

Влияние исторического опыта на разработку четырехъярусных конструкций в виде гиперboloидов вращения



Кущев Иван Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, кафедра ПГС, Рязанский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Рязань, Российская Федерация

e-mail: 89060627113a@gmail.com



Романченко Дмитрий Анатольевич

магистрант, кафедра ПГС, Рязанский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Рязань, Российская Федерация

e-mail: 89060627113a@gmail.com

Статья посвящена изучению опыта эксплуатации, моделирования нагрузок металлических конструкций в виде гиперboloидов вращения (на примере башни В. Г. Шухова), выполненных из полимерных конструкций. Представлены результаты лабораторных исследований по моделированию деформаций таких конструкций. Записаны и приведены результаты исследований по изменению нагрузок, изучению деформаций в узловых соединениях гиперboloида вращения с целью изучения распределения нагрузок по узловым соединениям гиперboloида вращения, возможности замены металлических элементов на полимерные.

Ключевые слова: гиперboloид вращения, В. Г. Шухов, нагрузки, деформация, башня, вращение.

Kushchev I. E., Romanchenko D. A.

The influence of historical experience on the development of four-tier structures in the form of hyperboloids of rotation

The article is devoted to the study of the experience of operation, modeling of loads of metal structures in the form of hyperboloids of rotation (on the example of the Shukhov tower) made of polymer structures. The article presents the results of laboratory studies on modeling deformations of such structures. The results of studies on the change of loads, the study of deformations in the nodal joints of the hyperboloid of rotation are recorded and presented in order to study the distribution of loads along the nodal connection of the hyperboloid of rotation, the possibility of replacing metal elements with polymer ones.

Keywords: hyperboloid of rotation, V. G. Shukhov, loads, deformation, tower, rotation.

Среди большого количества изобретений В. Г. Шухова центральное место занимают гиперboloидные конструкции [4], которые часто используются при строительстве башен, мачт, маяков, линий электропередачи и других объектов. У современников вызывало восхищение не только огромное техническое, но и декоративное совершенство данных конструкций [6]. Сам инженер говорил: «Что красиво смотрится, то прочно. Человеческий взгляд привык к пропорциям природы, а в природе выживает то, что прочно и целесообразно» [9]. Гиперboloиды В. Г. Шухова просты в конструкции, надежны в эксплуатации, практичные, красивые. Именно эти качества помогли формировать новую эстетику советских городов [1]. Спроектированная В. Г. Шуховым сетчатая оболочка гиперboloида вращения представляла собой совершенно новую архитектурную форму.

Изогнутая в плоскости сетчатая оболочка была спроектирована из прямых, наклонно установленных стержней. В результате получилась довольно легкая, прочная, жесткая

конструкция башни, которую можно быстро рассчитать и построить [12].

Не считая новой архитектурной выразительности, гиперboloиды В. Г. Шухова были весьма технологичны для своего времени и, как следствие, экономичны [13]. «Несмотря на их криволинейные очертания, изготовлялись по самой простой технологии — из прямых элементов, не требующих трудоемкой гибки стальных профилей и последующей сложной сборки изогнутых элементов» [7, 134].

Подробное описание принципа гиперboloидной сетчатой башни было зафиксировано В. Г. Шуховым патентом на привилегию «Ажурная башня» № 1896 от 12 марта 1899 г. [11]. В заявке на привилегию, которая была подана инженером в январе 1899 г., он сам таким образом сформулировал принцип конструкции: «Сетчатая поверхность, образующая башню, состоит из прямых деревянных брусьев, брусков, железных труб, швеллеров или уголков, опирающихся на два кольца: одно вверху, другое внизу башни; в местах пересечения брусья, трубы и уголки скрепляются между собой. Состав-

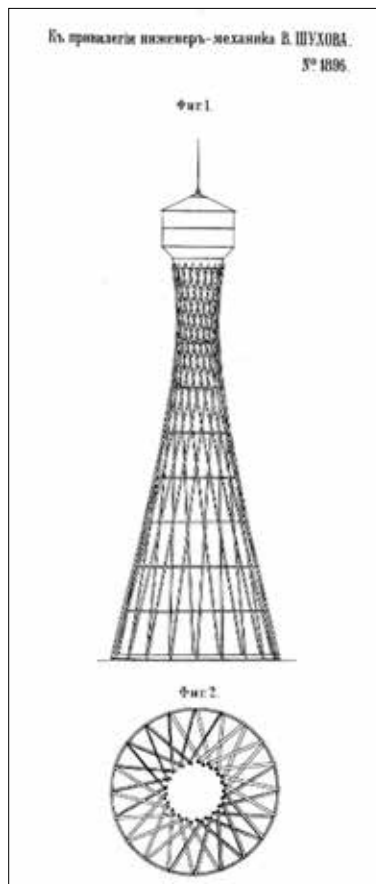


Иллюстрация 1. Чертеж к привилегии В. Г. Шухова. № 1896 от 12 марта 1899 г. [3]



Иллюстрация 2. Фотография Радиобашни на Шаболовке. Из личного архива В. Г. Шухова. 1923 г.

ленная таким образом сетка образует гиперboloид вращения, по поверхности которого проходит ряд горизонтальных колец» [10, 165]. «Несмотря на их криволинейные очертания, изготовлялись по самой простой технологии — из прямых элементов, не требующих трудоемкой гибки стальных профилей и последующей сложной сборки изогнутых элементов» [7, 134]. В наше время Радиобашня на Шаболовке в Москве признана международными экспертами одним из великих прорывов и достижений в области строительства и архитектуры [7].

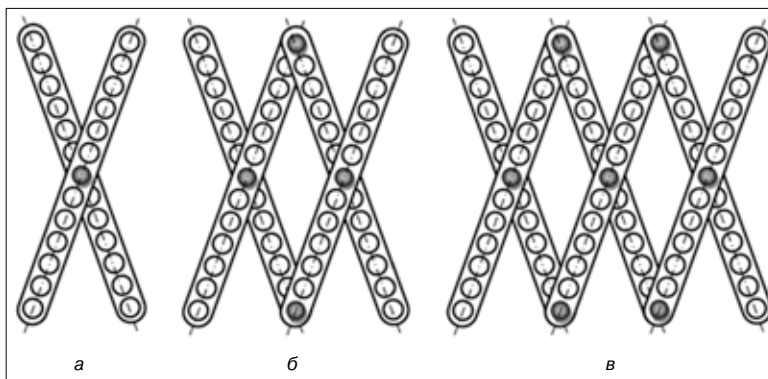


Иллюстрация 3. Элементы для формирования пояса параболической поверхности: а — одинарный крест для формирования образующей поверхности; б — двойной крест для формирования образующей поверхности; в — тройной крест для формирования образующей поверхности. Серым цветом обозначены места соединений. Рисунок Д. А. Романченко

Проблема, рассмотренная в статье, исследована отечественными учеными в области архитектуры и строительства, например, И. А. Петропавловской [7]. Отмечается, что устроенная вышеописанным способом башня «представляет собой прочную конструкцию, противодействующую внешним усилиям при значительно меньшей затрате материала» [2]. М. С. Туполев изучил влияние исторического опыта на разработку конструкций в виде гиперboloидов вращения на примере башен В. Г. Шухова [3]. Однако следует отметить, что в работе указанных специалистов в области архитектуры и строительства проведение лабораторных экспериментов по изучению деформаций четырехъярусных гиперboloидов вращения проводилось исключительно на образцах, созданных из металлических или деревянных элементов. Ранее не проводились эксперименты на образцах из полимерных элементов и не изучались их деформации, что и обуславливает теоретическую новизну данной статьи.

Эксперимент

Эксперимент по моделированию нагрузок на четырехъярусные конструкции в виде гиперboloидов вращения выполнен в лаборатории на кафедре Промышленного и гражданского строительства Рязанского института (филиала) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет». Эксперимент проведен магистром технических наук третьего курса Д. А. Романченко под руководством доктора технических наук, профессора кафедры Промышленного и гражданского строительства И. Е. Кушева (2–3.11.2023). Условия проведения эксперимента указаны ниже в статье.

Конструкция самого гиперboloида вращения создавалась из полимерных материалов длиной 80 мм, шириной 10 мм. Данный материал имел внутри пять равноудаленных друг от друга отверстий диаметром 4 мм. Данные полимерные материалы соединялись между собой болтами, гайками и шайбами с двух сторон. Элемент данного соединения изображен на Иллюстрации 3.

Для исследования была создана инженерная конструкция, состоящая из гладкой и прямой деревянной основы из фанеры толщиной 10 мм. Площадь конструкции составила 0,85 м². Далее в подиум вмонтировано деревянное основание для вертикальной металлической опоры. Размер основания составил 50 × 50 мм. Основание прикреплено к подиуму четырьмя саморезами длиной 4 × 40 мм, что дало достаточно прочную основу для конструкции. Одним из вариантов нагружения могло быть отверстие диаметром 6 мм в деревянном основании, через которое проходил металлический стержень диаметром 4 мм, длиной 600 мм, на который подвешивались грузы. Однако в качестве основного вида нагружения использовалась схема с верхним нагружением, когда грузы устанавливались непосредственно на верхнюю распределительно-нагрузочную крышку.

На уровне 400 мм от уровня подиума из двух деревянных брусьев путем соединения четырьмя болтами и гайками сформирован вспомогательный элемент для фиксации индикаторной головки часового типа. Элемент одной стороной крепился болтами к металлической части прута с помощью стягивания болтов, другая же сторона находилась в свободном, подвешенном горизонтально относительно плоско-

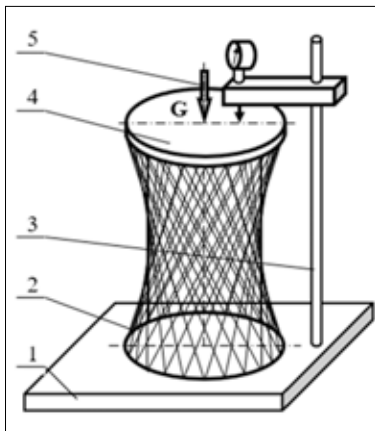


Иллюстрация 4. Общий вид установки для определения деформаций: 1 — станина; 2 — модель гиперboloида; 3 — стойка с индикаторной головкой; 4 — верхняя распределительно-нагрузочная крышка; 5 — грузы весом G. Рисунок Д. А. Романченко

Таблица 1. Деформация четырехступенчатого образца с 20 точками двойного схождения

Вид показаний индикатора	Деформация четырехступенчатого образца от нагрузки			
	0 нагрузка	Первый груз = 1 кгс	Второй груз = 2 кгс	Третий груз = 3 кгс
Начальное	60	46	36	19
Текущее		14	10	17
Суммарное		14	24	41

Таблица 2. Деформация четырехступенчатого образца с 22 точками двойного схождения

Вид показаний индикатора	Деформация четырехступенчатого образца от нагрузки			
	0 нагрузка	Первый груз = 1 кгс	Второй груз = 2 кгс	Третий груз = 3 кгс
Начальное	28	42	60	80
Текущее		14	18	20
Суммарное		14	32	52

Таблица 3. Деформация четырехступенчатого образца с 24 точками двойного схождения

Вид показаний индикатора	Деформация четырехступенчатого образца от нагрузки			
	0 нагрузка	Первый груз = 1 кгс	Второй груз = 2 кгс	Третий груз = 3 кгс
Начальное	89	75	51	26
Текущее		14	24	25
Суммарное		14	38	63

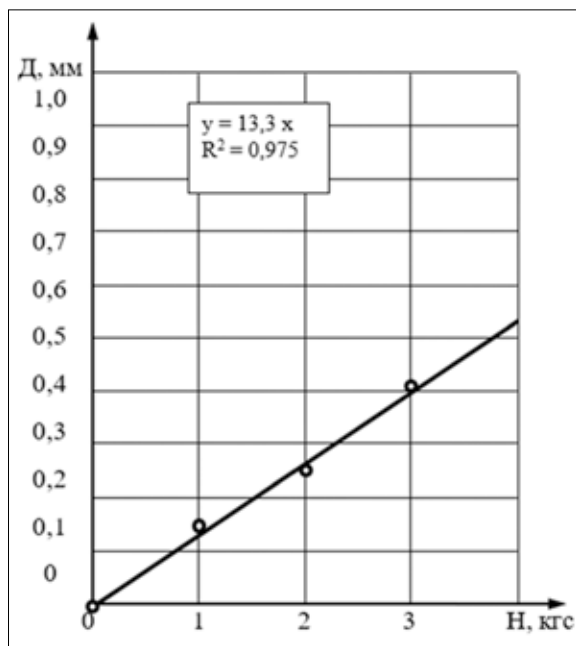


Иллюстрация 5. Деформация четырехступенчатого образца от нагрузки с 20 точками двойного схождения. Диаграмма выполнена Д. А. Романченко

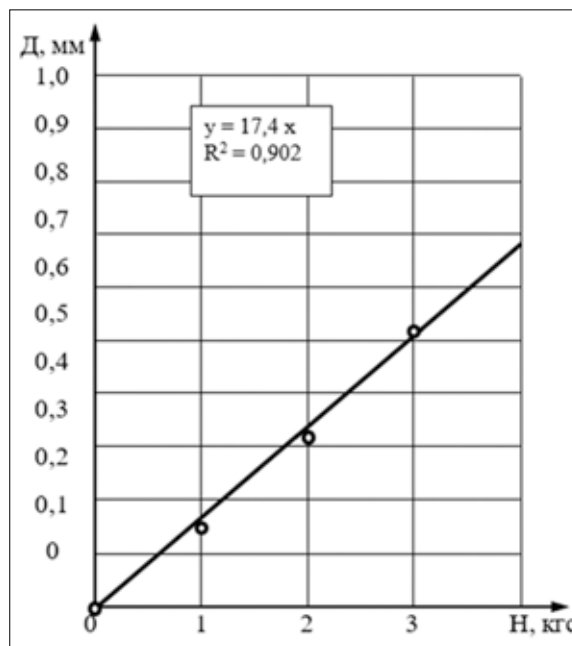


Иллюстрация 6. Деформация четырехступенчатого образца от нагрузки с 22 точками двойного схождения. Диаграмма выполнена Д. А. Романченко

сти подиума, уровне. На этой части с помощью болтов фиксировалась индикаторная головка часового типа (Иллюстрация 4), направленная вертикально.

Индикаторная головка соприкасалась с контрольным винтом, находящимся на верхнем ярусе башни с целью измерения изменения нагрузок гиперboloида в зависимости от экспериментируемого веса.

Для увеличения нагрузки на гиперboloид использовались металлические грузы весом 1 кг (9,80 Н). Они располагались строго перпендикулярно на верхнем ярусе башни. Первоначально располагался один

груз, фиксировались показания нагрузок на узловых креплениях. Затем к первому грузу добавлялся второй груз (2 кг, 19,6 Н), фиксировались показания, затем к двум грузам добавлялся третий (3 кг, 29,4 Н), показания фиксировались. До добавления первого груза фиксировались нулевые показания.

В первом эксперименте мы установили башню с четырьмя ярусами по 20 полимерных элементов в каждом ярусе, соединенных болтами. Затем нагрузка постепенно увеличивалась с 0 до 3 кг (29,4 Н). Результаты изменения деформации представлены в Таблице 1.

Из полученных результатов видно, что при увеличении нагрузки с 1 кг (9,80 Н) до 3 кг (29,4 Н) разница в деформации, относительных измерений, замера отклонений увеличилась на 27 делений.

Во втором эксперименте на станину стенда устанавливалась четырехъярусная модель гиперboloида с 22 полимерными элементами в каждом ярусе с трехточечным соединением болтами. Нагрузка осуществлялась ступенчатым увеличением с 0 до 3 кг (29,4 Н). Результаты изменения деформации представлены в Таблице 2.

По результатам исследований видно, что при увеличении нагрузки

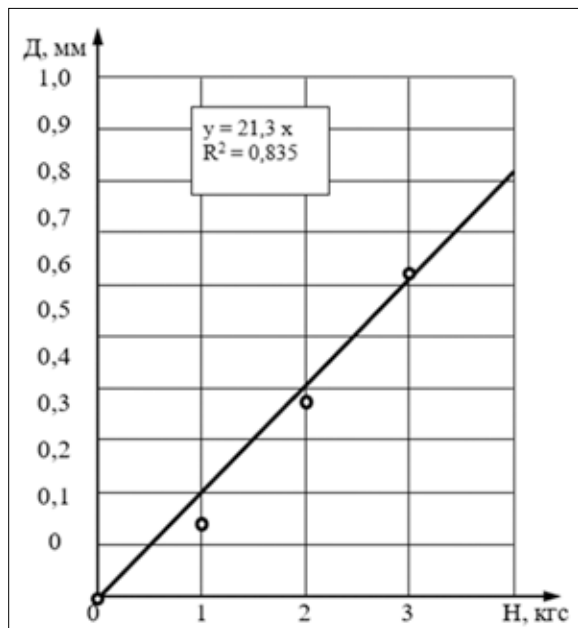


Иллюстрация 7. Деформация четырехступенчатого образца от нагрузки с 24 точками двойного схождения. Диаграмма выполнена Д. А. Романченко

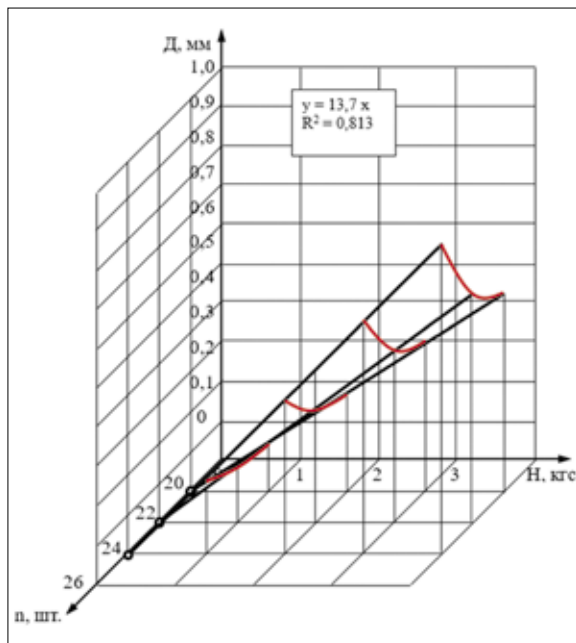


Иллюстрация 8. Общие деформации четырехступенчатых образцов от нагрузки с 20, 22 и 24 точками двойного схождения. Автор Д. А. Романченко

с 1 кг (9,80 Н) до 3 кг (29,4 Н) разница в деформации, относительных измерений, замера отклонений увеличилась на 38 делений, что показывает снижение жесткости с увеличением диаметра модели гиперboloида.

В третьем эксперименте на станину был установлен гиперboloид с четырьмя ярусами по 24 полимерных элемента в каждом ярусе, соединенных болтами. Нагрузка увеличивалась ступенчато с 0 до 3 кг (29,4 Н). Результаты изменения деформации представлены в Таблице 3.

Из Таблицы 3 видно, что при увеличении нагрузки с 1 кг (9,80 Н) до 3 кг (29,4 Н) разница в деформации относительных измерений замеров отклонений увеличилась на 49 делений (Иллюстрация 7). Это еще раз подтвердило то, что с увеличением диаметра гиперboloида при постоянной высоте их жесткость снижается.

Общие деформации четырехступенчатых гиперboloидов представлены на одном графике на Иллюстрации 8.

Заключение

Устойчивость башенной конструкции любого типа обеспечивается исключительно элементами конструкции ствола, закрепленного в основании, а также несущими нагрузку опорами. Как у любой, закрепленной консольно, конструкции, к которой приложена физическая нагрузка, изгибающий момент увеличивается к основанию и достигает своего максимального значения у основания башни. В связи с этим башни имеют пирамидальную или гиперboloидную форму. Благодаря этому конструктивному решению момент сопротивления изгибу ствола также увеличивается за основание.

При проектировании башен, конструкций зданий в виде гиперboloидов вращения в архитектуре и строительстве используются различные законы математики, физики, сопротивления материалов и строительной механики, включая законы Ньютона и Гука. Любые формы конструкций из различных материалов неизбежно подвергаются не только силовому воздействию в физических процессах, но и химических, что также необходимо учитывать при изучении нагрузок, деформаций в узловых соединениях [3].

В ходе изучения материала, а также проведения эксперимента сделан вывод, что в гиперboloидах с поясами из труб является рациональной крестовая решетка с предварительно напряженными раскосами из стальных профилей замкнутого сечения. При поясах из уголков или других профилей рекомендуется использовать треугольную и ромбическую решетки со шпренгелями. По результатам лабораторных исследований установлено, что с увеличением диаметра при постоянной высоте гиперboloидов снижается их продольная жесткость. Усилия в гиперboloиде могут определяться как в пространственной статически определимой, так и статически неопределимых системах. Действующими нагрузками в таких гиперboloидах являются: собственный вес конструкций; масса технологического оборудования; ветровая нагрузка; обледенение; температурные изменения.

Отметим, что для повышения продольной жесткости несущих опор башни необходимо уменьшать диаметр яруса гиперboloида вращения.

Список использованной литературы

- [1] Аврамов К. В., Чернобривко М. В., Романенко В. Н. и др. Динамическая устойчивость параболических оболочек в сверхзвуковом газовом потоке // Прикладная гидромеханика. — 2014. — Т. 16, № 4. — С. 3–10.
- [2] Архив РАН. Ф. 1508. Д. 76. Л. 2. Биографические документы и документы по деятельности Шухова В. Г.
- [3] Архив РАН. Ф. 1508. Оп. 1. Д. 76. Л. 3. Научные труды и материалы к ним (чертежи, расчеты, фотографии, спецификации и др.) Шухова В. Г. (13).
- [4] Беликов Г. И. Статика, динамика и устойчивость сетчатых и подкрепленных оболочек с учетом поперечного сдвига. — Волгоград: ВолГАСА, 2003. — 298 с.
- [5] Беликов Г. И. Оптимизация топологии гиперboloида вращения по условиям прочности и жесткости // Вестн. Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. — 2012. — № 29 (48). — С. 110–114.

- [6] Гмирач К. М., Козлов А. В., Проскуров Р. А. Подбор оптимальных параметров эллипсоидной железобетонной оболочки вращения // *Международ. науч.-исслед. журн.: технические науки (ч. 3)*. — 2017. — № 2 (56). — С. 100–104.
- [7] Ковельман Г. М. Творчество почетного академика инженера Владимира Григорьевича Шухова. — М.: Госстройиздат, 1961. — 363 с.
- [8] Кривошапко С. Н., Иванов В. Н. Энциклопедия аналитических поверхностей. — М.: Кн. дом «Либроколм», 2010. — 560 с.
- [9] Новожилов В. В. Теория тонких оболочек. — Л.: Судостроение, 1962. — 432 с.
- [10] Смулова Н. А. Роль Шухова в формировании новой эстетики в архитектуре России конца XIX — начала XX вв. // В. Г. Шухов, 1853–1939. Искусство конструкции. — М.: Мир, 1994. — С. 164–167.
- [11] Стальные башни (проектирование и монтаж) / В. Ф. Павловский, М. П. Кондра. — Киев: Будтельпик, 1979. — 200 с.
- [12] Чернобривко М. В., Аврамов К. В. Собственные колебания параболических оболочек // *Матем. методика физ.-мех. поля*. — 2014. — № 3 (57). — С. 78–85.
- [13] Nilophar Tambolil A. B. Kulkarni. Bending Analysis of Paraboloid of Revolution Shell // *International Journal of Civil Engineering Research (India)*. — 2014. — Vol. 5, № 4. — P. 307–314.
- [12] Chernobrivko M. V., Avramov K. V. *Sobstvennye kolebaniya parabolicheskikh obolochek* // *Matem. metodika fiz.-mekh. polya*. — 2014. — № 3 (57). — S. 78–85.
- [13] Nilophar Tambolil A. B. Kulkarni. *Bending Analysis of Paraboloid of Revolution Shell* // *International Journal of Civil Engineering Research (India)*. — 2014. — Vol. 5, № 4. — P. 307–314.

Статья поступила в редакцию 08.11.2023.

Опубликована 30.12.2023.

Kushchev Ivan E.

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of PGS, Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russian Federation
e-mail: 89060627113a@gmail.com

Romanchenko Dmitry A.

Master's Student, Department of PGS, Ryazan Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russian Federation
e-mail: 89060627113a@gmail.com

References

- [1] Avramov K. V., Chernobrivko M. V., Romanenko V. N. i dr. *Dinamicheskaya ustojchivost' parabolicheskikh obolochek v sverhzvukovom gazovom potoke* // *Prikladnaya gidromekhanika*. — 2014. — Т. 16, № 4. — S. 3–10.
- [2] Arhiv RAN. F. 1508. D. 76. L. 2. *Biograficheskie dokumenty i dokumenty po deyatel'nosti Shuhova V. G.*
- [3] Arhiv RAN. F. 1508. Op. 1. D. 76. L. 3. *Nauchnye trudy i materialy k nim (chertezhi, raschety, fotografii, specifikacii i dr.) Shuhova V. G. (13).*
- [4] Belikov G. I. *Statika, dinamika i ustojchivost' setchatyh i podkreplennykh obolochek s uchetom poperechnogo sdviga*. — Volgograd: VolgGASA, 2003. — 298 s.
- [5] Belikov G. I. *Optimizaciya topologii giperboloida vrashcheniya po usloviyam prochnosti i zhestkosti* // *Vestn. Volgogr. gos. arhit.-stroit. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura*. — 2012. — № 29 (48). — S. 110–114.
- [6] Gmirach K. M., Kozlov A. V., Proskurov R. A. *Podbor optimal'nykh parametrov ellipsoidnoj zhelezobetonnoj obolochki vrashcheniya* // *Mezhdunar. nauch.-issled. zhurn.: tekhnicheskie nauki (ch. 3)*. — 2017. — № 2 (56). — S. 100–104.
- [7] Kovel'man G. M. *Tvorchestvo pochetnogo akademika inzhenera Vladimira Grigor'evicha Shuhova*. — М.: Gosstrojizdat, 1961. — 363 s.
- [8] Krivoshapko S. N., Ivanov V. N. *Enciklopediya analiticheskikh poverhnostej*. — М.: Кн. дом «Либроколм», 2010. — 560 с.
- [9] Novozhilov V. V. *Teoriya tonkih obolochek*. — Л.: Sudostroenie, 1962. — 432 с.
- [10] Smurova N. A. *Rol' Shuhova v formirovanii novoj estetiki v arhitekture Rossii konca XIX — nachala XX vv.* // В. Г. Шухов, 1853–1939. Искусство конструкции. — М.: Мир, 1994. — С. 164–167.
- [11] *Stal'nye bashni (proektirovanie i montazh)* / В. Ф. Павловский, М. П. Кондра. — Киев: Будтельпик, 1979. — 200 с.