

состояния, обеспечивая конструктивную безопасность.

Учитывая сложность моделирования стадийности строительства и эксплуатации уникальных большепролетных зданий и сооружений, задачи данной проблемы решались для длительно эксплуатируемых пространственных систем по следующей методологии:

- изменение конструктивных свойств материалов по критерию обеспечения эксплуатационной безопасности при статических и динамических воздействиях [3,4,9];
- разработка рациональных способов возведения конструкций, создающих благоприятные условия работы при переходе в эксплуатационное состояние; [6,8,12];
- обеспечение эксплуатационной безопасности при неблагоприятных климатических условиях [12, 16]; с учетом вида и уровня нагрузок, податливости контурных диафрагм [1,4,19], изменения динамических параметров конструкций во времени [12,14,17];
- снижение влияния аварийных воздействий от локальных повреждений и отказа отдельных наиболее напряженных элементов конструкций [3, 14, 20].

Учитывая сложность создания действительного напряженного состояния рассматриваемых систем, оценки надежности методики расчета, обоснованность принятых исходных предпосылок и учет отмеченных выше особенностей конструкции при решении задач данной проблемы было принято решение синтезировать теорию с экспериментом, основывающемся на физических и аналитических методах моделирования [4,9,12] и выполнения научно-технического сопровождения на эксплуатируемых объектах.

**Целью работы** является моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных пространственных оболочечных конструкций различных геометрических форм при статических и динамических воздействиях высокой интенсивности для выявления характерных особенностей и обеспечения конструктивной безопасности на стадиях строительства и эксплуатации.

**Объектом исследования** являются железобетонные большепролетные пространственные оболочечные конструкции уникальных зданий.

**Предмет исследования** – влияние статических и динамических воздействий, на напряженно-деформированное состояние оболочки, конструктивная безопасность большепролетных железобетонных пространственных оболочечных конструкций.

**Задачами исследования являются:**

- обоснование методами моделирования актуальности обеспечения конструктивной безопасности большепролетных пространственных оболочечных конструкций уникальных зданий и сооружений с учетом региональных особенностей;
- исследование учета изменения во времени конструктивных свойств материалов и динамических параметров пространственных оболочечных систем;
- оценка длительно нагруженных моделей и натуральных конструкциях влияние климатических условий, податливости конструкции, наличие различных повреждений;
- исследуется уровень внешних воздействий и введение конструктивных элементов жесткости для обеспечения сейсмостойкости и эксплуатационной безопасности.

## 2. Материалы и методы

Метод натурального моделирования является эффективным средством исследования всех напряженных состояний пространственных оболочечных конструкций. Расчет таких конструкций с учетом их особенностей во многих случаях связан с серьезными затруднениями. Метод моделирования позволяет провести качественное и количественное исследование напряженно-деформированного состояния конструкции; оценить достоверность методов расчета, распространить результаты единичных опытов на целый класс подобных конструкций в зависимости от напряженно-деформированного состояния. Общий вид модели представлен на рис.1. Испытания проводились на гладких и ребристых (сборно-монолитных) оболочках. Поля модели оболочек армировались сетчатой арматурой, контурные элементы и продольные ребра сборных плит, предложенным автором способом армирования криволинейных элементов. Для изготовления модели оболочки и сборных элементов на мелкозернистого и тяжелого бетона применялись железобетонные матрицы и металлические формы.

Параметры напряженно-деформированного состояния оболочки при

кратковременном, длительном и динамических нагружениях определялись приборами и аппаратурой применяемыми в современных исследованиях.

Испытания моделей оболочки проводились в специальных стендах в виде пространственной рамы. Крупноразмерные модели испытывались в эксплуатационном (рабочем) состоянии. Длительное нагружение создавалось с помощью рычажных установок. (рис.1)

Вынужденные колебания от динамических, типа сейсмических нагрузок в вертикальном и горизонтальном направлениях создавались вибромашинной направленного действия В-2.

Дистанционное управление скоростью вращения валов вибромотора, которая достигла 3000 оборотов/мин, позволило получить работу конструкции в резонансных режимах. В целях имитации землетрясения вибромашинная располагалась в середине пролета оболочки на уровне фундамента.

Вертикальные вынужденные воздействия на оболочку передавались через металлические пространственные рамы, закрепленные к контурным диафрагмам в середине их пролета.

Горизонтальные вынужденные воздействия от вибромашинной на оболочку передавались по верху колонн с помощью трубчатых распорок.

Для оценки сейсмостойкости статически нагруженных оболочек в эксплуатационных стадиях определялись динамические параметры при свободных и вынужденных колебаниях, а также в момент резонанса, соответствующего напряженно-деформированному состоянию конструкции с интенсивностью 7, 8 и 9 баллов.

В исследованных моделях длительность нагружений составила: 0, 15, 60, 150, 600, 907 суток. Необходимо отметить, что особенности поведения таких конструкций представляют собой малоизученную область.

Поэтому экспериментальные исследования проводились на крупных моделях с масштабом  $M$  1:4 ÷ 1:10 с последующим применением крупноразмерных натуральных объектов (табл.1).

Для исследования напряженно-деформированного состояния оболочек в различной стадии (рис.2) нагрузка на исследуемой модели и натурной конструкций определяется с учетом прочностных характеристик материалов.

$$q_m = \frac{q_n}{\alpha_R}; F_m = \frac{F_n}{\alpha_m^2 \alpha_R}; q_{ml} = \frac{q_n \ell}{\alpha_m \alpha_R}, \quad (1)$$

где  $q_m$ ,  $q_{ml}$ ,  $F_m$  – соответственно, равномерно-распределенная по площади, распределенная по длине и сосредоточенная нагрузка на модель;

$\alpha_m = y_n / y_m$  - коэффициент масштаба геометрического подобия;

$\alpha_R = R_n / R_m$  - коэффициент масштаба прочностей материалов или масштаба силового подобия;

$\alpha_E = E_n / E_m$  - коэффициент масштаба модулей упругости.

В выражения (1) нагрузка на модели оболочечных систем состоит из суммы

$$q(x) = q = g + p + p_0, \quad (2)$$

где  $g$  – постоянная нагрузка,  $p$  – временная нагрузка,

$p_0$  – нагрузка предварительного напряжения равная 10-15% от  $g+p$ .

При подсчете основных деформаций вводится коэффициент подобия, учитывающий соотношение модулей упругости материала модели  $\alpha_E$ , тогда деформации перемещения натуральных конструкций определяются по формулам

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta f_n}{f_n} = \frac{\Delta f_m}{f_m} \cdot \frac{\alpha_m}{\alpha_R \alpha_E}; w_n = d_m w_m; u_n = \Delta \ell_n = \Delta \ell_m \frac{\alpha_m}{\alpha_R \alpha_E}. \quad (3)$$

Изгибные и осевые усилия в конструкциях оболочечных систем определяются по формулам:

$$M_n = M_m \alpha_m^2 \alpha_R; N_n = N_m \alpha_m \alpha_R; H_n = H_m \alpha_m \alpha_R; \quad (4)$$

где  $M_m$ ,  $N_m$  и  $H_m$  – изгибающий момент, продольная сила и распор в модели;  $M_n$ ,  $N_n$  и  $H_n$  – тоже в натурной конструкции.

Вышеприведенные формулы применены для анализа результатов экспериментальных исследований моделей оболочек покрытий и оценке характера работы натуральных конструкций при различных сочетаниях статических нагрузений, как в монтажной, так и в эксплуатационных стадиях.

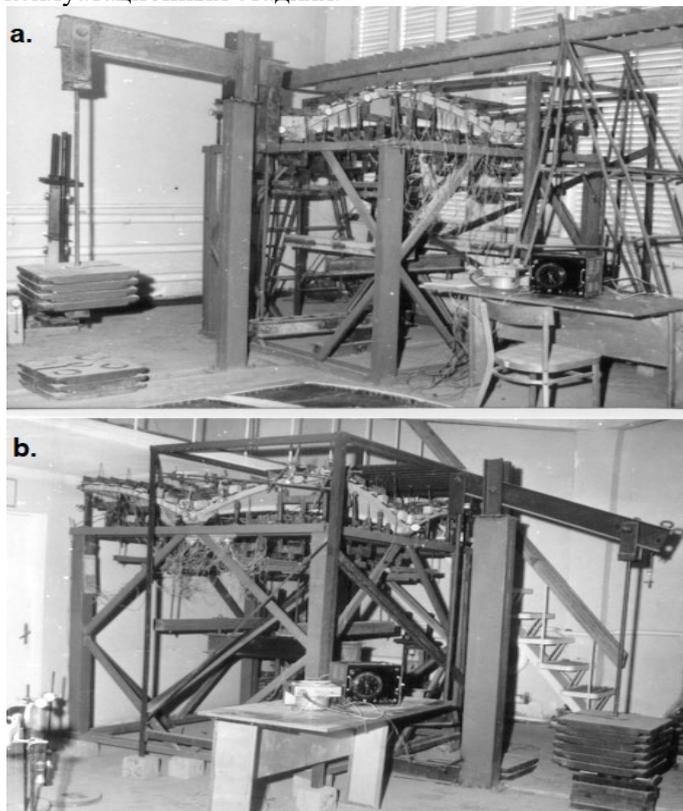


Рис. 1. Общий вид длительных испытаний моделей составной оболочки уровнями нагрузений: а – 0,42; б – 0,72 от кратковременной разрушающей нагрузки равной 34,3 кН/м<sup>2</sup> (иллюстрация автора)

Fig. 1. General view of long-term tests of composite shell models with load levels of: a – 0,42; b – 0,72 from a short-term destructive load equal to 34.3 kN/m<sup>2</sup> (illustration by the author)

Таблица 1

Характеристика исследованных типов оболочек и моделей.

№ п.п.	Исследуемые оболочки, маркировка элементов	Масштаб, размеры в м	Назначение
1	Составные ребристые отрицательной гауссовой кривизны М-1	М 1:10 4,8x4,8	Изучение напряженно-деформированного состояния. Оценка прочности, устойчивости и конструктивной безопасности при различных сочетаниях нагрузки
2	Составные ребристые отрицательной гауссовой кривизны М-2	М 1:4 12x12	Изучение напряженно - деформированного состояния при монтажных, и эксплуатационных воздействиях. Оценка конструктивной безопасности
3	Пологие ребристые оболочки положительной гауссовой кривизны	Н-1 96x96	Изучение напряженно-деформированного состояния при различных уровнях и сочетаниях монтажной нагрузки. Выявление рациональной способы монтажа и демонтажа оболочки. Оценка конструктивной безопасности
4	Составные ребристые отрицательной гауссовой кривизны	Н-2 96x96	
5	Полигональные ребристые оболочка положительной гауссовой кривизны	Н-3 96, d=104 .	

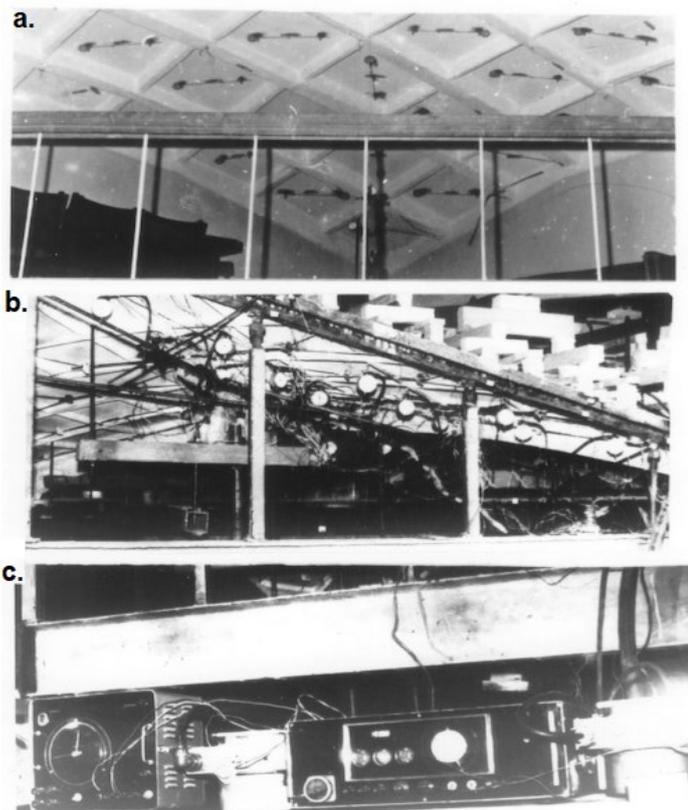


Рис. 2. Общие виды испытания оболочек, оснащенных приборами : a, b – измерение деформаций и перемещений в составных оболочках 12x12 м и 4.8x4.8 м; c – тензометрические установки (иллюстрация автора)

Fig. 2. General types of testing of shells equipped with devices: a, b – measurement of deformations and displacements in composite shells 12x12 m and 4.8x4.8 m; c – strain gauge installations (illustration by the author)

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Состояние длительно эксплуатируемых пространственных оболочечных конструкций при динамических воздействиях.

Моделирование действительного напряженно-деформированного состояния конструкции отражающего стадии строительства и эксплуатации, обеспечивающего конструктивную безопасность с контролированием прогибов и остаточных деформаций является сложной задачей.

Модели подвергались длительным натурным испытаниям в течение 7 лет, основывались на экспериментальных методах моделирования. Установлено, что напряженно-деформированное состояние в момент нагружения характеризуется максимальными значениями в результате роста длительных неупругих деформаций, особенно при учете температурно-влажностных условий. Так, в конце наблюдения предельные прогибы пространственных оболочечных конструкций различных геометрических форм с момента нагружения возросли в 1,5 – 2 раза, фибровые деформации – в 2,4...2,75 раза, размеры возникших трещин увеличивались почти вдвое. Остаточные прогибы и деформации составили, соответственно, 23-60% и 35-80%. Это привело к значительному снижению жесткости конструкций при длительной эксплуатации.

Для оценки деформированного состояния конструкций оболочек с учетом влияния климатических условий, получена система уравнений, учитывающая нелинейную ползучесть, базирующаяся на теории гибких пологих оболочек при больших прогибах:

$$\begin{aligned}
 &L_1(\dot{F}, D_i) + L_2(\dot{\omega}, D_i) + \dot{F}_{\beta\beta}(k_1 + \omega_{\alpha\alpha}) + \dot{F}_{\alpha\alpha}(k_2 + \omega_{\beta\beta}) + \\
 &+ 2\dot{F}_{\alpha\beta}\omega_{\alpha\beta} + F_{\beta\beta}\dot{\omega}_{\alpha\alpha} + F_{\alpha\alpha}\dot{\omega}_{\beta\beta} - 2F_{\alpha\beta}\dot{\omega}_{\alpha\beta} = L_1(\dot{F}, D_i(t)) - L_2(\omega^\Delta, D_i(t)); \\
 &L_3(\dot{F}, B_i) + L_2(\dot{\omega}, B_i) + (k_1 + \dot{\omega}_{\alpha\alpha})\dot{\omega}_{\beta\beta} + (k_2 + \omega_{\beta\beta})\dot{\omega}_{\alpha\alpha} - \\
 &- 2F_{\alpha\beta}\dot{\omega}_{\alpha\beta} = -L_3(\dot{F}, B_i(t)) - L_4(\omega^\Delta, B_i(t)).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

где  $L_1(\dot{F}, D_i(t)) - L_4(\omega^\Delta B_i(t))$  – дифференциальные операторы, содержащие переменные жесткостные коэффициенты  $(D_i(t))$ ,  $(B_i(t))$ , характеризующие свойства нелинейной ползучести армированного тела и производных по функциям усилий  $\dot{F}$  и прогибов  $\dot{\omega}$  по координатам  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $k_1$   $k_2$  - главные кривизны оболочки.

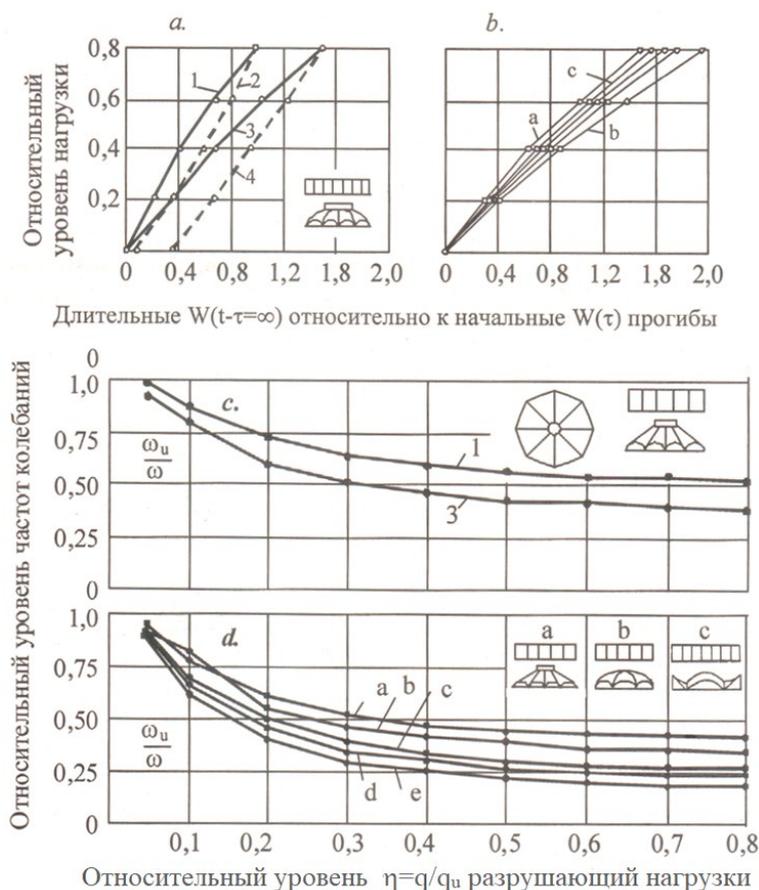


Рис. 3. Графики изменения прогибов, частоты вертикальных колебаний оболочек в зависимости от уровня и длительности нагружений и граничных условий защемления: 1, 3 – при кратковременном и длительном нагружении; 2, 4 – то же, восстановление прогибов после разгрузки; d, e – для защемленной и свободно опертой оболочки (иллюстрация автора)  
 Fig. 3. Graphs of changes in deflections, frequency of vertical vibrations of shells depending on the level and duration of loading and boundary conditions of pinching: 1, 3 – for short-term and long-term loading; 2, 4 - the same, restoration of deflections after unloading; d, e – for a clamped and simply supported shell (illustration by the author)

Длительное напряженно-деформированное состояние оболочек при динамических (сейсмических) испытаниях создавалось путем перегрузки с контролем прогиба на этапах нагружения с использованием ранее установленных нелинейных законов деформирования «нагрузка-прогиб» (рис. 1, 3). Исследования осуществляли с измерением деформаций и записью динамических параметров при свободных и вынужденных колебаниях при различных сочетаниях статических и динамических нагрузок высокой интенсивности.

Колебания конструкции фиксировали в направлении трех осей, ожидаемых при землетрясениях. Вынужденные колебания в вертикальном и горизонтальном направлениях создавали вибромашинной с достижением ускорений, соответствующих 7, 8 и 9 баллам

расчетной сейсмичности, с доведением конструкции до резонансного состояния.

Испытания проводили на моделях и натурных пространственных оболочечных конструкциях с пролетами 4,8, 12, 18, 24, 30 и 36 м отдельно стоящих и сопряженных многоволновых конических куполов с пролетами 18, 30 и 42 м. Масштаб моделей 1:4 – 1:10. Результаты проведенных исследований показывают, что при сильных сейсмических воздействиях с увеличением величины внешних нагрузок и длительности нагружений существенно уменьшается динамическая жесткость конструкции, выражающаяся в условиях эксперимента увеличением периода основного тона колебаний.

Анализ резонансных кривых плит для составных оболочек и конического купола при вертикальных и горизонтальных вынужденных колебаниях показали плавное снижение частоты колебаний с увеличением величины статических нагрузок.

При горизонтальных вынужденных колебаниях выявилось одно резонансное состояние конструкции, соответствующее частотам свободных колебаний.

### 3.2. Сейсмостойкость пространственных оболочечных систем различных конструктивных решений.

Сейсмостойкость исследованных моделей и натурных конструкций оценивались созданием динамической нагрузки высокой интенсивности с доведением конструкции до резонансного состояния. Для моделей составных оболочек пролетом 4,8 м, нагруженных распределенной нагрузкой 1,7... 6,5 кН/м<sup>2</sup>, выявленных в первом и втором резонансе, ускорение от вынужденных колебаний составило (0,373 – 0,09)g и (1,04 – 0,447)g. В горизонтальных вынужденных колебаниях при нагрузке 6,5 кН/м<sup>2</sup>, выявилось только одно резонансное состояние, для которого ускорение составило 0,35g. Составная оболочка пролетом 12 м испытывалась в эксплуатационной стадии при нагрузке, равной 2,8 кН/м<sup>2</sup>. В первых и вторых резонансах ускорение от вертикальных вынужденных колебаний составило 0,08g и 0,258g. От горизонтальных вынужденных колебаний ускорение в резонансном состоянии составило 0,03g. Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований моделей составных оболочек при высоких уровнях сейсмических воздействий показал, что учет длительности эксплуатации, развития трещин и увеличения деформаций контурных конструкций во времени (податливости), привели к снижению начальной динамической жесткости. Наблюдалась также возможность разрушения отдельных наиболее напряженных зон и узлов от невыгодных сочетаний эксплуатационных и сейсмических нагрузок.

Пространственные конструкции в нормах проектирования обычно считают жесткими и предполагается, что при землетрясениях все здание колеблется в одной фазе, т.е. принимается

$$\lambda = cT_0 \gg L \quad (6)$$

где  $\lambda$  – длина сейсмической волны;

$c$  – скорость ее распространения,

$T_0$  – период колебания грунта, соответствующий периоду основного тона колебаний здания;

$L$  – длина здания.

Однако результаты исследований моделей и натурных пространственных конструкций показали, что с увеличением пролета (протяженности) пространственных конструкций, особенно возведенных на неплотных грунтах, для которых скорость распространения волн невелика, может оказаться так, что  $L = \lambda$ , или  $L = \lambda/2$ . В этом случае эффект бегущей волны приводит к движению основания в различных точках, сдвинутых во времени. С использованием результатов экспериментально-теоретических исследований разработаны предложения по определению величины сейсмической нагрузки с учетом возможности проявления симметричной и кососимметричной форм колебаний опор в зависимости от протяженности оболочки в плане, длины сейсмических волн и длительности эксплуатации, соответствующей  $i, j$  – тону собственных колебаний:

$$S(\alpha, \beta) = q(\alpha, \beta) A_{\mu}(\alpha, \beta) \beta_{ij}(l, \gamma, c) K_{\phi} \eta_{ij}(\alpha, \beta) \quad (7)$$

где  $i, j$  – количество полуволн, соответствующих формам колебаний;

$\mu(\alpha, \beta)$  – функция распределения переносного движения по площади покрытия;

$l$  – протяженность здания;

$\gamma$  – коэффициент затухания колебаний системы;

$c$  – скорость распространения сейсмической волны в грунте;

$\eta_{ij}(\alpha, \beta)$  – коэффициент пространственной формы колебаний оболочки.

Для предотвращения хрупкого разрушения пространственных конструкций, находящихся в эксплуатационном состоянии разработаны критерии, ограничивающие величины предельной статической и сейсмической нагрузки:

$$q = q_1 + q_s \leq kq_u, \quad (8)$$

где  $q_1$  – длительная эксплуатационная нагрузка;

$q_s$  – сейсмическая составляющая нагрузки,

Результаты исследований показали, что для землетрясений интенсивностью 7, 8 и 9 баллов величину предельной длительной статической и сейсмической нагрузки, в соответствии с выражениями (8) можно принять соответственно:

$$q = 0,7q_u; \quad q = 0,65q_u; \quad q = 0,6q_u \quad (9)$$

Таким образом, анализ результатов проведенных испытаний моделей оболочки нагруженных длительными динамическими нагрузками высокой интенсивности показал, что сейсмостойкость пространственных конструкций уникальных сооружений, «конструктивная безопасность» на вертикальные воздействия может быть обеспечена применением дискретно расположенных ребер (сеток), необходимых для усиления поля оболочки, а также ограничением размера одного из пролетов составляющих элементов. Для восприятия горизонтальных сейсмических нагрузок требуется разработка специальных конструктивных решений. (рис.4).

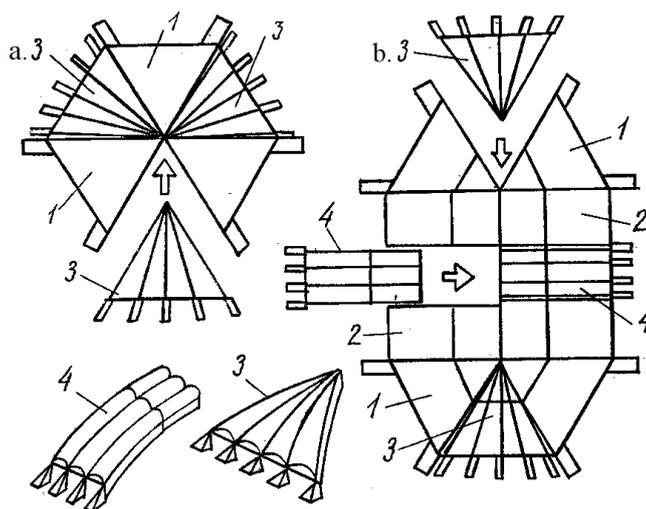


Рис. 4. Конструктивные решение составной оболочки зданий с пространственными элементами жесткости: а, б – секториальные и вытянутые в плане оболочки с вариантами расположения пространственных элементов жесткости; 1, 3, 4 – составляющие элементы оболочки; 2 – арочные элементы жесткости (иллюстрация автора)

Fig. 4. Constructive solutions for the composite shell of buildings with spatial stiffening elements : а, b – sectorial and elongated shells with options for the location of spatial stiffening elements; 1,3,4 – constituent elements of the shell; 2 – arched stiffeners (illustration by the author)

### 3.3. Конструктивное решение пространственных оболочечных конструкций покрытий для сейсмических районов.

Повышение сейсмостойкости составных оболочек большепролетных уникальных зданий осуществлялось путем увеличения пространственной жесткости с введением специальных пространственных элементов жесткости (рис.4). Пространственные элементы жесткости выполняются из волнистого или складчатого профиля. Они проектируются с трех и более сторон оболочки в зависимости от геометрической формы в плане и величины пролёта здания. Эти элементы, воспринимая горизонтальные составляющие сейсмических воздействий, передают их непосредственно на фундаменты здания. Проведенные численные оценки результатов экспериментальных исследований показали необходимость ограничения минимального размера здания одного из направлений составляющего элемента пролета оболочки, и принятия их не более 36 м.

Размеры в другом направлении не ограничиваются и могут быть приняты исходя из технологических требований и учета региональных особенностей районов строительства, с обеспечением конструктивной безопасности уникальных зданий.

Обрушение конструкций большепролетных уникальных зданий и сооружений может происходить вследствие аварий, ошибок проектирования, изготовления, монтажа и неправильной эксплуатации сооружения [2, 9, 12, 16]. Применение при проектировании, строительстве и эксплуатации результатов проведенных экспериментальных исследований, может учитываться введением дополнительных коэффициентов условий работы (табл.2) приведенной «Специальных технических условиях» на проектирование конкретного большепролетного уникального здания или сооружения.

Таблица 2

Рекомендуемые коэффициенты для обеспечения конструктивной безопасности пространственных оболочечных систем

№	Ключевые элементы конструкции	Пролет, м	Дополнительные коэффициенты условий работы $\gamma_{с,доп}$ в зависимости от расчетного срока эксплуатации сооружения		
			до 50 лет	от 50 до 75 лет	свыше 75 лет
1	Сжатые и растянутые железобетонные и стальные опорные контуры оболочек пространственных систем	До 50	1,0	0,95	0,9
		От 50 до 100	0,95	0,9	0,85
		Свыше 100	0,9	0,85	0,8
2	Основные колонны по периметру здания и сооружения	До 50	1,0	0,95	0,9
		От 50 до 100	0,95	0,9	0,85
		Свыше 100	0,9	0,85	0,8
3	Основные несущие элементы пролетной конструкции (диафрагмы)	До 50	1,0	0,95	0,9
		От 50 до 100	0,95	0,9	0,85
		Свыше 100	0,9	0,85	0,8

#### 4. Заключение

1. На современном этапе развития строительства уникальных большепролетных зданий и сооружений с применением пространственных оболочечных конструкций для учета региональных особенностей, применение экспериментальных методов моделирования обеспечивающих конструктивную безопасность исследуемых систем является актуальной задачей;

2. Предложен учет изменения во времени конструкционных свойств материалов и динамических параметров пространственных оболочечных систем для обеспечения эксплуатационной безопасности конструкций;

3. Для длительно нагруженных моделей и натуральных пространственных оболочечных конструкций по результатам испытаний выявлено и оценено влияние климатических условий, податливости контурных конструкций и оснований, изменение начальных несовершенств, локальных повреждений и отказ наиболее напряженных элементов на работу конструкции и меры по обеспечению ее дальнейшей эксплуатационной безопасности;

4. Предложено назначать максимальные уровни внешних нагрузок в зависимости от интенсивности сейсмических воздействий; введение пространственных элементов жесткости, способствующих выходу из резонансного состояния пространственных оболочечных систем уникальных зданий и сооружений во время землетрясения высокой интенсивности.

#### Список литературы / References

1. Колчунов В.И., Андросова Н.Б., Клюева Н.В., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ. 2014.–208 с.  
Kolchunov V.I., Androsova N.B., Klyueva N.V., Bukhtiyarova A.S. Survivability of

- buildings and structures under beyond-design influences. M.: Publishing house ASV. 2014. - 208 p.
2. Лебедева И.В., Петрова Т.А. Анализ современных подходов к оценке надежности в строительстве. Вестник НИЦ «Строительство». [3]: 2023; 38: 20-36. <https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3> [38]-20-36.  
Lebedeva I.V., Petrova T.A. Analysis of modern approaches to assessing reliability in construction. Bulletin of the Scientific Research Center "Construction", 2023, 38 [3]: 20-36. <https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3> [38]-20-36.
  3. Razzakov S.R., Razzakov K.H.S., Razzakov J.S. Limit state of steel reinforced concrete round plates in the operational stage /Modeling and methods of structural analysis. JOP Conf. Series: Journal of physics: Conf. Series: 1425(2020) 012101 doi: 10.1088/1742-6596/1425/1/012101.
  4. Еремеев П.Г. Современные конструкции покрытий над трибунами стадионов М.: Издательство АСВ, 2015.-236с.  
Eremeev P.G. Modern designs of coverings over stadium stands M.: ASV Publishing House, 2015.-236 p.
  5. Pathan K.M., Sayyad Wajed Ali, Hanzala T. Khan, Mirza M.S., Mohd Waseem, Shaikh Zubair. Construction Stage Analysis of RCC Frames // International Journal of Engineering and Technology Research, 2014, Vol. 2, Issue-3. — P. 54-58.
  6. Раззоков Н.С. Железобетонные оболочки покрытий уникальных большепролетных зданий в стадии возведения. Ташкент: Издательство «Фан» Академии наук Республика Узбекистан. 2022. 212 с.  
Razzokov N.S. Reinforced concrete shells for unique long-span buildings under construction. Tashkent: Publishing House "Fan" of the Academy of Sciences, Republic of Uzbekistan. 2022. 212 p.
  7. Poojara S. D., Patel P.V. Axial deformation of columns in multi-storey Reinforced Concrete Buildings // International Journal of Civil Engineering and Technology, 2014, Vol. 5, Issue 3. — P. 294-300.
  8. Олейник П.П., Бродский В.И. Методы возведения железобетонных куполов/ М.: Издательство АСВ, 2016, 232 с.  
Oleinik P.P., Brodsky V.I. Methods for constructing reinforced concrete domes/ M.: ASV Publishing House, 2016, 232 p.
  9. Razzakov S.R., Fridman G.S. Razzakov N.S. Evolution of dynamic parameters the composite spatial constructions in the process operation // Collection of reports of an international scientific and practical conference, Moscow MISI-MGSU, 2018. P 356-361.
  10. Мирсяпов И.Т. Новые методы расчета железобетонных конструкций на выносливость при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил. //Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды. Т.1 М.: МГСУ, 2014. С.335-342.  
Mirsayapov I.T. New methods for calculating reinforced concrete structures for endurance under the combined action of bending moments and shear forces. //Concrete and reinforced concrete - a look into the future: scientific works. T.1 M.: MGSU, 2014. P.335-342.
  11. Hajiyev, M.A. Damirov M.M. Construction of the "Moment-Curvature" Scheme for Annular Cross-Sectional Reinforced Concrete Elements and its Application in the Calculation of Reinforced Concrete Beams. HERALD of the Azerbaijan Engineering Academy The international science-technical journal, Baku, 2024, Vol 16 №1, P.56-69.
  12. Razzakov S.R. Modeling of seismic resistance of spatial high-span unique structures in the operational stage // IOP Conf. series: Materials science and engineering. 2021. Vol. 1079. 0422064. doi 10 1088/1757-899 1079/4/042064.
  13. Мкртычев О.В., Дасинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения): Монография. М.: МГУ, 2014. -192 с.  
Mkrtychev O.V., Dasinchvelashvili G.A. Problems of taking into account nonlinearities in the theory of seismic stability (hypotheses and misconceptions): Monograph. M.: MGU, 2014.-192 p.
  14. Sousa R., Sousa H., Guedes J. Diagonal compressive strength of masonry samples -

- experimental and numerical approach // *Materials and Structures*, 2013, Vol. 46, P 765-786.
15. Тамразян А.Г. Есяян С.Г. Механика ползучести бетона. М.: Издательство МИСИ-МГСУб 2012. 492 с.  
Tamrazyan A.G. Yesayan S.G. Mechanics of concrete creep. M.: Publishing house MISI-MGSUб 2012. 492 p.
16. Axmadiyarov U.S. //Research of trailing coverings of wide-span unique buildings by the modelling method.// *European Sciences review Scientific journal Vienna* 2018 № 5-6, P. 275-276.
17. Перельмутер А.В., Кабанецев О.В. Анализ конструкций с изменяющейся расчетной схемой /М.: Издательство АСВ. 2015. 148 с.  
Perelmutter A.V., Kabanetsev O.V. Analysis of structures with a changing design scheme / M.: ASV Publishing House. 2015. 148 p.
18. Kabantsev, O. Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 1. Masonry as Simulation Object // *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 725-726 — P. 681-696.
19. Razzokov N.S. International Science and Modeling the Construction Stages of Large Span Spatial Unique Buildings of Complex Geometry/Modeling and methods of structural analysis. JOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf: Series: 1425 (2020) 012100 doi: 10.1088/1742-6596/1425/1/012100.
20. Некрестянов В.Н. Моделирование разрушений строительных сооружений // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 145-153.  
Nekrestyanov V.N. Modeling of destruction of building structures // *Bulletin of MGSU*. 2014. №. 9. P. 145-153.

#### Информация об авторах

**Раззаков Сайидмахсуд Рахмонович**, доктор технических наук, профессор, Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет Руководитель, Научно-производственное объединение «Пространственные конструкции, сейсмостойкость зданий и сооружений», г. Жамбай, Узбекистан  
E-mail: npl-spk@list.ru

#### Information about the authors

**Razzakov Sayidmaksud Rakhmonovich**, doctor of technical sciences, professor, Director, Scientific and Production Association "Spatial Structures, Seismic Resistance of Buildings and Structures", Zhambay, Uzbekistan  
E-mail: npl-spk@list.ru