УДК 624.074
doi: 10.33622/0869-7019.2022.04.51-56

Большепролетные сегментные своды из крупноразмерных железобетонных сводчатых панелей-оболочек

Дмитрий Владимирович ПАСХИН, зам. зав. лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций, moo-shell@mail.ru

Борис Сергеевич СОКОЛОВ, кандидат технических наук, зав. лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций, moo-shell@mail.ru

НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 109428 Москва, 2-я Институтская ул., 6, корп. 5

Аннотация. *Одно из перспективных направлений исследований в области эффективных конструктивных решений сборных большепролетных сводов — применение крупноразмерных железобетонных сводчатых панелей-оболочек. В конструкции свода сборные железобетонные панели данного типа объединяются стальной затяжкой и пространственной системой стальных связей с элементами, позволяющими регулировать напряженное состояние системы связей на всех этапах работы конструкции для предотвращения потери устойчивости большепролетной системы свода. На основе результатов выполненных исследований разработаны нормативные требования и рекомендации по проектированию таких сводов. Внесенные в свод правил дополнения представляют собой положения по расчету и конструированию сегментных сводов данного типа, узловых соединений элементов, рекомендации по монтажу и назначению общих конструктивных параметров сводов. Введение предложенных положений в нормативный документ позволяет расширить практику проектирования и строительства рассмотренных прогрессивных экономичных конструкций, повысить эффективность проектных решений большепролетных зданий и отказаться от устаревших конструктивных решений монолитных или сборно-монолитных большепролетных покрытий, возводимых по высокозатратным технологиям.*

Ключевые слова: *крупноразмерные железобетонные сводчатые панели-оболочки, конструктивные параметры, большепролетное покрытие, сегментный свод, сборный железобетон*

Для цитирования: *Пасхин Д. В., Соколов Б. С.* Большепролетные сегментные своды из крупноразмерных железобетонных сводчатых панелей-оболочек // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 51—56. doi: 10.33622/0869-7019.2022.04.51-56

LARGE-SPAN SEGMENTAL VAULTS MADE OF LARGE-SIZE REINFORCED CONCRETE VAULTED PANEL-SHELLS

Dmitry V. PASKHIN, moo-shell@mail.ru

Boris S. SOKOLOV, moo-shell@mail.ru

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A. A. Gvozdev, Research Center of Construction, 2-ya Institutskaya ul., 6, korp. 5, Moscow 109428, Russian Federation

Abstract. *One of the promising directions of research in the field of effective structural solutions of prefabricated large—span vaults is the use of large-sized reinforced concrete vaulted panel-shells. In the structure of the vault, precast reinforced concrete panels of this type are combined by a steel tightening and a spatial system of steel connections with elements that make it possible to regulate the stress state of the connection system at all stages of the structure operation to prevent the loss of stability of the large-span vault system. Based on the results of the research carried out, regulatory requirements and recommendations for the design of such vaults have been developed. The additions made to the Code of rules are provisions for the calculation and design of segmental vaults of this type, nodal connections of elements, recommendations for installation and assignment of general design parameters of vaults. The introduction of the proposed provisions into the regulatory document makes it possible to expand the practice of designing and constructing the progressive economical structures considered, increase the efficiency of design solutions for large-span buildings and abandon outdated design solutions for monolithic or prefabricated monolithic large-span coatings erected using high-cost technologies.*

Keywords: *large-size reinforced concrete vaulted panel-shells, design parameters, large-span coating, segmental vault, precast reinforced concrete*

For citation: Paskhin D. V., Sokolov B. S. Large-Span Segmental Vaults Made of Large-Size Reinforced Concrete Vaulted Panel-Shells. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 4, pp. 51—56. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.04.51-56

© ПАСХИН Д. В., СОКОЛОВ Б. С., 2022

Большепролетные конструкции покрытий, имеющие форму сводов, весьма востребованы в современном строительстве. Область применения сводов достаточно широка: покрытия промышленных зданий (цеха, ангары, доки, эллинги и т. д.), зданий гражданского строитель-

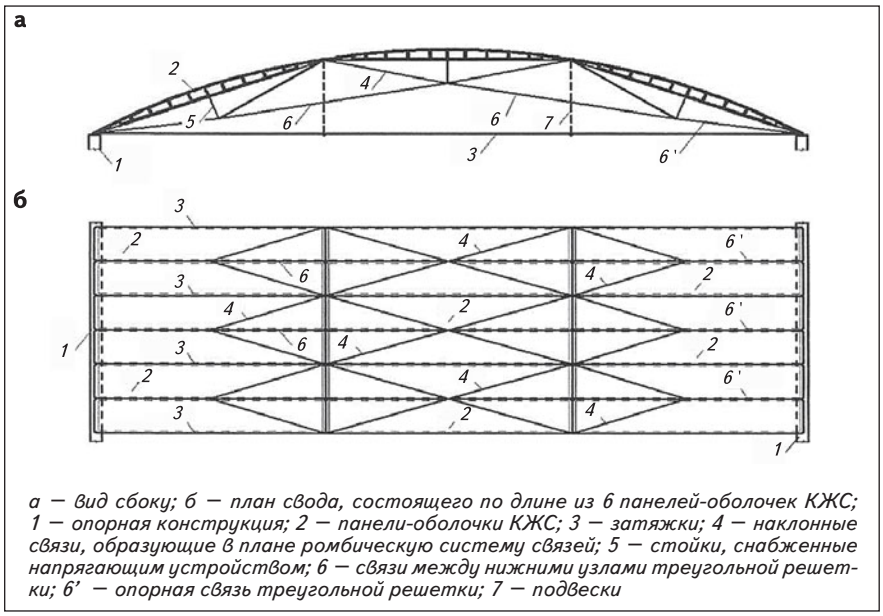
ства (торговые, спортивные, выставочные комплексы), сооружений транспортной инфраструктуры (автобусные парки, вокзалы, аэропорты и т. д.).

Наряду с конструктивными решениями из металлических и деревянных конструкций известны примеры эффективного применения армоцементных и железобетонных сводов в монолитном или сборном исполнении.

Отечественный и зарубежный опыт применения железобетонных сводов обобщен в ряде публикаций [1—4] и рекомендациях нормативных документов[1] разных лет по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий [5].

Результаты проводимых научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ в области конструктивных решений сборных сводов становятся основой для совершенствования нормативной базы проектирования таких конструкций, а также расширения их применения в строительстве. Цель исследования — разработка дополнений к нормам по проектированию сборных железобетонных сводов.

Одним из направлений исследований в области эффективных конструктивных решений сборных большепролетных сводов, в течение ряда лет выполнявшихся в лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А. А. Гвоздева под руководством проф. В. В. Шугаева, являются своды с применением сборных крупноразмерных железобетонных сводчатых панелей-оболочек (КЖС). В основе этого конструктивного решения лежат исследования проф. Р. Н. Мацелинского, предложившего выполнять своды сборными из двух панелей-оболочек КЖС с шарнирным узлом их сопряжения



а — вид сбоку; б — план свода, состоящего по длине из 6 панелей-оболочек КЖС; 1 — опорная конструкция; 2 — панели-оболочки КЖС; 3 — затяжки; 4 — наклонные связи, образующие в плане ромбическую систему связей; 5 — стойки, снабженные напрягающим устройством; 6 — связи между нижними узлами треугольной решетки; 6' — опорная связь треугольной решетки; 7 — подвески

Рис. 1. ***Конструктивная система сегментного свода из трех панелей-оболочек КЖС***

в шелыге и соединением опор стальными затяжками [6, 7]. Такие трехшарнирные своды нашли применение в сельскохозяйственном строительстве.

Конструктивное решение сегментных сводов из трех панелей-оболочек КЖС [8] включает в себя воспринимающие распор стальные затяжки между шарнирными опорами, но существенно отличается появлением двух пролетных шарниров вместо одного в шелыге и наличием развитой системы связей *(рис. 1).*

Пространственная система, образованная ромбической системой связей, обеспечивает высокую степень устойчивости конструкции, способствует перераспределению усилий, особенно при односторонней нагрузке на свод, а также сохранению «живучести» конструкции при непредвиденном выходе из строя какого-либо элемента.

Представленная конструкция сегментного свода всесторонне изучена [9—13]. На завершающем этапе исследований была разработана методика расчета сводов методом конечных элементов с учетом их нелинейной работы. Расчеты по этой методике показали близкое соответствие результатам, полученным в исследованиях железобетонной модели свода. На основе комплекса многовариантных расчетов было проанализировано влияние отдельных технических параметров и закономерностей их изменения на напряженно-деформированное состояние конструкции. Обобщение полученных данных позволило разработать предложения по нормированию технических параметров несущих конструкций покрытий одноэтажных большепролетных каркасных зданий с применением сборных железобетонных панелей-оболочек [13].

В 2021 г. разработано изменение № 2 к СП 387.1325800.2018 «Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Правила проектирования» в виде дополнения разделов «Своды» и «Сегментные своды из панелей-оболочек КЖС».

Раздел «Своды» дополнен рекомендациями по расчету сборных сводов методом конечных элементов в части формирования

[1] СП 387.1325800.2018 «Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Правила проектирования».

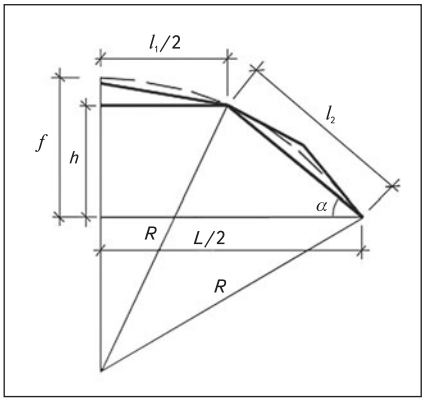


Рис. 2. *К расчету геометрии свода*

расчетной модели. Рекомендации распространяются на любые конструктивные решения сборных сводов, а также ориентированы на конкретные конструктивные решения. В частности, для сегментных сводов из трех панелей-оболочек рекомендовано работу конструкции рассматривать в монтажной и эксплуатационной стадиях на отдельных расчетных моделях. Для этого систему связей в расчетной модели следует выполнять соответствующей моделируемой стадии работы конструкции.

Отдельным указанием предписано рассматривать действие на свод снеговых нагрузок по двум схемам их распределения в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» для сводчатых покрытий. При этом для каждой из расчетных комбинаций нагрузок необходимо выполнять проверку общей устойчивости свода.

При конструировании вертикальных конструкций здания с покрытием в виде сегментных сводов следует учитывать, что вследствие продольных деформаций затяжки на опорные конструкции, помимо вертикальных нагрузок, передается часть усилия распора свода. Значения этих усилий определяются расчетом несущего каркаса здания совместно с покрытием.

Рекомендуемые параметры сводов из трех панелей КЖС

Комбинация длин панелей $l_2 - l_1 - l_2$, м	Расчетные пролеты свода, м	Оптимальные значения	
		пролета свода L, м	угла наклона крайней панели α, град
18–18–18	49–51	50	27,27
18–24–18	54,5–56,5	55,5	28,96
24–18–24	60–62	61	26,38
24–24–24	65,5–67,5	66,5	27,7

Особенности конструирования сегментных сводов из трех панелей-оболочек КЖС и технология их монтажа изложены в дополнении к разделу «Сегментные своды из панелей-оболочек КЖС».

Для сводов из двух панелей-оболочек рекомендовано принимать панели-оболочки КЖС длиной 12, 18 и 24 м, а для сегментных сводов из трех панелей – 18 и 24 м.

Конструктивная проработка показала, что возможно применение конструктивных решений, в которых использована комбинация панелей разной длины. Так, например, при крайних панелях пролетом $l_2 = 24$ м в средней части может использоваться панель $l_1 = 18$ м. Сочетания панелей разного пролета расширяют возможность выбора и оптимизации конструктивных решений в зависимости от требуемого размера пролета свода.

Наиболее рациональным очертанием свода в общем случае является дуга условного радиуса R, проходящая через его опорные и промежуточные узлы *(рис. 2)*.

Геометрия такого свода определяется следующим образом:

$$R = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + t^2},$$

где L – длина пролета свода; $t = \frac{1}{4h}(L^2 + Ll_1 + 2l_2^2)$; $h = \frac{1}{2}\sqrt{4l_2^2 - (L - l_1)^2}$.

Условная стрела подъема свода:

$$f = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2}.$$

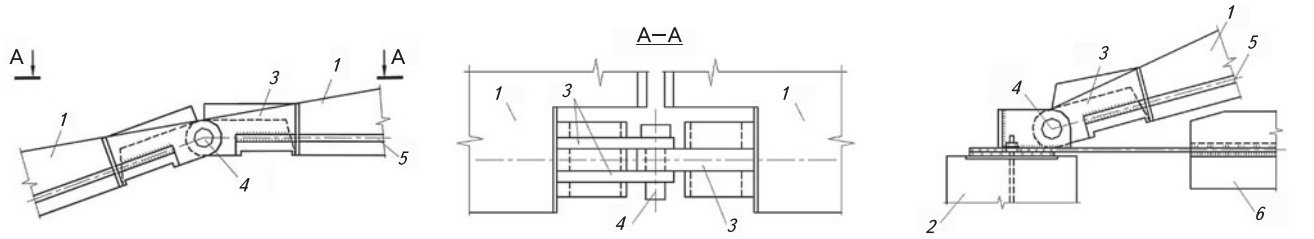
Для сводов из двух панелей-оболочек стрелу подъема сводов f, очерченных по дуге окружности, рекомендуется принимать равной 1/7 пролета L.

Для сводов из трех панелей-оболочек рекомендуемые значения отношения стрелы подъема к длине пролета свода находятся в пределах $f/L = 0{,}17...0{,}21$.

Для различных комбинаций длин панелей получены удовлетворяющие этим условиям значения пролетов сводов *(см. таблицу)*.

Приведенная в нормах общая для сводов из двух и трех панелей КЖС рекомендация о выборе значений отношения радиуса кривизны сегментного свода к длине пролета в пределах $R/L = 0{,}8...1$ нуждается в уточнении. Как показали выполненные многовариантные расчеты сегментных сводов из трех панелей с различными комбинациями длин, границы рациональных значений этого коэффициента оказались несколько ниже (0,7–0,85). В этой связи в отношении сводов из трех панелей предлагается в дальнейшем внести в нормы данное уточнение.

В числе рекомендаций по конструированию сборных сводов приведены положения по устройству затяжек, опорных и пролетных шарнирных узлов, системы связей, по параметрам сечений



1 — панель-оболочка КЖС; 2 — опорная балка; 3 — закладные детали с отверстием; 4 — шарнир; 5 — арматурные стержни; 6 — основная затяжка

Рис. 3. ***Шарнирное соединение плит между собой и с опорными балками***

железобетонных элементов и их армированию.

В каждой секции свода из двух панелей-оболочек КЖС (монтажной секции) должны быть предусмотрены две затяжки. В своде из трех панелей-оболочек КЖС, у которых внутренняя пространственная система образована ромбической системой связей, обеспечивающей повышенную жесткость сводчатого покрытия, затяжки допускается располагать в швах каждой второй панели.

Рекомендуется устройство строительного подъема средней части затяжки размером 0,4—0,6 % длины пролета свода для компенсации прогибов конструкции.

Опорный (ключевой для свода из двух панелей) и пролетные узлы свода проектируют по принципу цилиндрического шарнира, расположенного в закладной детали с отверстием, приваренной к рабочей арматуре диафрагмы. В узле соединяются закладные детали двух швов — с одной и двумя пластинами, причем суммарная толщина двух крайних пластин одной из деталей равна толщине средней пластины другой детали (сечение А—А, *рис. 3*). Образование шарнирного соединения двух панелей-оболочек обеспечивается пропуском металлического стержня (шарнира) в совмещенные отверстия пластин двух закладных деталей.

Опорный шарнир устраивают по типу ключевого, причем у крайних панелей опорная закладная деталь включает в себя две пластины, между которыми располагается металлическая пластина упора затяжки. Оси затяжки опорного шарнира и опорной конструкции должны быть сцентрированы в опорном узле свода.

В панелях-оболочках КЖС, предназначенных для угловых зон покрытий сводами из трех панелей-оболочек, рекомендуется выполнять утолщение поля на 25 % на 1/3 длины панели от опоры свода. Утолщение может быть выполнено также в сборно-монолитном варианте в виде армированной набетонки.

Армирование диафрагм и оболочки следует назначать по расчету, но не менее конструктивного минимума согласно СП 387.1325800. Стержни-подвески в вертикальных ребрах жесткости диафрагм выполняют двойными, в вутах сопряжения оболочки с диафрагмами необходимо устанавливать конструктивные сетки.

Для исключения сжимающих усилий в наклонных элементах системы связей *4* и в дополнительных стержнях *6* (*см. рис. 1*) рекомендуется в процессе сборки сегментного свода из трех панелей-оболочек создавать предварительные растягивающие усилия, обеспечивающие компенсацию в связях усилий сжатия при всех расчетных комбинациях нагружений. Предварительные растягивающие усилия в стержневых наклонных связях *4* создают с помощью стоек *5* системы связей монтажного блока, оборудованных устройством, позволяющим придавать им удлинение.

Значения отношения высоты стойки к длине панели рекомендуется принимать в пределах 0,14—0,2. Сечение стойки нужно принимать таким, чтобы требуемое для обеспечения работы системы связей усилие предварительного напряжения в этой стойке не превышало 50 % ее несущей способности.

Растягивающее напряжение в стержневых элементах *6* создают с помощью различных устройств (простейшее — талреп).

Преднапряжение указанных элементов необходимо выполнять в последовательности, определенной проектом производства работ, с контролем натяжения, например по удлинению или иными способами контроля, принятыми для преднапряженных конструкций.

Монтаж сводчатого покрытия рекомендуется вести укрупненными монтажными блоками, состоящими из двух панелей-оболочек КЖС, соединенных по длинной стороне сваркой закладных деталей с установкой наклонных связей *4* — для средних блоков или наклонных связей *4* и *6'* — для крайних блоков, напрягаемых на сборочном стенде удлинением стойки *5* (*см. рис. 1).*

Монтаж свода производится с использованием стоек, способных нести вес блоков и других элементов свода до их объединения в единую конструкцию. Монтаж блоков следует выпол-

нять с применением соответствующих траверс с захватом за строповочные приспособления.

Раскружаливание свода выполняется после устройства шарнирных соединений в опорных и пролетных узлах, монтажа затяжек и натяжения элементов системы связей.

Преимущества сборной конструкции свода в том, что исключаются характерные для монолитных или сборно-монолитных большепролетных конструкций этапы возведения, заключающиеся в устройстве сложной, трудоемкой и дорогостоящей криволинейной опалубки или пространственной монтажной опорной системы, предназначенной нести вес железобетонной конструкции до момента раскружаливания (полной готовности конструкции к работе). Кроме того, изготовление сборных элементов (панелей-оболочек) в заводских условиях позволяет обеспечить их тонкостенность при высоком качестве изделий, тем самым повысить эффективность конструкции без снижения надежности и безопасности, снизить долю ручного труда и максимально повысить индустриальность возведения.

Выводы

1. Выполнена разработка изменения № 2 к СП 387.1325800 в части дополнения разделов «Своды» и «Сегментные своды из панелей-оболочек КЖС» на основе результатов комплекса экспериментально-теоретических исследований и проектно-конструкторских работ в области конструктивных решений большепролетных сегментных сводов из трех панелей-оболочек КЖС.

2. Внесенные в свод правил дополнения представляют собой положения по расчету и конструированию сегментных сводов данного типа, рекомендации по назначению общих конструктивных параметров сводов и конструированию узловых соединений элементов свода, а также рекомендации по их монтажу.

3. Введение предложенных положений в нормативный документ позволяет обеспечить расширение практики проектирования и строительства рассмотренных прогрессивных экономичных конструкций, повысить эффективность проектных решений большепролетных зданий и сооружений, отказаться от устаревших конструктивных решений монолитных или сборно-монолитных большепролетных покрытий, возводимых по высокозатратным технологиям.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Каталог рекомендуемых типов пространственных конструкций для применения при строительстве общественных зданий с большими пролетами. Л. : Стройиздат, Ленинградское отд-е, 1977. 160 с.
2. *Рабинович А. И.* Сборный складчатый свод пролетом 54 м из плоских панелей // Бетон и железобетон. 1975. № 12. С. 28–33.
3. *Миронков Б. А.* Тонкостенные сводчатые конструкции покрытий. Л. : Госстройиздат, Ленинградское отд-е, 1963. 194 с.
4. *Рюле Г.* Пространственные покрытия. М. : Стройиздат, 1973. 304 с.
5. Руководство по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий. М. : Стройиздат, 1979. 421 с.
6. *Мацелинский Р. Н.* Расчет систем, составленных из панелей-оболочек КЖС // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. № 3. С. 41–48.
7. *Мацелинский Р. Н., Милейковский И. Е., Спаннут Л. С., Дашков А. Г.* Сводчатое покрытие. URL: https://patents.su/6-885483-svodchatoe-pokrytie.html (дата обращения: 25.02.2022).
8. Пат. РФ 2298069. Сборное железобетонное сводчатое покрытие / *В. В. Шугаев, Б. С. Соколов, Д. В. Пасхин*. Опубл. 27.04.2007. Бюл. № 12.
9. *Shugaev V. V., Sokolov B. S., Paskhin D. V.* Wide-span precast reinforced concrete vaulted roof structure [Большепролетная сборная железобетонная сводчатая конструкция покрытия] // Proc. of the IASS-APCS Int. Symp. "New Olympics. New Shell and Spatial Structures", Oct. 16–19, 2006. China. Pp. 64–65.
10. *Шугаев В. В., Соколов Б. С., Пасхин Д. В.* Разработка и исследование сборного большепролетного покрытия из железобетонных панелей-оболочек КЖС // Бетон и железобетон. 2007. № 4. С. 7–8.
11. *Шугаев В. В., Соколов Б. С., Пасхин Д. В.* Экспериментально-теоретические исследования сводчатого покрытия из панелей-оболочек КЖС // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 5. С. 67–72.
12. *Соколов Б. С., Пасхин Д. В., Пшеничников А. В.* Современные конструктивные решения сборных железобетонных большепролетных сводов покрытий // Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 150-летию со дня рождения А. Ф. Лолейта (Москва, 30 ноября 2018 г.). М. : МИСИ–МГСУ, 2018. С. 398–404.
13. *Пасхин Д. В., Соколов Б. С.* Анализ технических параметров сборного большепролетного сегментного свода из панелей-оболочек КЖС // Бетон и железобетон. 2020. № 2(602). С. 19–27.

R E F E R E N C E S

1. *Katalog rekomenduyemykh tipov prostranstvennykh konstruktsiy dlya primeneniya pri stroitel'stve obshchestvennykh zdaniy s bol'shimi proletami* [Catalog of recommended types of spatial structures for use in the construction of public buildings with large spans]. Leningrad, Strojizdat Publ., Leningradskoe otd-e, 1977. 160 p. (In Russ.).
2. Rabinovich A. I. A prefabricated folded vault with a span of 54 m made of flat panels]. *Beton i zhelezobeton*,1975, no. 12, pp. 28–33. (In Russ.).
3. Mironkov B. A. *Tonkostennyye svodchatyye konstruktsii pokrytiy* [Thin-walled vaulted roof structures]. Leningrad, Gosstrojizdat Publ., Leningradskoe otd-e, 1963. 194 p. (In Russ.).
4. Ryule G. *Prostranstvennyye pokrytiya* [Spatial roofs]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973. 304 p. (In Russ.).
5. *Rukovodstvo po proyektirovaniyu zhelezobetonnykh prostranstvennykh konstruktsiy pokrytiy i perekrytiy* [Guide for the design of reinforced concrete spatial structures of roofs and floors]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. 421 p. (In Russ.).
6. Matselinskiy R. N. Calculation of systems made up of KZhS shell-panels. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 1977, no. 3, pp. 41–48. (In Russ.).
7. Matselinskiy R. N., Mileykovskiy I. E., Spannut L. S., Dashkov A. G. Vaulted roof.
Availsble at: https://patents.su/6-885483-svodchatoe-pokrytie.html (accessed 25.02.2022). (In Russ.).
8. Pat. Russian Federation 2298069. *Precast reinforced concrete vaulted roof* / V. V. Shugayev, B. S. Sokolov, D. V. Paskhin. Publ. 27.04.2007. Bul. no.12. (In Russ.).
9. Shugaev V. V., Sokolov B. S., Paskhin D. V. Wide-span precast reinforced concrete vaulted roof structure. *Proc. of the IASS-APCS Int. Symp. "New Olympics. New Shell and Spatial Structures"*, Oct. 16–19, 2006. China, pp. 64–65.
10. Shugayev V. V., Sokolov B. S., Paskhin D. V. Development and research of a precast large-span roof made of reinforced concrete KZhS shell-panels. *Beton i zhelezobeton*, 2007, no. 4, pp. 7–8. (In Russ.).
11. Shugayev V. V., Sokolov B. S., Paskhin D. V. Experimental and theoretical studies of the vaulted roof of the KZhS shell-panels. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*, 2007, no. 5, pp. 67–72. (In Russ.).
12. Sokolov B. S., Paskhin D. V., Pshenichnikov A. V. Modern constructive solutions of precast reinforced concrete large-span roof vaults. *Sovremennye metody rascheta zhelezobetonnyh i kamennyh konstrukcij po predel'nym sostoyaniyam: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya A. F. Lolejta* [Modern methods of calculation of reinforced concrete and stone structures by limit states: a collection of reports of the International scientific and Practical Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of A. F. Loleit] (Moscow, Nov. 30, 2018). Moscow, MISI–MGSU Publ., 2018, pp. 398–404. (In Russ.).
13. Paskhin D. V., Sokolov B. S. Analysis of the technical parameters of a prefabricated large-span segmental vault made of KZhS shell-panels. *Beton i zhelezobeton*, 2020, no. 2(602), pp. 19–27. (In Russ.).