

УДК 624.012.4  
[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-66-77](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-66-77)

## СБОРНЫЕ ОБОЛОЧКИ ИЗ ГНУТОФОРМОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

### PRECAST SHELLS MADE OF UNITS BENT DURING FORMING

Б. С. СОКОЛОВ, канд. техн. наук  
 В. А. ТИТАЕВ, канд. техн. наук  
 Д. В. ПАСХИН

В строительстве находят применение тонкостенные железобетонные пространственные конструкции как для уникальных покрытий большепролетных зданий, так и для массовых зданий павильонного типа и малых архитектурных форм. Наиболее серьезным препятствием на пути широкого внедрения экономичных тонкостенных железобетонных конструкций являются недостатки применяемой технологии изготовления и монтажа сборных элементов оболочек. Метод погиба свежесформованных плоских гибких плит с целью придания им криволинейной формы является одним из наиболее перспективных технологических приемов, позволяющих отказаться от применения дорогостоящих металлических форм сложного криволинейного очертания, существенно упростить все производственные процессы. Описан опыт исследований и разработки конструктивных решений пространственных конструкций покрытий зданий с применением унифицированных ромбических элементов, изготавливаемых методом погиба плоского свежесформованного листа на гибкой опалубке.

*In construction, thin-walled reinforced concrete spatial structures are used both for unique roofs of large-span buildings and for mass buildings of the pavilion type and small architectural forms. The most serious obstacle to the widespread application of economical thin-walled reinforced concrete structures is the shortcomings of the technology used for the manufacture and installation of prefabricated shell elements. The method of bending just formed flat flexible plates to give them a curved shape is one of the most promising technological methods that allow you to abandon the use of expensive metal forms of complex curved outlines, significantly simplify all production processes.*

*The article describes the experience of research and development of structural decisions for spatial structures of building roofs with the use of unified rhombic elements made by the method of bending a flat just formed sheet on a flexible formwork.*

#### Ключевые слова:

Армоцементная оболочка, железобетонная оболочка, конструирование, ромбический элемент, сталефибробетонная оболочка, технология формования

#### Keywords:

Casting technique, designing, ferrocement shell, reinforced concrete shell, rhombic unit, steel fiber concrete shell

В мировой практике большинство построенных железобетонных оболочек покрытий выполнено в монолитном железобетоне на деревянной опалубке. Хорошо известно, что изготовление деревянной опалубки, на которой производится формование оболочки, – процесс весьма трудоемкий, требует высокой квалификации исполнителей, и часто опалубка обходится значительно дороже самой конструкции. Изготовление монолитной железобетонной оболочки сопряжено также с определенными трудностями, так как укладка арматуры и бетона происходит на сложной криволинейной поверхности, отдельные места которой имеют значительные уклоны.

Возведение оболочек покрытий существенно упрощается с переходом к их сборному исполнению. Однако и здесь есть свои сложности, связанные с большим разнообразием форм поверхности оболочек, что затрудняет унификацию их сборных элементов. Форма поверхности элементов оболочек, как правило, получается достаточно сложной и нетехнологичной в изготовлении. Большое число типоразмеров сборных элементов требует изготовления и эксплуатации обширного парка металлоформ, что также затрудняет использование высокомеханизированных заводских технологий и является препятствием на пути широкого применения оболочек.

Известно, что задача разрезки оболочек двоякой кривизны, очерченных по неразвертываемым поверхностям, на произвольное число равных элементов не имеет решения. Поэтому при исследовании различных способов разрезки таких оболочек основным критерием оценки принимается число геометрических типоразмеров сборных элементов.

Несмотря на достаточно большое число исследований, нет четких рекомендаций по выбору рациональной формы сборных унифицированных элементов оболочек и сводов, отвечающих как требованию типизации конструктивных элементов, так и возможности разнообразных архитектурных решений. Нашедшие наибольшее применение прямоугольные в плане цилиндрические панели в значительной степени ограничивают возможности в выборе форм оболочек. Даже небольшое конструктивное изменение геометрических размеров или кривизны элементов требует изготовления новых дорогостоящих металлических форм.

Необходимость разработки рациональных по форме унифицированных сборных элементов для использования в различных по архитектуре и функциональному назначению пространственных покрытиях зданий всегда была актуальной задачей и решалась с разной степенью эффективности для разных типов оболочек.

Одним из рациональных конструктивных решений для зданий и сооружений являются тонкостенные унифицированные элементы, имеющие в плане форму ромба или вытянутого четырехугольника, изготавливаемые погибом плоских свежесформованных листов на гибкой опалубке. Работы по совершенствованию технологии изготовления и конструированию тонкостенных конструкций из гнутоформованных ромбических элементов проводились по предложению и под руководством д. т. н., проф. В.В. Шугаева с 80-х годов в лаборатории

тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ. В основе этих работ лежит метод погиба плоского свежетоформованного листа на гибкой опалубке, предложенный в 50-х годах А.К. Шаншиевым [1]. Процесс погиба плоских свежетоформованных плит базируется на свойстве свежесушеного на гибком поддоне слое бетона претерпевать под действием собственного веса деформации изгиба без нарушения его целостности. В рассматриваемом способе изготовления отсутствие трещин объясняется тем, что по всему сечению слоя бетона в направлении погиба происходит его обжатие, вызывающее соответствующие пластические деформации, которые возрастают от нуля на выпуклой стороне слоя до некоторого максимума – на вогнутой.

Указанное предположение проверено в НИИЖБ при формировании криволинейных лотков-оболочек длиной 8 м и толщиной 2-3 см. Первоначально на гибком поддоне готовили плоский лист, армированный тремя слоями тканой сетки и продольными стержнями из проволоки диаметром 5 мм. Гибкий поддон изготавливали из кровельного железа, листы которого по внешнему краю крепили к жестким бортам из швеллера. После бетонирования плоской плиты борта формы поднимали краном с помощью траверсы, и плита вместе с гибким поддоном свободно провисала под действием собственного веса, принимая заданную форму (рис. 1). После погиба изделия закрепляют борта формы на заданной высоте, и изделие набирает прочность в естественных условиях.



Рис. 1. Изготовление армоцементного лотка на гибком поддоне погибом плоского свежетоформованного листа под действием собственного веса

Исследования показали, что недостатком этого способа изготовления оказалось возможное выпучивание сетки в процессе погиба плоского свежетоформованного листа при обычном расположении сеток вдоль оси, вокруг которой осуществляется погиб элемента. Проведенные исследования показали, что для устранения выпучивания сеток и расслоения бетона сетки следует располагать под углом 30-45° к оси, вокруг которой осуществляется погиб [2]. В этом случае тканая сетка в процессе погиба деформируется без выпучивания за счет изменения формы ячейки между проволоками (рис. 2).

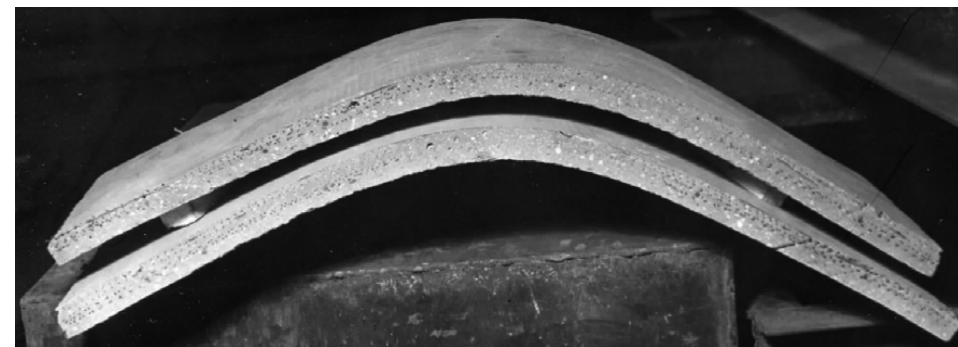


Рис. 2. Образцы, выпиленные из согнутых плит с косым расположением арматурных сеток

В опытных образцах с указанным расположением сеток их выпучивание и расслоение не наблюдалось даже при прогибе, равном половине пролета плиты. Плита при этом провисала по кривой, близкой к цепной линии. Аналогичные результаты получены при изготовлении гнутоформованных изделий с дисперсным армированием в виде стальной фибры. Как показали результаты исследований, этот вид армирования оказался наилучшим для изготовления тонкостенных конструкций методом погиба.

В 80-90 годах в НИИЖБ был предложен целый ряд новых видов эффективных пространственных конструкций из гнутоформованных армоцементных и сталефибробетонных элементов. В их числе сборные сегментные оболочки покрытий из выпуклых или вогнутых криволинейных конических элементов, покрытия в виде купольных и зонтичных оболочек, гнутоформованные трехслойные конструкции, ряд конструктивных решений малых архитектурных форм [3-11].

Как показал анализ результатов многочисленных исследований, посвященных разрезке куполов на сборные элементы [12], минимальное число типоразмеров достигается при разбивке их поверхности на треугольные элементы. Совокупность двух таких элементов образует ромб, а сочетание ромбов также дает возможность осуществить оптимальное членение поверхности вращения – купола и цилиндра – на минимальное число типоразмеров сборных элементов.

Основные геометрические параметры унифицированного пространственного элемента, имеющего в плане форму ромба, приведены на рис. 3. Он представляет собой окаймленную по контуру ребром тонкую плиту, изогнутую по поверхности, близкой к поверхности гиперболического параболоида, чем объясняется большая пространственная жесткость элементов и их высокая несущая способность в работе в составе сооружения.

Размеры элемента ( $b$ ,  $l$ ,  $h$ ) и стрела его подъема  $f_1$  определяются геометрическими параметрами и формой поверхности сборной конструкции, а также грузоподъемностью кранового оборудования и транспортными ограничениями.

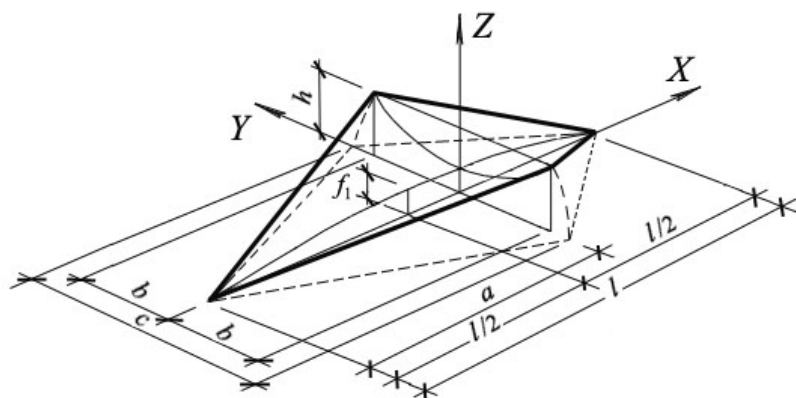


Рис. 3. Общий вид гнутоформованного ромбического элемента

Плоскую плиту габаритами  $c \times l$ , контур которой показан пунктиром на рис. 3, готовят в форме, представляющей из себя соединенные линейным шарниром по оси симметрии две половины жесткой рамы (рис. 4), к которой прикреплен гибкий стальной лист толщиной 0,5-0,7 мм [13].



Рис. 4. Форма для изготовления гнутоформованных элементов, состоящая из гибкого поддона, двух жестких бортов и двух соосных шарниров

После формования плоской плиты борта формы поднимают на требуемую высоту  $h$ , при этом свежесформованная плита, провисая на стальном листе, изгибается, приобретая проектное криволинейное очертание и проектные размеры в плане  $2b \times l$ . После достижения изделием необходимой прочности борта формы откидываются, и изделие извлекается из формы (рис. 5).



Рис. 5. Гнутоформованный элемент после распалубки

Ромбические элементы могут иметь в плане форму ромба или вытянутого четырехугольника (рис. 6).

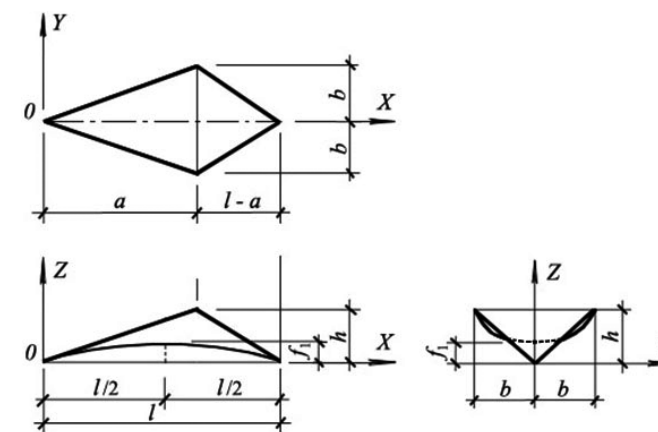


Рис. 6. Геометрические параметры ромбического элемента в форме вытянутого четырехугольника

В общем случае элемента в форме вытянутого четырехугольника поверхность готового элемента может быть описана уравнением

$$z = f_1 \left\{ 1 - \frac{1}{l^2} \left[ (l - 2x)^2 + \left( \frac{2ay}{b} \right)^2 \right] \right\} + \frac{2ah}{l} \left( \frac{y}{b} \right)^2.$$

В случае ромба ( $a = l/2$ )

$$z = f_1 \left\{ 1 - \frac{1}{l^2} \left[ (l - 2x)^2 + \left( \frac{ly}{b} \right)^2 \right] \right\} + h \left( \frac{y}{b} \right)^2.$$



Величина  $f_1$  для ромба может быть приближенно определена по формуле

$$f_1 = h - f_2 \approx h - 0,87 \sqrt{b(c-2b)}.$$

Для элементов в форме вытянутого четырехугольника ( $a \neq 1/2$ ) определение величины  $f_1$  выполняется по той же формуле, что и в случае ромба, с заменой  $b$ ,  $h$  и  $c$  величинами соответственно

$$b' = \frac{l}{2} \cdot \frac{b}{a}; \quad h' = \frac{l}{2} \cdot \frac{h}{a}; \quad c' = 2\sqrt{b'^2 + h'^2};$$

$$f_1 = h' - f_2'.$$

Существенным достоинством предлагаемой технологии является возможность изготовления в одной форме элементов, которым может быть придана различная кривизна в поперечном направлении. Это открывает возможности создания конструкций с различной геометрией поверхности, используя при этом ограниченное число форм.

Из ромбических элементов было предложено несколько вариантов конструктивных решений зданий купольного типа. Одно из них в порядке опытного строительства реализовано в здании крытого рынка в пос. Некрасовка Московской обл. Покрытие, собранное из 7 ромбических элементов, вписано в плане в окружность диаметром 12 м. Высота оболочки в центре 3,9 м (без учета высоты опор). Для увеличения площади покрытия открытые части плана, образовавшиеся между соседними ромбическими элементами, покрываются навесом, образованным двумя наклонными плоскими треугольными плитами, соединенными между собой в вершине и с нижними гранями опорных элементов [14]. Монтаж ромбических элементов выполнен с использованием одной центральной монтажной стойки (рис. 7).



Рис 7. Монтаж ромбических элементов крытого рынка

Более сложной является конструкция купольного покрытия из сталефибробетонных ромбических элементов (рис. 8) [7, 14]. Опоры оболочки образуют правильный восьмиугольник

с диаметром окружности 24 м по осям опор. На опоры передаются распор и вертикальная реакция, возникающая от действия собственного веса и внешних нагрузок на оболочку. Усилие распора воспринимается затяжкой, располагаемой в уровне пола по периметру оболочки.

Поверхность оболочки представляет собой многогранник, вписанный в часть сферы радиусом 14,3 м. Высота оболочки от уровня пола в центре составляет 6,5 м. Сборка несущей конструкции выполняется с помощью одной центральной временной монтажной стойки, на которую опираются 8 монтажных элементов по числу опор оболочки. Монтажные элементы собирают предварительно на кондукторе из четырех ромбических элементов трех типоразмеров, и соединяют элементы между собой сваркой закладных деталей и замоноличиванием шпоночных швов. Ромбические элементы Р-1 и Р-2 готовят в одной опалубке, и они лишь незначительно отличаются стрелой подъема. Элемент Р-3 имеет такие же габаритные размеры, но выполняется утолщенным для восприятия более высоких усилий сжатия и изгиба в опорных сечениях оболочки и с опорной закладной деталью. Сопряжение опорных частей оболочки с фундаментом шарнирное.

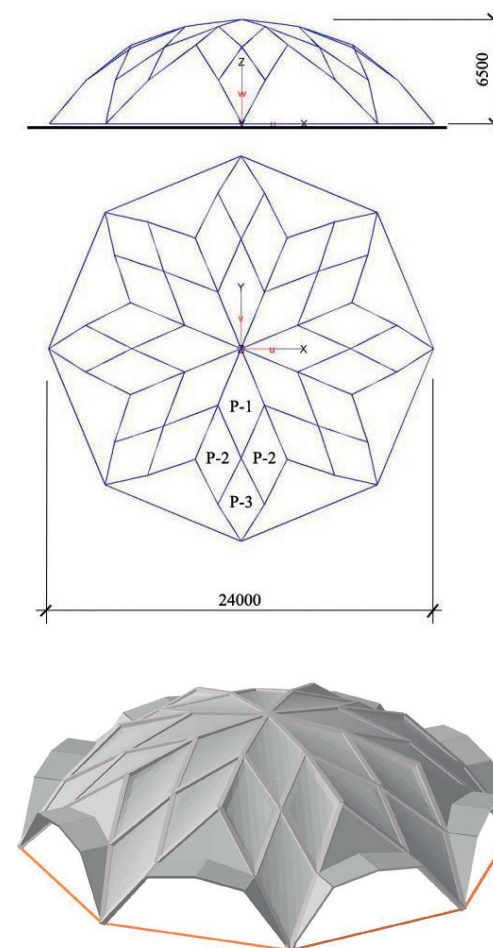


Рис. 8. Сборная оболочка пролетом 24 м из гнутоформованных сталефибробетонных ромбических элементов

Элементы оболочки изготавливают из мелкозернистого бетона с комбинированным армированием.

Для лучшего использования внутреннего пространства открытую часть оболочки заполняют плоскими элементами, а к нижним частям опорных ромбов крепят навесы из плоских элементов. Естественное освещение внутреннего объема выполнено через проемы в верхних плоских элементах заполнения.

По предварительным расчетам, расход бетона составил  $0,08 \text{ м}^3/\text{м}^2$ , стали –  $28,8 \text{ кг}/\text{м}^2$ .

Одной из наиболее перспективных разработок с применением ромбических гнутоформованных элементов является здание многоцелевого назначения, принципиальное конструктивное решение которого представлено на рис. 9 [7, 14].

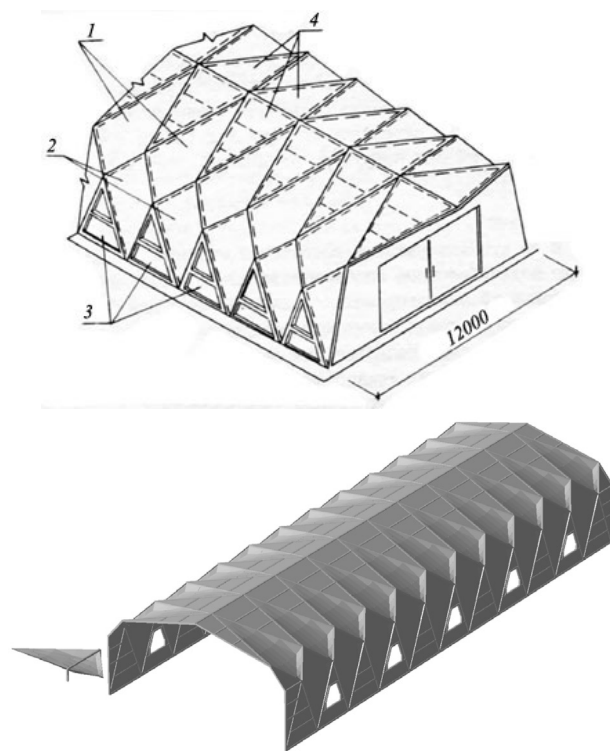


Рис. 9. Здание многоцелевого назначения из гнутоформованных и плоских элементов:

1 – ромбические элементы покрытия; 2 – стеновые ромбические элементы;  
3 – плоские ребристые треугольные стеновые элементы; 4 – плоские треугольные элементы покрытия

Конструкция пространственного здания имеет прямоугольный план с размерами  $12 \times 30 \text{ м}$ , высотой до конька  $6 \text{ м}$ . Конструкцию собирают из тонкостенных дисперсно-армированных пространственных и плоских элементов четырех типов: двух типоразмеров плоских треугольных с ребрами по контуру и двух типоразмеров гнутоформованных криволинейных элементов толщиной  $20\text{--}25 \text{ мм}$ , имеющих в плане форму вытянутого четырехугольника. Чередующиеся между собой плоские и пространственные элементы образуют одинаковое конструктивное решение стен и покрытия.

Армирование элементов возможно в двух вариантах: ткаными сетками (армоцементный вариант) и стальной фиброй (сталефибробетонный вариант); контурные ребра элементов армируют стержнями класса А500С, к которым крепятся закладные детали. Соединение сборных элементов между собой выполняют сваркой закладных деталей через накладки и замоноличиванием шпоночных швов. Для изготовления сборных элементов применяется мелкозернистый бетон класса не ниже В25.

Фундамент под здание может быть выполнен ленточным из одного ряда типовых фундаментных блоков на песчаной подушке или иного типа в зависимости от грунтовых условий.

Здание в холодном варианте выполняется с безрулонной кровлей; в теплом варианте – с эффективным утеплителем, например, с покрытием слоем пенополиуретана.

Монтаж здания выполняется с применением легких переставных монтажных стоек.

Расход материалов на  $1 \text{ м}^2$  составил: металл –  $24,2 \text{ кг}$ , бетон –  $0,076 \text{ м}^3$ .

Малая объемная масса конструкции здания, высокая пространственная жесткость, регулярная симметричная структура позволяют рекомендовать представленные конструкции купольного здания и здания на прямоугольном плане для применения в сейсмоопасных регионах.

Анализ способов изготовления рассматриваемых конструкции в заводских и полигонных условиях показал [14], что применение тонкостенных гнутоформованных конструкций будет особенно экономичным, если их изготовление будет организовано на полигоне, который может быть достаточно быстро развернут в непосредственной близости от места строительства, что позволит:

- унифицировать номенклатуру сборных конструкций в рамках одного или нескольких однотипных объектов с целью упрощения изготовления и монтажа;
- сократить транспортные и складские расходы и время на перевозку готовых изделий;
- исключить повреждение тонкостенных конструкций при транспортировке и складировании.

## Выводы

Метод погиба свежесформованных плоских гибких плит с целью придания им криволинейной формы является одним из наиболее перспективных технологических приемов, позволяющих отказаться от применения дорогостоящих металлических форм сложного криволинейного очертания, существенно упростить и механизировать все производственные процессы и достигнуть снижения стоимости, трудоемкости и повышения качества выпускаемой продукции.

Опыт исследования, проектирования и строительства показал, что из сборных унифицированных гнутоформованных элементов могут быть собраны сооружения с выразительной архитектурой, обладающие экономичностью и высокой несущей способностью.

## Список литературы

1. Шаншиев А.К. Технология изготовления армоцементных гнутоформованных пространственных конструкций // Армоцемент и армоцементные конструкции. – М.: Стройиздат, 1962. С. 180-185.
2. Шугаев В.В. Сборные железобетонные лотки-каналы. – М.: Изд-во Колос, 1966. 84 с.

3. Железобетонное пространственное покрытие из криволинейных сборных элементов. Шифр 2ПК-078-1-82 КЖИ. Рабочие чертежи опытного покрытия. – М.: КТБ НИИЖБ, 1982. – 14 с.
4. Склады сыпучих материалов купольного типа, выполняемые из фибробетона. Шифр ТП-14-265. – Л.: ЛенПСП, 1982. 29 с.
5. *Шугаев В.В., Околичный В.Н.* Расчет секториальных оболочек методом предельного равновесия. Депон. во ВНИИИС 28.04.84, № 5021.
6. Покрытие группового навеса для павильона торговой ярмарки. Шифр 08.ПК.291.04.88. КЖИ. Рабочие чертежи опытного покрытия. – М.: КТБ НИИЖБ, 1988. – 17 с.
7. *Шугаев В.В., Столытина Л.И., Гагуа Н.И., Соколов Б.С., Левина С.Г.* Пространственные конструкции из гнутоформованных дисперсно-армированных элементов / Сб.: Пространственные конструкции. Материалы семинара в МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского. – М., 1991. С. 192-200.
8. *Shugaev, V.V., Sokolov, B.S.* Innovative Spatial Structures of R.C. Silos / Proc. of the IASS Int. Symp. "Conceptual Design of Structures". Univ. of Stuttgart, Germany, 1996. Pp. 953-960.
9. *Эпштейн М.А., Снеговской А.И., Шугаев В.В., Соколов Б.С.* Сборные пространственные покрытия из трехслойных гнутоформованных элементов / Монтажные и специальные работы в строительстве. №6, 2000. С. 2-4.
10. *Эпштейн М.А., Шугаев В.В., Соколов Б.С.* Возможности применения метода погиба для производства трехслойных железобетонных элементов покрытий // Технологии бетонов. 2006. №6. С. 44-45.
11. *Эпштейн М.А., Шугаев В.В., Соколов Б.С.* Армирование трехслойных ограждающих конструкций криволинейной формы, изготавливаемых методом погиба // Технологии бетонов. 2007. №2. С. 28-29.
12. *Павлов Г.Н.* Композиционное формообразование кристаллических куполов и оболочек // Архитектура СССР, 1977. № 2. – С. 34-38.
13. А.с. 1583297, В 28 В 7/00. Форма для изготовления тонкостенных криволинейных изделий из бетонных смесей // В.В. Шугаев, А.М. Людковский, С.Г. Левина, К.Д. Суворкин и Н.Н. Хатиашвили // Открытия. Изобретения. 1990. № 29.
14. *Шугаев В.В.* Пространственные конструкции из элементов, формуемых на плоскости с последующим погибом // Исследования железобетонных тонкостенных пространственных конструкций. – М.: НИИЖБ, 1991. С. 5-37.

## Информация об авторах/Information about authors

Борис Сергеевич СОКОЛОВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва.

Boris SOKOLOV, Ph.D. (Engineering), Head of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: moo-shell@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-80

Виталий Александрович ТИТАЕВ, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва.

Vitaly TITAEV, Ph.D. (Engineering), assistant professor, leading researcher of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: moo-shell@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-80

Дмитрий Владимирович ПАСХИН, заместитель заведующего лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitry PASKHIN, Deputy Head of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: moo-shell@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-45