

УДК 624.1
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776>
EDN: XQZPKB
Научная статья



ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ И ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ-ОБОЛОЧКИ ПЕРЕКРЫТИЯ

А. В. Селиванов^{1*}, Ф. Ф. Регер², И. А. Чакурин¹

¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),

²ЗАО «ПИРС»,

г. Омск, Россия

ant.seliwanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6073-2690>

fedorreger@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3288-7457>

chakurin@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8414-069X>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Проведены экспериментальные исследования трещинообразования и предельного равновесия железобетонной плиты-оболочки перекрытия, разработанной авторами.

Материалы и методы. Исследования проводились на железобетонных моделях, изготовленных в масштабе 1:5.

Результаты. При испытаниях установлены три стадии напряженно-деформированного состояния: первая – упругая стадия работы бетона на растяжение в нижней части продольных контурных ребер; вторая – стадия образования и раскрытия трещин; третья – стадия разрушения.

Обсуждение и заключение. Первая стадия наблюдается от начала нагружения до момента образования трещин в продольных ребрах; вторая – между окончанием первой стадии и началом разрушения ребер; третья – при разрушении полки и ребер моделей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: железобетонная плита-оболочка перекрытия, экспериментальные исследования, трещинообразование, предельное равновесие.

Статья поступила в редакцию 13.06.2022; одобрена после рецензирования 29.07.2022; принята к публикации 14.10.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Селиванов А. В., Регер Ф. Ф., Чакурин И. А. Исследование трещинообразования и предельного равновесия железобетонной плиты-оболочки перекрытия // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 762-776. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776>

© Селиванов А. В., Регер Ф. Ф., Чакурин И. А., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776>
EDN: XQZPKB

STUDY OF CRACK FORMATION AND LIMIT EQUILIBRIUM OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLAB SHELL

Anton V. Selivanov^{1*}, Fedor F. Reger², Ivan A. Chakurin¹

¹Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),

²ZAO PIRS,

Omsk, Russia

ant.seliwanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6073-2690>

fedorreger@gmail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3288-7457>

chakurin@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8414-069X>

*corresponding author

ABSTRACT

Introduction. Experimental studies of crack formation and limit equilibrium of a reinforced concrete floor slab-shell, developed by the authors, were carried out.

Materials and methods. The studies were carried out on reinforced concrete models made on a scale of 1:5.

Results. During the tests, three stages of the stress-strain state were established: the first is the elastic stage of concrete tensile work in the lower part of the longitudinal contour ribs; the second is the stage of formation and opening of cracks; the third is the stage of destruction.

Discussion and conclusions. The first stage is observed from the beginning of loading until the moment of cracks formation in the longitudinal ribs, the second is between the end of the first stage and the beginning of the destruction of the ribs, the third is during the destruction of the flange and ribs of the models.

KEYWORDS: reinforced concrete floor slab shell, experimental studies, cracking, limiting equilibrium.

The article was submitted 13.06.2022; approved after reviewing 29.07.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Selivanov A. V., Reger F. F., Chakurin I. A. Study of crack formation and limit equilibrium of reinforced concrete floor slab shell. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022; 19 (5): 762-776. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776>

© Selivanov A. V., Reger F. F., Chakurin I. A., 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Со времен начала массового использования железобетона в строительстве железобетонные изогнутые оболочки являлись перспективным направлением. За счет пространственной работы в оболочках практически отсутствуют изгибающие моменты и поперечные силы, что позволяет увеличить несущую способность и уменьшить расход арматуры. Использовать пространственный эффект многие ученые пытались и при работе сборных железобетонных плит перекрытия и покрытия^{1, 2, 3, 4, 5, 6} [1, 2, 3, 4].

Плита-оболочка – это конструкция, имеющая прямоугольный в плане контур, одну из поверхностей криволинейную (в одном или двух направлениях), другую – плоскую⁷.

Во второй половине XX в. в нашей стране было разработано достаточно много различных конструктивных решений сборных железобетонных плит-оболочек. Некоторые из них представлены на рисунке 1.

Каждый из предложенных вариантов конструкции плиты-оболочки имеет свои достоинства и недостатки, но очевидных преимуществ, позволяющих ему конкурировать с пустотными или ребристыми плитами, ни один из них не имеет.

Большинство из предложенных вариантов имели один серьезный недостаток – сложность и трудоемкость изготовления.

Есть предположение, что многие авторы при разработке своей конструкции плиты в последнюю очередь задумывались над технологией ее изготовления или вообще этим вопросом не занимались, считая, что это прерогатива технологов. На практике все новые конструктивные решения реализовывались примитивно, по агрегатно-поточной технологии с увеличением объема ручного труда, что в конечном итоге сказывалось на стоимости изготовления изделий. В результате ни один из вариантов вспарушенных или цилиндрических плит не нашел массового применения в практике строительства.

Поскольку при расчете цилиндрической оболочки установлено, что в поперечном направлении почти отсутствуют изгибающие моменты и поперечные силы (3–7% от величины нагрузки), мы пришли к выводу, что данную форму плиты можно реализовать с применением технологии стендового безопалубочного формования. В настоящее время она признана одной из самых современных, позволяющей уменьшить численность обслуживающего персонала в 2–2,5 раза, энергоемкость на 50–70%, повысить производительность производства⁸[5]. При этом данная технология изготовления имеет ряд особенностей: не допускает установку поперечной арматуры (горизонтальной и вертикальной), в то время как форма сечения конструкции может быть практически любой.

¹ Власов В.З. Избранные труды, том I. Москва, Издательство Академии наук СССР, 1962. 528 с.

² Пособие по проектированию армированных конструкций (к СНиП 2.03.03-85). Москва, Стройиздат. 1989. 71 с.

³ Боровских А.В. Расчеты железобетонных конструкций по предельным состояниям и предельному равновесию. Москва, Издательство АСВ. 2002. 320 с.

⁴ Боровских А.В., Шугаев В.В. Силовое сопротивление перекрытий зданий из плит-оболочек. Тезисы докладов научной сессии МОО и научного совета РААСН. «Пространственные конструкции зданий и сооружений». Декабрь 2005. Москва. С.15–16.

⁵ Хайдуков Г.К. Расчет по предельным состояниям ступенчато-вспарушенных шатровых панелей: науч. сообщ., вып. 7. АСИА СССР. Москва, Госстройиздат, 1960. 110 с.

⁶ Селиванов А.В., Ререр Ф.Ф. Оптимизация конструкции железобетонной плиты-оболочки с учетом современных тенденций в строительстве [Электрон. ресурс] / А.В. Селиванов, Ф.Ф. Ререр // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: материалы Международной научно-практической конф. 7–9 декабря 2016 г. / СибАДИ. Омск, 2016. С. 209–216. – Режим доступа: <http://bek.sibadi.org/fulltext/ed2224.pdf>

⁷ Там же

⁸ Малышев А.А. Современные линии безопалубочного формования // Каталог-справочник. Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. 2009. Вып. 1. С. 20–23.

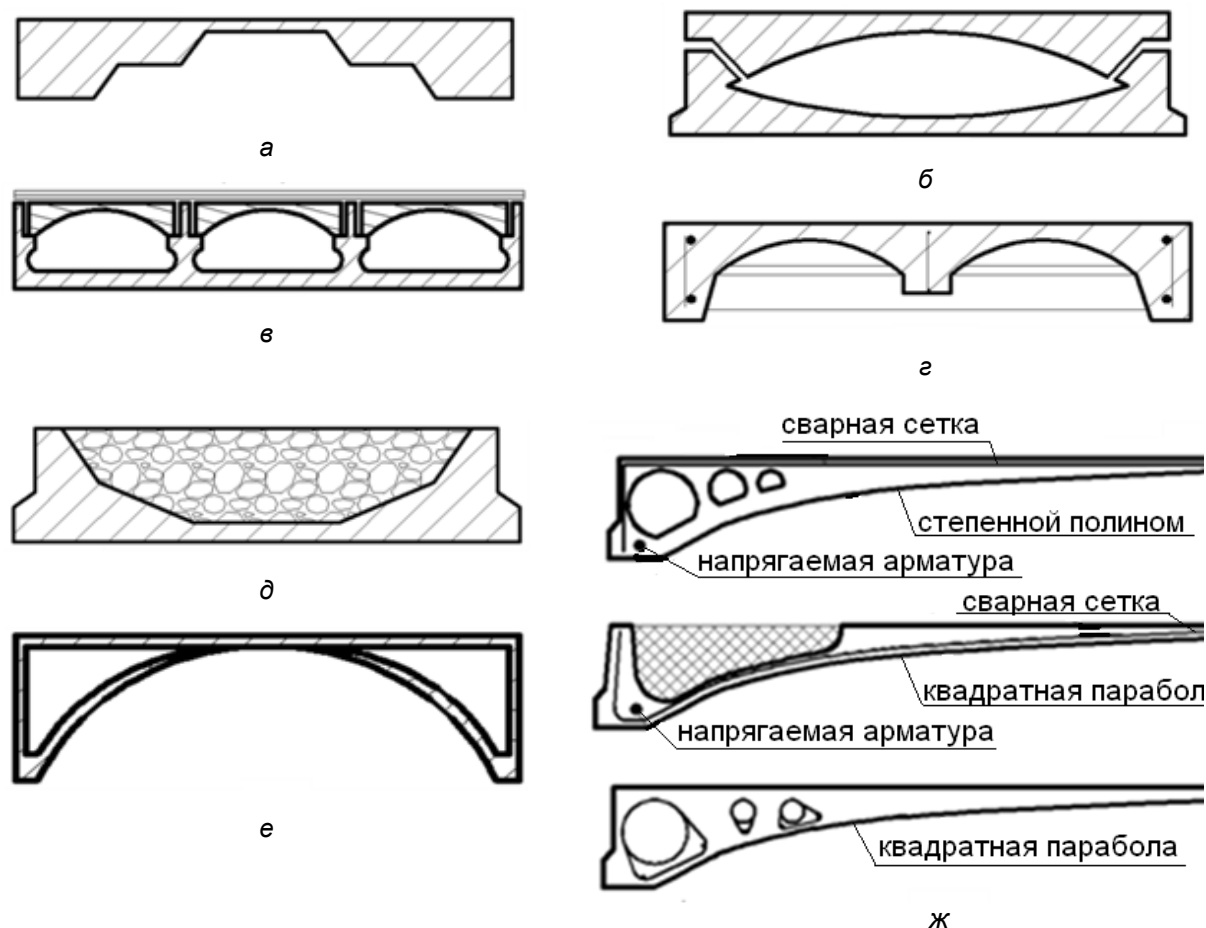


Рисунок 1 – Конструктивные решения вступарушенных и цилиндрических плит-оболочек:
 а – ступенчато-вступарушенная⁹; б – сдвоенная⁹; в – многопролетная¹⁰; г – кессонная¹¹;
 д – с многогранной верхней поверхностью¹²; е – полая¹³; ж – облепечённая [4]

Figure 1 – Structural solutions for curved and cylindrical slab shells:
 а – steyptype and curved⁹; б – double⁹; в – multi-span¹⁰; г – coffered¹¹;
 д – with multifaceted top surface¹²; е – hollow¹³; ж – lightweight [4]

⁹ А.с. 739200 СССР, МКИЗ Е 04 В 5/48. Перекрытие / С.В. Карапетян; Ереванский политехнический институт им. К. Маркса (СССР).N 2650709/29-33 ;заявл. 08.06.78 ;опубл. 05.06.80, Бюл. N21.

¹⁰ А.с. 1240845 СССР, МКИЗ Е 04 В 5/02. Перекрытие / Б.Н. Бастатский; Грузинский ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт энергетики и гидротехнических сооружений.N 3778380/29-33; заявл. 03.08.84; опубл. 30.06.86, Бюл. N24.

¹¹ А.с. 1300118 СССР, МКИЗ Е 04 В 7/00, Е 04 С 2/00. Железобетонная панель покрытия / О.Д. Дашкевич, В.И. Скрибо; Белорусский технологический институт им. С.М. Кирова.N 3745438/29-33; заявл. 28.05.84; опубл. 30.03.87, Бюл. N12.

¹² Пат. 2013505 РФ : МПК Е 04 В 5/18, Е 04 В 1/82 : Перекрытие / Б.Н. Бастатский, В.А. Федоров, Г.М. Кобахидзе ; Фирма «Гравитас». № 5012401/33; заявл. 25.11.1991; опубл. 30.05.1994, Бюл. № 5.

¹³ Пат. 2082858 РФ : МПК Е04 В 5/02 : Железобетонная плита покрытия / В. И. Травуш, Н. И. Карпенко ; В. И. Травуш. № 94004278 ;заявл. 10.02.1994; опубл. 27.06.1997, Бюл. № 7.

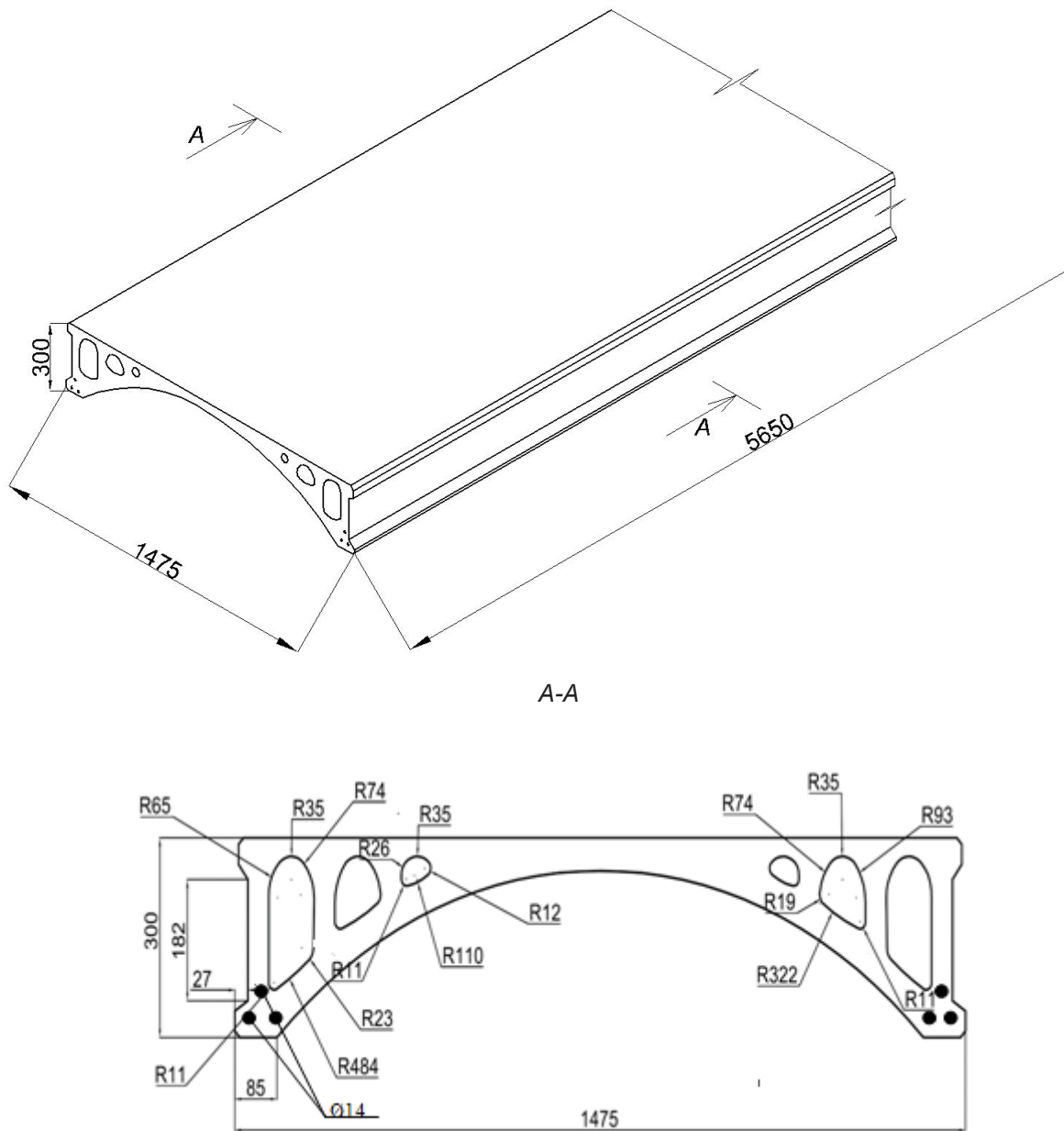
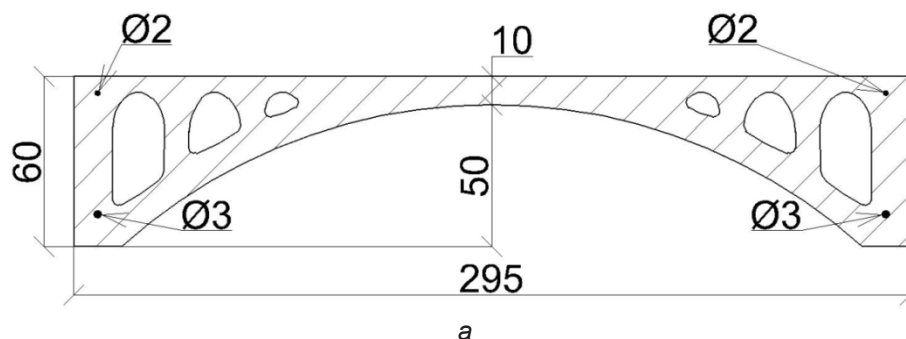


Рисунок 2 – Конструктивное решение плиты-оболочки
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Structural solution of the slab shell
Source: compiled by the authors.



б

Рисунок 3– Вид железобетонной модели:
а – чертёж поперечного сечения; б – фото торца
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Type of reinforced concrete model
a). cross section drawing; b). butt end photo
Source: compiled by the authors.

Нами была предложена железобетонная плита-оболочка¹⁴ [6, 7] (рисунок 2), изготовление которой возможно по технологии безопалубочного формования, включающая верхнюю горизонтальную полку и нижнюю изогнутую, продольные боковые и промежуточные ребра и продольные пустоты, размещенные между ребрами.

Цель выполненного экспериментального исследования состояла в изучении трещинообразования и предельного равновесия предложенной железобетонной плиты-оболочки перекрытия.

В объем исследования входили следующие задачи:

- испытание моделей исследуемой конструкции нагрузками, постепенно возрастающими

ми от их собственного веса до разрушающих;
– исследование трещинообразования и предельного равновесия плиты-оболочки с пустотами.

Для решения поставленных задач были изготовлены и испытаны железобетонные модели с соблюдением единого масштабного коэффициента 1:5 как в отношении генеральных размеров, так и размеров отдельных деталей конструкции (рисунок 3).

Их продольная рабочая арматура состояла из двух предварительно напряженных канатов диаметром 3 мм, расположенных в нижней части продольных контурных ребер, и двух гладких ненапрягаемых проволок диаметром 2 мм, расположенных в верхней части указанных ребер (см. рисунок 3).

¹⁴ Полез. модель 166449 РФ : МПК Е 04 В 5/43 : Железобетонная плита-оболочка / А.В. Селиванов, Ф.Ф. Переп ; СибАДИ. № 2016131534/03; заявл. 01.08.2016; опубл. 27.11.2016, Бюл. №33.

Модели изготавливались из пескобетона класса В35, позволяющего выполнять модели с требуемой толщиной элементов, в состав которого входят речной песок (фракции 2–3 мм), гранотсев (фракции 1,5–3 мм), портландцемент и различные добавки (пластификаторы, модификаторы), необходимые для повышения морозоустойчивости и ускорения времени твердения.

Его прочностные и деформационные характеристики были определены по результатам испытаний пяти контрольных призм с размерами 100x100x400 мм.

Призменная прочность (R_b) и модуль упругости бетона (E_b) были определены по методике ГОСТ 24452–80 и составили в среднем $R_b=25,5$ МПа, $E_b=20675$ МПа.

Нагружение образцов до уровня нагрузки, равной $(40\pm 5\%)P_p$, производилось ступенями, равными 10% ожидаемой разрушающей нагрузки, сохраняя в пределах каждой ступени скорость нагружения 0,6 МПа/с. Продольные относительные деформации призм рассчитывались на всех этапах нагружения, вплоть до их разрушения.

Модуль упругости (E_b) вычислен для каждого образца при уровне нагрузки, составляющем 30% от разрушающей, по формуле

$$E_b = \sigma_1 / \varepsilon_{1y},$$

где $\sigma_1 = P_1 / F$ – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки, равной 30% от разрушающей;

здесь P_1 – соответствующее приращение внешней нагрузки;

ε_{1y} – приращение упруго-мгновенной относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки $P_1 = 0,3 P_p$.

Осредненная диаграмма сжатия, построенная по результатам испытания пяти призм, представлена на рисунке 4.

Стальные канаты, использовавшиеся в качестве нижней продольной рабочей арматуры моделей, испытывались на растяжение на испытательной машине «ИР 5081-5».

Осредненная диаграмма растяжения, определенная по результатам испытания одиннадцати контрольных образцов, представлена на рисунке 5.

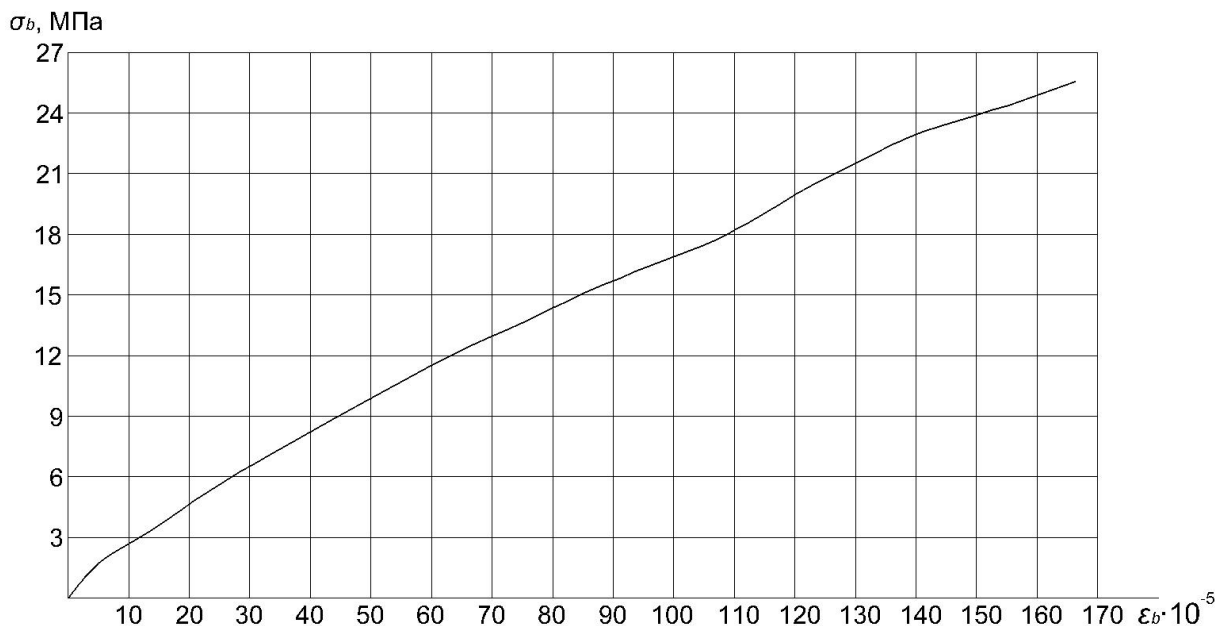


Рисунок 4 – Осредненная диаграмма сжатия мелкозернистого бетона, использованного для изготовления моделей плиты-оболочки перекрытия
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Averaged compression curve of fine-grained concrete used to make floor slab shell models
Source: compiled by the authors.

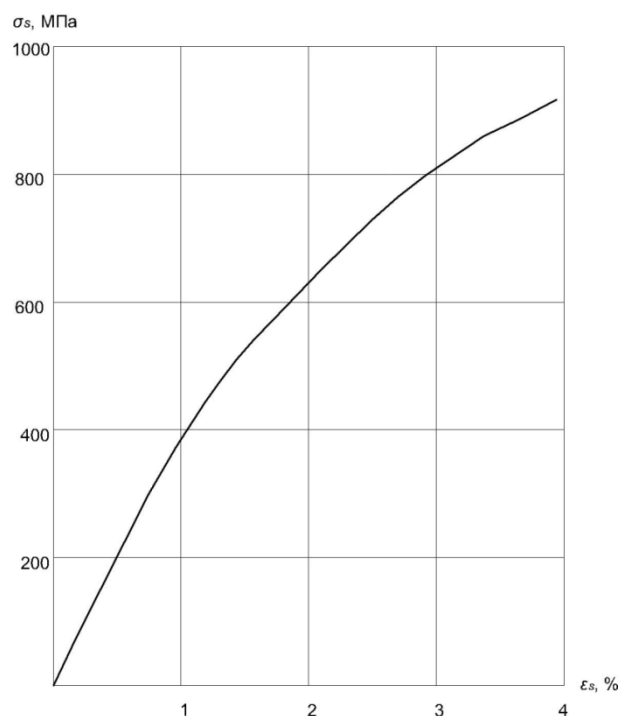


Рисунок 5 – Средненная диаграмма растяжения канатной арматуры моделей
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Average tension diagram of rope reinforcement of models
Source: compiled by the authors.

Осредненное временное сопротивление продольной рабочей арматуры модели плиты-оболочки, определенное по результатам ее испытаний, составляло

$$\sigma_u = R_{\text{раст}}^{\text{cp}} = 920 \text{ (МПа)}.$$

Нормативное сопротивление продольной рабочей арматуры модели плиты-оболочки рассчитывалось в соответствии с указаниями п.2.3.7 [8] и составляло

$$R_{\text{снм}} = \sigma_{0,2} = 0,8 \sigma_u = 0,8 R_{\text{раст}}^{\text{cp}} = 0,8 \cdot 920 = 736 \text{ (МПа)}.$$

Модели нагружались при помощи испытательной установки, позволяющей получить изгибающий момент, возникающий в середине пролета продольного контурного ребра, максимально приближенный к изгибающему моменту, возникающему в нем при действии равномерно распределенной нагрузки (рисунок 6).



Рисунок 6 – Испытательная установка
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Test setup
Source: compiled by the authors.

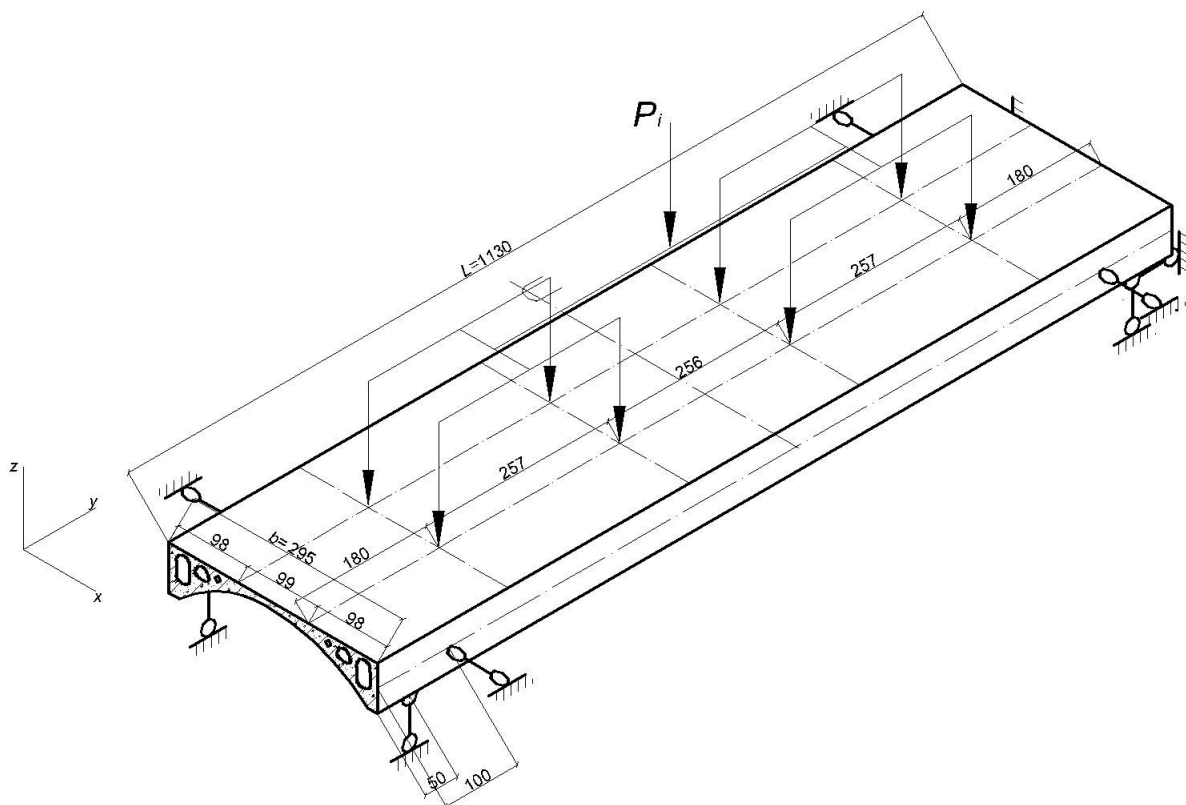


Рисунок 7 – Испытательная схема модели
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Model test circuit
Source: compiled by the authors.

Таблица
Распределение испытательной нагрузки по ступеням
 Источник: составлено авторами.

Table
Distribution of test load by stages
 Source: compiled by the authors.

№ ступени нагрузки	P_i , МН	q_i , МПа	q_i/q_n
0	0,00017	0,00051	0,042
(нагрузка от собственного веса испытательной установки)			
1	0,00031	0,00092	0,077
2	0,0006	0,0018	0,15
3	0,00117	0,004	0,33
4	0,00156	0,0052	0,43
5	0,00194	0,0058	0,48
6	0,00233	0,0075	0,625
(нагрузка, соответствующая моменту образования трещины в продольных ребрах модели $q_{кр}$)			
7	0,00289	0,0092	0,77
8	0,00327	0,0098	0,82
(нагрузка, контрольная по прочности для модели)			
9	0,0035	0,011	0,92
10	0,0046	0,014	1,17
(пределная (разрушающая) нагрузка)			

Испытательная схема модели показана на рисунке 7.

Испытание каждой модели проводилось постепенным нагружением ступенями, приведенными в таблице, составляющими по 10–15% от ее теоретической несущей способности.

Здесь P_i – сосредоточенная испытательная нагрузка, кН, прикладываемая на текущей ступени;

q_i – равномерно распределенная испытательная нагрузка, кПа, прикладываемая на текущей ступени;

$q_n = 0,012$ кПа – контрольная по прочности равномерно распределенная испытательная нагрузка, рассчитанная по фактическим прочностным характеристикам бетона и арматуры моделей.

Результаты экспериментальных исследований работы железобетонных панелей-оболочек и вспарушенных плит приведены в работах^{15, 16} [9, 10]. Вопросам их моделирования посвящены работы¹⁷ [11, 12, 13, 14, 15].

Аналогично изгибаемым элементам прямоугольного сечения при испытаниях моделей плиты-оболочки с пустотами по мере роста нагрузки установлены три стадии напряженно-деформированного состояния, характеризующие различную работу конструкции:

первая – упругая стадия работы бетона на растяжение в нижней части продольных контурных ребер;

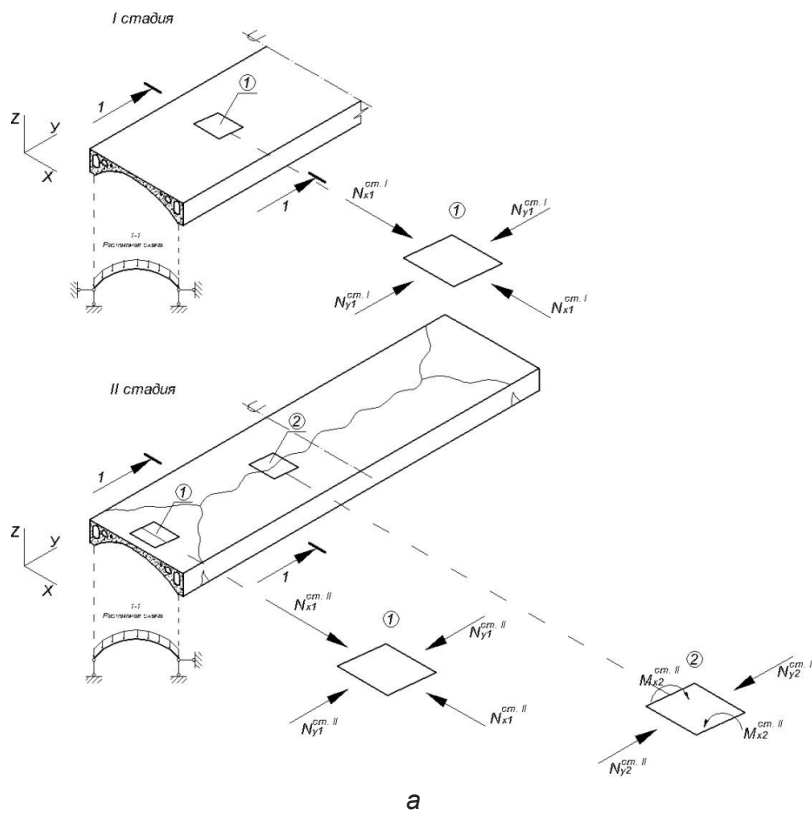
вторая – стадия образования и раскрытия трещин;

третья – стадия разрушения.

¹⁵ Дадашев Х.Д. Исследование вспарушенной плиты положительной гауссовой кривизны: автореф. дис. канд. техн. наук. Баку. 1972. 21 с.

¹⁶ Митякина Н.А. Деформирование составных покрытий из железобетонных панелей-оболочек и оболочек-вставок: автореф. дис. канд. техн. наук. Белгород. 2000. 20 с.

¹⁷ Руководство по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий. Москва, НИИЖБ, 1979. 421 с.



а



б

Рисунок 8 – Развитие трещин на второй стадии работы: а – рисунок; б – фото
 Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Development of cracks in the second stage of work:
 a). picture; b). a photo
 Source: compiled by the authors.

Первая стадия:
наблюдается при нагрузке

$$q_0 \leq q_1 < q_{crc} \quad (1)$$

где q_0 – суммарная нагрузка, складывавшаяся из нагрузки от собственной массы модели и нагрузки от собственной массы испытательной установки, опиравшейся на нее;

q_{crc} – нагрузка, соответствующая моменту образования трещины в продольных ребрах, составляющая согласно экспериментам $q_{crc} = (0.51 \dots 0.62) \cdot q_u$;

q_u – предельная (разрушающая) нагрузка, составившая в среднем по трем экспериментам $q_u = 1380 \text{ кгс/м}^2$.

Вторая стадия:
установлена при нагрузке

$$q_{crc} \leq q_2 < q_u \quad (2)$$

Исследования деформаций показали, что на второй стадии происходит изменение НДС

плиты-оболочки: в приопорной зоне продольного контурного ребра с появлением трещин появляется пластический шарнир (рисунок 8, а), что приводит к постепенному отключению распора. Полка плиты-оболочки постепенно разделяется на две области (см. рисунок 8, а).

В области №2 возникает изгибающий момент $M_{x2}^{ст. II}$, величина которого остается незначительной практически до разрушения конструкции. При этом установлена прямая связь между шириной раскрытия трещины в продольном контурном ребре и величиной поперечного изгибающего момента.

Третья стадия:
установлена при нагрузке

$$q_3 \cong q_u \quad (3)$$

Разрушение модели плиты-оболочки начинается с разрушения ее продольных контурных ребер вследствие разрыва арматуры либо потери связи арматуры с бетоном и последующим ее выскальзыванием (рисунок 9).

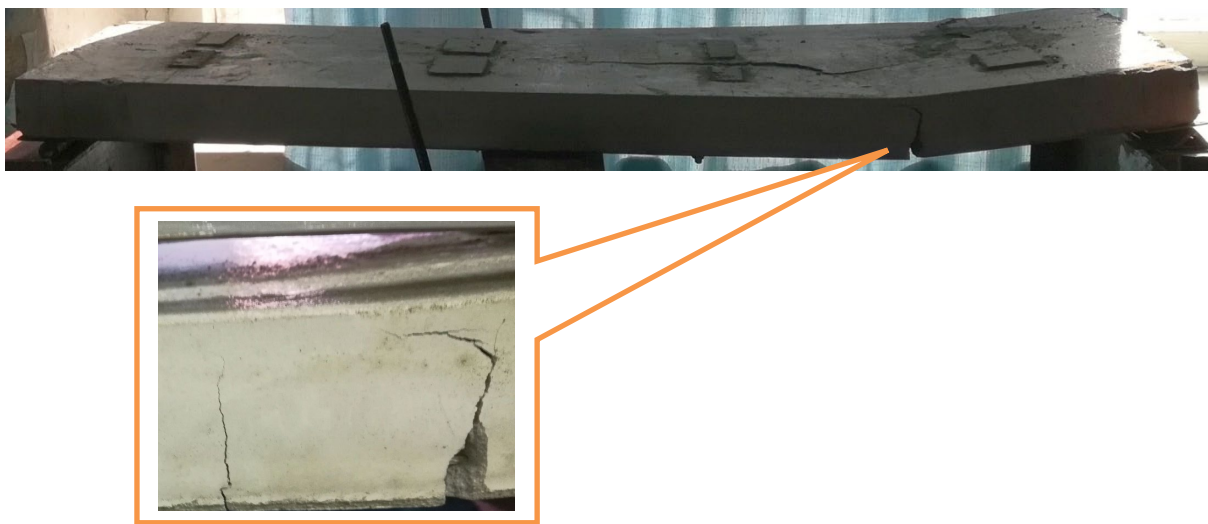


Рисунок 9 – Магистральная нормальная трещина в продольном контурном ребре
Источник: составлено авторами.

Figure 9 – Main normal crack in a longitudinal contour rib
Source: compiled by the authors.



а



б

Рисунок 10 – Сквозные продольные трещины, образующиеся в полке исследуемой плиты-оболочки, в стадии предельного равновесия: а – на верхней поверхности полки; б – на нижней поверхности полки
Источник: посавлено авторами.

Figure 10 – Through longitudinal cracks formed in the flange of the studied slab shell, in the stage of limit equilibrium: on the top surface of the flange; b) on the bottom of the flange
Source: compiled by the authors.

Далее происходит разрушение бетона в полке, начинающееся с образования сквозных диагональных трещин, находящихся на границе между областями 1 и 2, и заканчивающееся образованием сквозной продольной трещины в середине области 2 по ширине. Совокупная схема трещин, образующаяся при разрушении полки, имеет вид конверта (рисунок 10).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. При испытаниях моделей установлены три стадии напряженно-деформированного состояния:

первая – упругая стадия работы бетона на растяжение в нижней части продольных контурных ребер;

вторая – стадия образования и раскрытия трещин;

третья – стадия разрушения.

2. Разрушение плиты-оболочки начинается с разрушения ее продольных контурных ребер вследствие разрыва арматуры либо потери

связи арматуры с бетоном и последующим ее выскальзыванием.

Далее происходит разрушение бетона в полке, начинающееся с образования сквозных диагональных трещин, заканчивающееся образованием сквозной продольной трещины в середине полки по ширине.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Боровских А. В. Исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных плит-оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. М., 2008. С.82–86.

2. Боровских А. В. К вопросу о проектировании железобетонных перекрытий зданий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. №12(83). С.67–70.

3. John F. Abel. The future of spatial structures // Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures. Brentwood. UK: MultiSciencePublishingCoLtd., 2011. Pp. 485-490.

4. Баранова Т. И., Сильванович Т. Г., Бормотов А. Н., Селиванов М. Ю. Реализация конструкци-

онно-технологических особенностей железобетона при разработке новых типов панелей перекрытий // Известия вузов. Строительство. 1997. № 4. С. 7–9.

5. Копша С. П., Заикин В. А. Технология безопалубочного формования – ключ к модернизации промышленности и снижению себестоимости жилья // Технологии бетонов. 2013. №11. С. 29–33.

6. Селиванов А. В., Регер Ф. Ф. Результаты экспериментальных исследований железобетонной плиты-оболочки // Вестник СибАДИ. 2019;16(3):378-392. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-378-392>.

7. Селиванов А. В., Регер Ф. Ф., Чакурин И. А. О влиянии конструктивных особенностей на напряженно-деформированное состояние (НДС) железобетонной плиты-оболочки перекрытия. *Вестник СибАДИ*. 2022;19(3):446–460. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-446-460>.

8. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции: Общий курс. М.: Стройиздат. 1991. 767 с.

9. Хайдуков Г. К. Экспериментальное исследование предварительно-напряженных ступенчато-вспарушенных (шатровых) панелей. Вып. 11. М. 1961. 109 с.

10. Хайдуков Г. К., Магерамов Э. А. Исследование предварительно-напряженных сборных пологих панелей-оболочек переменной толщины на квадратном плане // Труды Азербайджанского НИИ-Истроматериалов им. В.А. Дадашева. 1967. 52 с.

11. Людковский А. М. О выборе масштаба при моделировании железобетонных оболочек // Пространственные конструкции зданий и сооружений. М.: Стройиздат. 1985. Вып.5. С.75–81.

12. Стельмах С. И., Хайдуков Г. К. Рекомендации по исследованию пространственных конструкций на моделях // Пространственные конструкции зданий и сооружений. М. 1972. Вып.1. С.164–181.

13. Хайдуков Г. К., Шугаев В. В., Краковский М. Б. Моделирование при исследовании железобетонных пространственных конструкций // Расчет и проектирование железобетонных конструкций. М. Стройиздат. 1972.

14. Чиненков Ю. В. Методика исследования оболочек и складок на моделях // Труды института НИИЖБ Госстроя СССР. М.1974. Вып. 9. Исследования железобетонных пространственных конструкций на моделях.

15. Ярмульник Ф. В., Шарапов Г. В., Гайдук В. Г. Методика подбора материала при исследованиях железобетонных конструкций на моделях. Киев. 1975.

REFERENCES

1. Borovskih A. V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya zhelezobetonyh plit-obolochek [Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete shell plates]. *Obzorno-analiticheskij i nauchno – tehniceskij zhurnal Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*. Moscow, 2008. pp.82-86. (In Russ.)

2. Borovskih A. V. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya zhelezobetonyh plit-obolochek [Investigation of the stress-strain state of reinforced concrete shell plates]. *Obzorno-analiticheskij i nauchno – tehniceskij zhurnal Stroitel'naja mehanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*. Moscow, 2008. pp.82-86. (In Russ.)

3. John F. Abel. The future of spatial structures // Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures. Brentwood. UK: Multi Science Publishing Co Ltd., 2011. pp. 485-490.

4. Baranova T. I., Sil'vanovich T. G., Bormotov A. N., Selivanov M. Ju. Realizacija konstrukcionno-tehnologicheskij osobennostej zhelezobetona pri razrabotke novyh tipov panelej perekrytij [Implementation of structural and technological features of reinforced concrete in the development of new types of floor panels]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo*. 1997; 4: 7–9. (In Russ.)

5. Kopsha S. P., Zaikin V. A. Tehnologija bezopalubochnoogo formovaniya – kljuch k modernizacii promyshlennosti i snizheniju sebestoimosti zhil'ja [Technology of formless molding – the key to modernization of industry and reduction of housing costs]. *Tehnologii betonov*. 2013; 11: 29-33. (In Russ.)

6. Selivano A.V., Reger F.F. Results of experimental research of the reinforced concrete shell-slab. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019;16(3):378-392. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-3-378-392>

7. Selivanov A.V., Reger F.F., Chakurin I.A. On influence of structural features on stress-strain state of a reinforced concrete floor slab. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2022;19(3):446-460. (In Russ.) <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-446-460>

8. Bajkov V. N., Sigalov Je. E. *Zhelezobetonnye konstrukcii: Obshhij kurs* [Reinforced concrete structures: General course]. Moscow: Strojizdat. 1991. 767 p. (In Russ.)

9. Hajdukov G. K. *Jeksperimental'noe issledovanie predvaritel'no-naprjazhennyh stupenchatovo-vsparushennyh (shatrovyh) panelej* [Experimental study of pre-stressed step-raised (hipped) panels]. Vyp. 11. Moscow, 1961. 109 p. (In Russ.)

10. Hajdukov G. K., Mageramov Je. A. Issledovanie predvaritel'no-naprjazhennyh sbornyh pologih panelej-obolochek peremennoj tolshhiny na kvadratnom plane [Investigation of prestressed prefabricated sloping panels-shells of variable thickness on a square plan]. *Trudy Azerbajdzhanskij NIISTrojmaterialov im. V. A. Dadasheva*. 1967. 52 p. (In Russ.)

11. Ljudkovskij A. M. *O vybore masshtaba pri modelirovanii zhelezobetonyh obolochek* [On the choice of scale in the modeling of reinforced concrete shells // Spatial structures of buildings and structures]. Prostranstvennye konstrukcii zdaniy i sooruzhenij. Moscow: Strojizdat. 1985. Vyp.5. pp.75-81. (In Russ.)

12. Stel'mah S. I., Hajdukov G. K. *Rekomendacii po issledovaniju prostranstvennyh konstrukcij na modeljah* [Recommendations for the study of spatial structures on models]. *Prostranstvennye konstrukcii zdaniy i sooruzhenij*. Moscow, 1972; Vyp.1:164-181. (In Russ.)

13. Hajdukov G. K., Shugaev V. V., Krakovskij M. B. Modelirovanie pri issledovanii zhelezobetonnyh prostanstvennyh konstrukcij [Modeling in the study of reinforced concrete spatial structures]. *Raschet i konstruirovaniye zhelezobetonnyh konstrukcij*. Moscow, Strojizdat. 1972. (In Russ.)

14. Chinenkov Ju. V. Metodika issledovaniya obo lochek i skladok na modeljah [Methodology for the study of shells and folds on models]. *Trudy instituta/NIIZhB Gosstroja SSSR*. M.1974. vyp. 9. Issledovaniya zhelezobetonnyh prostanstvennyh konstrukcij na modeljah. (In Russ.)

15. Jarmul'nik F. V., Sharapov G. V., Gajduk V. G. *Metodika podbora materiala pri issledovaniyah zhelezobetonnyh konstrukcij na modeljah* [Technique of selection of material in the study of reinforced concrete structures on models]. Kiev. 1975. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Селиванов А. В. Подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, оформление статьи. Вклад соавтора составляет 40%.

Регер Ф. Ф. Руководство и участие в подготовке и проведении экспериментальных исследований, анализ полученных результатов, редактирование статьи. Вклад соавтора составляет 40%.

Чакурин И. А. Редактирование и оформление статьи. Вклад соавтора составляет 20%.

CONTRIBUTION OF CO-AUTHORS

Anton V. Selivanov. Preparation and conduct of experimental studies, processing of the results, the design of the article. The contribution of the co-author is 40%.

Fedor F. Reger. Management and participation in the preparation and conduct of experimental studies, analysis of the results, editing the article. The contribution of the co-author is 40%.

Ivan A. Chakurin. Editing and design of the article. The contribution of the co-author is 20%.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Селиванов Антон Валерьевич – ст. преп., кафедры «Мосты и тоннели».

Регер Федор Федорович – канд. с.-х. наук.

Чакурин Иван Алексеевич – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные конструкции».

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Anton V. Selivanov – Senior Lecturer, Bridges and Tunnels Department.

Fedor F. Reger – Cand. of Sci.

Ivan A. Chakurin – Cand. of Sci., Associate Professor, Bridges and Tunnels Department.