УДК 539.3, 692.44, 624.042.41

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-79-89

© И. С. Ситникова, студентка

© I. S. Sitnikova, student

© А. А. Семенов, канд. техн. наук

© A. A. Semenov, PhD in Sci. Tech.

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: irina_sergeyevna_blag@mail.ru,

E-mail: irina_sergeyevna_blag@mail.ru,

sw.semenov@gmail.com

sw.semenov@gmail.com

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КУПОЛА ПРИ ДВУХ ВАРИАНТАХ УЧЕТА ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ

STRESS-STRAIN STATE OF THE DOME TAKING INTO ACCOUNT TWO OPTIONS OF WIND LOAD

Проводится анализ существующих методик учета ветровой нагрузки при расчете напряженно-деформированного состояния купола. Рассматриваются методика СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия» и методика В. В. Горева, предложенная в справочнике «Строительные конструкции», т. 2 «Металлические конструкции». По ним выполняются расчет ветровой нагрузки и исследование напряженно-деформированного состояния для реализуемого в настоящий момент проекта купола гостиницы «Санта-Мария» в г. Благовещенске. Проводится сравнительный анализ результатов расчетов для определения наиболее точной из методик. Кроме того, для этих методик приводятся поля перемещений в локальной системе координат, а также соответствующие им поля главных и касательных напряжений.

Ключевые слова: оболочки, ветровая нагрузка, схема приложения нагрузки, напряженно-деформированное состояние, проектирование купола, статический расчет.

In the paper, an analysis is made of existing methods for calculating the wind load when calculating the stress-strain state of the dome. Two methods are considered in detail: the procedure of SP 20.13330.2011 "Loads and effects", and the method of V. V. Gorev, proposed in the reference book "Building Constructions", V. 2: "Metal Constructions", valid at the time of the study. For both methods, the wind load is calculated and the stress-strain state is analyzed for the currently implemented project of the Santa Maria dome in Blagoveshchensk. A comparative analysis of the results of calculations is carried out to determine the most precise of the methods. Besides, for these two methods considered, the displacement fields in the local coordinate system are given, as well as the corresponding fields of principal and tangential stresses.

Keywords: shells, wind load, load application scheme, stress-strain state, dome design, static calculation.

Введение

Оболочечные конструкции широко применяются в различных областях промышленности, в том числе и в строительстве для покрытия большепролетных сооружений. Наиболее часто используемый вид геометрии таких конструкций — сферическая оболочка (купол), исследованию процесса деформирования которой посвящено достаточно много работ [1–10].

Сферическая оболочка как часть строительного сооружения подвергается различным воздействиям. Если сооружение достаточно высокое, то одним из основных воздействий становится ветровая нагрузка [4–19]. Экспери-

ментальному исследованию воздействия ветра на модели различных зданий и сооружений посвящены работы [5–13], среди которых отдельно следует отметить работы Y. Uematsu [7 и др.]

Авторами работы [7] был проведен конечно-элементный анализ устойчивости конструкции при действии статической ветровой нагрузки, результаты которого показали, что на потерю устойчивости в основном влияют величина и область действия положительного коэффициента силы ветра на наветренной поверхности цилиндра.

В работе [19] исследуется распределение ветровой нагрузки, а также ее влияние на однослойные сетчатые цилиндрические оболочки.

Измерения проводились в аэродинамической трубе на трех моделях для различных отношений формы конструкции, также проведены статический и динамический расчеты с учетом колебательной составляющей на предельную грузоподъемность и устойчивость оболочек. Показано распределение ветровой нагрузки по поверхности оболочки.

Существует ряд методик учета воздействия ветровой нагрузки при проведении инженерных расчетов [20–22], и в данной работе будет проведен сравнительный анализ двух из них [20, 22].

Расчеты будут проведены на примере купола проектируемой в настоящий момент гостиницы «Санта-Мария» (г. Благовещенск, Россия). Данное здание в плане прямоугольное, состоящее из трех и пяти этажей. Оно является частью крупного туристического проекта «Маленькая Венеция», включающего в себя 22 объекта (гостиницы, торговые центры и ряды, бизнес-центры, центры отдыха и развлечений и др.). В рамках данной работы будет проведено исследование напряженно-деформированного состояния купола, венчающего пятиэтажную часть гостиницы «Санта-Мария».

Теория и методы

Способы задания ветровой нагрузки

Действующая в настоящий момент методика определения ветровой нагрузки (СНиП 2.01.07–85* «Нагрузки и воздействия») была разработана в начале 1970-х годов в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, в основу которой легли работы А. Г. Давенпорта (1962–1967) [23–26].

В новой редакции (СП 20.13330.2011) методика расчета ветровых нагрузок существенных изменений не претерпела. Несмотря на включение в него ряда схем и положений Eurocode, принципиальных отличий от «старого» СНиП документ не содержит.

Помимо утвержденных СНиП и СП, существуют и другие методики определения ветровой нагрузки, другие способы ее задания и другие аэродинамические коэффициенты.

Например, есть методика, которая предложена во втором томе справочнике В. В. Горева «Строительные конструкции» [22]. Следует отметить, что в справочнике рассматривается расчет ребристого купола, однако способ приложения нагрузки и значения аэродинамических

коэффициентов, приведенных в книге, являются справедливыми для куполов любого вида.

Определение величины ветровой нагрузки согласно СП 20.1330.2011 «Нагрузки и воздействия»

Как известно, ветровая нагрузка относится к типу кратковременных нагрузок P , притом для зданий и сооружений необходимо учитывать следующие составляющие воздействия ветра:

- а) основной тип ветровой нагрузки (в дальнейшем — «ветровая нагрузка»);
- б) пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструктивные элементы ограждения и элементы их крепления;
- в) резонансное вихревое возбуждение;
- г) аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования, дивергенции и флаттера.

Резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования необходимо учитывать для зданий и сплошностенчатых сооружений, у которых $h/d > 10$, где h — высота здания, d — характерный поперечный размер.

Нормативное значение ветровой нагрузки следует задавать в одном из двух вариантов. В первом случае нагрузка представляет собой совокупность:

- а) нормального давления w , приложенного к внешней поверхности сооружения или элемента;
- б) сил трения w_f , направленных по касательной к внешней поверхности и отнесенных к площади ее горизонтальной (для шедовых или волнистых покрытий, покрытий с фонарями) или вертикальной проекции (для стен с лоджиями и подобных конструкций);
- в) нормального давления w_i , приложенного к внутренним поверхностям сооружений с защищаемыми ограждениями, с открывающимися или постоянно открытыми проемами.

Во втором случае нагрузка рассматривается как совокупность:

- а) проекций w_x и w_y , внешних сил в направлении осей x и y , обусловленных общим сопротивлением сооружения;
- б) крутящего момента w_z относительно оси z .

В данной работе нормативное значение ветровой нагрузки будет определяться по первому варианту.

Нормативное значение ветровой нагрузки w следует определять как сумму средней w_m и пульсационной w_p составляющих:

$$w = w_m + w_p.$$

При определении внутреннего давления w_i , а также при расчете многоэтажных зданий высотой до 40 м и одноэтажных производственных зданий высотой до 36 м при отношении высоты к пролету менее 1,5, размещаемых в местностях типов А и В (А — открытые побережья морей, озер и водохранилищ, пустыни, степи, лесостепи, тундра; В — городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м), пульсационную составляющую ветровой нагрузки допускается не учитывать [21]. Поэтому в данной работе будем рассматривать только среднюю составляющую ветровой нагрузки.

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки в зависимости от эквивалентной высоты над поверхностью земли следует определять по формуле

$$w_m = w_0 k(z_e),$$

где w_0 — нормативное значение ветрового давления; $k(z_e)$ — коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты [20].

Для получения расчетного значения средней составляющей ветровой нагрузки, ее нормативное значение умножается на коэффициент запаса по нагрузке, равный 1,4 [20]. Таким образом, расчетное значение средней составляющей ветровой нагрузки определяется по формуле

$$w_m = w_0 k(z_e) 1,4.$$

Согласно приложению Д1.4 [20] ветровая нагрузка на купол делится на три составляющие — w_1 , w_2 и w_3 , различающиеся по интенсивности и прикладываемые к куполу на трех различных участках: А, В и С (согласно рис. 1). Коэффициенты для этих составляющих (C_1 , C_2 и C_3 соответственно) также определяются по рис. 1.

Для того чтобы получить три составляющие ветровой нагрузки w_1 , w_2 и w_3 на участках купола А, В и С, нужно расчетную ветровую нагрузку w_m умножить на соответствующий коэффициент C_1 , C_2 или C_3 [20]:

$$w_1 = w_m C_1, \quad w_2 = w_m C_2, \quad w_3 = w_m C_3.$$

Нагрузка прикладывается вдоль местной оси z (перпендикулярно к срединной поверхности купола).

Определение величины ветровой нагрузки по [22]

При расчете купола на горизонтальную ветровую или несимметричную вертикальную нагрузку, конструкцию купола расчленяют на четыре квадранта. Наибольшее перемещение получает сегмент купола, расположенный в плоскости равнодействующей ветрового давления в первом и третьем квадрантах [22]. Схема воздействия ветровой нагрузки на купол изображена на рис. 2.

Расчеты

Характеристика рассматриваемой конструкции

Рассматривается купол, по характеристикам аналогичный куполу гостиницы «Санта-Мария» (г. Благовещенск, Россия). Высота купола $f = 14,3$ м, $d = 26$ м, материал — сталь. Согласно проекту купол выполнен ребристым, однако поскольку объектом исследования является именно способ расчета ветровой нагрузки, который справедлив для любой конструкции купола, для упрощения процесса моделирования было принято решение «размазать» ребра жесткости и таким образом перейти к конструкции купола в виде гладкой оболочки толщиной 9 см.

Расчет параметров ветровой нагрузки

Расчет в соответствии с СП «Нагрузки и воздействия»

Согласно СП в составляющих ветровой нагрузки резонансное вихревое возбуждение

Рис. 1. Схема ветровой нагрузки на купольное покрытие [20]

Рис. 2. Схема воздействия ветровой нагрузки [22]

и аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования необходимо учитывать для зданий и сплошностенчатых сооружений, у которых $h/d > 10$, где h — высота здания, d — характерный поперечный размер. Так как для рассматриваемого купола соотношение $h/d = 38,8 \text{ м} / 26 \text{ м} = 1,49 < 10$, где $h = 38,8 \text{ м}$ — общая высота здания, резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания не учитываются.

При расчете многоэтажных зданий высотой до 40 м и одноэтажных производственных зданий высотой до 36 м при отношении высоты к пролету менее 1,5, размещаемых в местностях типов А и В, пульсационную составляющую ветровой нагрузки допускается не учитывать [21], поэтому здесь ею также пренебрегаем.

Далее определим расчетное значение средней составляющей ветровой нагрузки в зависимости от эквивалентной высоты над поверхностью земли:

$$w_m = w_0 k(z_e) \cdot 1,4.$$

Так как город Благовещенск относится к третьему снеговому району [20], то нормативное значение ветрового давления $w_0 = 0,38 \text{ кПа}$.

Согласно СП, если $d < h \leq 2d$ и $z \geq h - d$, то можно принять эквивалентную высоту над поверхностью земли $z_e = h$ (здесь z — высота расположения купола над уровнем земли, и в данном случае $z = 24,5 \text{ м}$). Для заданной высоты здания и диаметра купола $26 < 38,8 \leq 52$ и $24,5 \geq (38,8 - 26)$,

получим $z_e = h = 38,8 \text{ м}$. Так как тип местности В — это городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м, то согласно табл. 11.2 «Типы местности» из [20] коэффициент $k(z_e) = 1,3$; коэффициент надежности при расчете конструкции на действие ветровой нагрузки принимается 1,4 [20]. Таким образом, получаем

$$w_m = w_0 k(z_e) \cdot 1,4 = 0,38 \text{ кПа} \cdot 1,3 \cdot 1,4 = 0,69 \text{ кПа}.$$

Теперь, используя рис. 3, определим коэффициенты для значений нагрузки на участках А, В и С. Для чего вычислим отношение высоты купола к его диаметру: $f/d = 14,3 \text{ м} / 26 \text{ м} = 0,55$. На оси f/d найдем значение 0,55 и проведем перпендикуляр к этой оси. Отметим точки пересечения перпендикуляра с линиями А, В и С. Из этих точек отметим перпендикуляры на ось C_p , получая таким образом значения коэффициентов C_1 , C_2 и C_3 .

Разветвленные графики (в зависимости от h/d) для А и С при значении $f/d = 0,55$ сходятся каждый в единую линию, таким образом, значению $f/d = 0,55$ соответствует только по одному значению коэффициентов C_1 и C_3 . Отсюда имеем $C_1 = 0,8$, $C_3 = -0,5$.

Однако значению $f/d = 0,55$ соответствуют два значения коэффициента C_2 . Выбор нужного значения C_2 зависит от отношения высоты здания в целом к диаметру купола. Для нашего случая это отношение будет равно

Таблица 1

Значения аэродинамических коэффициентов c и c_1 [22]

f/d	0,5	0,4	0,3	0,2
c	1,2	1,1	1	0,9
c_1	0,7	0,6	0,4	0,3

Рис. 3. Определение коэффициентов ветровой нагрузки для рассматриваемой конструкции

$$h/d = (38,8 \text{ м} - 14,3 \text{ м}) / 26 \text{ м} = 24,5 \text{ м} / 26 \text{ м} = 0,94 \geq 0,5.$$

В соответствии с полученным значением h/d выберем нижний график B , отсюда $C_2 = -1,3$. Таким образом, окончательно получим

$$\begin{aligned} w_1 &= w_m C_1 = 0,69 \text{ кПа} \cdot 0,8 = \\ &= 0,55 \text{ кПа} = 0,055 \text{ т/м}^2, \\ w_2 &= w_m C_2 = 0,69 \text{ кПа} \cdot (-1,3) = \\ &= -0,89 \text{ кПа} = -0,089 \text{ т/м}^2, \\ w_3 &= w_m C_3 = 0,69 \text{ кПа} \cdot (-0,5) = \\ &= -0,35 \text{ кПа} = -0,035 \text{ т/м}^2. \end{aligned}$$

При расчете в ПВК ЛИРА-САПР 2013 три полученные составляющие ветровой нагрузки w_1 , w_2 и w_3 будут указаны на участках купола A , B и C . Следует отметить, что нагрузка будет приложена трапециевидно, что обеспечит постепенное изменение ее величины (рис. 4).

Расчет в соответствии со справочником «Строительные конструкции»

Чтобы получить три составляющие ветровой нагрузки w_c , w_{c1} и $w_{0,4}$ на сегментах купола, нужно расчетную ветровую нагрузку w_m , полученную в предыдущем параграфе, умножить на соответствующий коэффициент c , c_1 или $0,4$.

Значения аэродинамических коэффициентов определяются по табл. 1 [22].

Так как $f/d = 0,55$, методом интерполяции определяем коэффициенты: $c = 1,25$ и $c_1 = 0,75$. В результате, получим

$$\begin{aligned} w_c &= w_m c = 0,69 \text{ кПа} \cdot 1,25 = \\ &= 0,86 \text{ кПа} = 0,086 \text{ т/м}^2, \\ w_{c1} &= w_m c_1 = 0,69 \text{ кПа} \cdot 0,65 = \\ &= 0,45 \text{ кПа} = 0,045 \text{ т/м}^2, \\ w_{0,4} &= w_m \cdot 0,4 = 0,69 \text{ кПа} \cdot 0,4 = \\ &= 0,28 \text{ кПа} = 0,028 \text{ т/м}^2. \end{aligned}$$

В данном случае нагрузка также может быть приложена как трапециевидная (рис. 5).

Используемое программное обеспечение

Численный расчет напряженно-деформированного состояния купола под воздействием

Рис. 4. Схемы приложения ветровой нагрузки согласно способу 1

Рис. 5. Схемы приложения ветровой нагрузки согласно способу 2

ветровой нагрузки был выполнен с помощью конечно-элементного моделирования в программно-вычислительном комплексе (ПВК) ЛИРА-САПР 2013.

Параметры расчета:

- топология системы — разбиение конструкции купола на конечные элементы. Был выбран тип конечного элемента «четырёхугольные пластины». Количество разбиений по окружности купола $n_r = 163$ участков, количество разбиений по высоте $n_h = 28$ участков;
- сечения элементов — толщина пластины 9 см, удельный вес стали $R_0 = 7850 \text{ т/м}^2$;
- условия опирания — по нижнему опорному кольцу купола принято жесткое закрепление;
- нагрузочные состояния — к куполу прикладывается два варианта ветровой нагрузки: согласно СП 20.1330.2011 «Нагрузки и воздействия» и по справочнику В. В. Горева [22].

Расчет напряженно-деформированного состояния купола в ПВК «Лира-САПР»

В ПВК «Лира-САПР» был проведен расчет напряженно-деформированного состояния рас-

сматриваемого купола при действии на него ветровой нагрузки. Нагрузка задавалась двумя описанными выше способами.

ПВК «Лира-САПР» позволяет задавать нагрузки и рассматривать перемещения, вызванные ими, в глобальной и локальной системах координат. Глобальная система координат в ПВК — трехмерная ортогональная система координат (X, Y, Z) с началом координат в точке $(0, 0, 0)$.

Локальная система координат для узлов и конечных элементов задается инженером в ПВК вручную. В данном случае — это трехмерная ортогональная система координат (x, y, z) , заданная так, что местная ось z перпендикулярна поверхности купола, а оси x и y лежат в этой плоскости и располагаются в меридиональном и экваториальном направлениях.

На рис. 6 показаны поля перемещений, полученные для варианта приложения нагрузки согласно СП, а на рис. 7 — соответствующие им поля напряжений (главные напряжения N_1 , N_3 и касательное напряжение τ_{xy}). На рис. 6 все данные приводятся в локальных осях x, y, z .

Рис. 6. Поля перемещений, полученные для варианта приложения нагрузки согласно СП (в локальных осях координат)

Рис. 7. Поля напряжений, полученные для вариантов приложения нагрузки согласно СП

Рис. 8. Поля перемещений, полученные для вариантов приложения нагрузки согласно [22] (в локальных осях координат)

Рис. 9. Поля напряжений, полученные для вариантов приложения нагрузки согласно [22]

На рис. 8 показаны поля перемещений, полученные для варианта приложения нагрузки согласно [22], а на рис. 9 — соответствующие им поля напряжений (главные напряжения N_1 , N_3 и касательное напряжение τ_{xy}). Все данные приводятся в локальных осях x, y, z .

В табл. 2 приводятся численные результаты проведенных расчетов.

Сравнивая оба метода, можно сделать вывод, что:

- статический расчет по СП «Нагрузки и воздействия» [20] дает наибольшие значения по перемещениям x и главным напряжениям N_1 и N_3 . Однако в этом методе не учитывается боковой отпор (ветровая нагрузка, возникающая в направлении, перпендикулярном направлению ве-

Таблица 2

Результаты статического расчета стального купола на ветровую нагрузку двумя методами

Рассчитываемые параметры		СП «Нагрузки и воздействия»	Справочник «Строительные конструкции», т. 2
$\tau_{xy}, \text{т/м}^2$		$\pm 6,47$	$\pm 8,1$
Наибольшее значение главного напряжения, т/м^2	N_1	9,66	12,2
	N_3	-9,82	-7,09
Наибольшее перемещение, мм	В глобальных осях	x	0,791
		y	$\pm 0,634$
		z	0,835
	В локальных осях	x	0,633
		y	$\pm 0,47$
		z	0,833

тра), хотя, например, для прямоугольных в плане зданий СП его учитывает;

- статический расчет по [22] дает наибольшие значения касательного напряжения τ_{xy} и перемещений вдоль осей y и z . Кроме того, данный метод учитывает боковую нагрузку, а значит, такой способ задания нагрузки на купол более реалистичный. Однако при проведении расчетов значения перемещений вдоль оси x оказываются меньше, чем в первом методе.

В связи с этим можно сделать предположение, что снижение значений перемещений вдоль оси x связано с тем, что в справочнике В. В. Горева величины аэродинамических коэффициентов ветровой нагрузки меньше, чем в СП, т. е. меньше величина приложенной нагрузки.

Заключение

Таким образом, на примере стального купола было проанализировано несколько способов учета воздействия ветровой нагрузки, а также получены данные о напряженно-деформированном состоянии конструкции.

Способ учета ветровой нагрузки согласно [20] является наиболее простым и позволяет весьма приближенно и быстро оценить поведение конструкции.

Библиографический список

1. *Iskhakov I., Ribakov Y.* Design principles and analysis of thin concrete shells, domes and folders. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group. 2016. 166 p.
2. *Viola E. et al.* Generalized stress-strain recovery formulation applied to functionally graded spherical shells and panels under static loading // *Composite Structures*. 2016. Vol. 156. P. 145–164. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.12.060.
3. *Карпов В. В., Семенов А. А.* Безразмерные параметры в теории подкрепленных оболочек // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2015. № 3. С. 74–94. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.07
4. *Ren D., Qu Y., Yang L.* The Analysis of Wind Vibration Coefficient of Long-Span Dome Structures with Different Thickness. American Society of Civil Engineers. 2012. P. 1196–1204. doi: 10.1061/9780784412190.130.
5. *Al-Hashimi H., Seibi A.C., Molki A.* Experimental Study and Numerical Simulation of Domes Under Wind Load. ASME, 2009. Pp. 519–528. doi: 10.1115/PVP2009-77801.
6. *Sun Y., Qiu Y., Wu Y.* Modeling of Wind Pressure Spectra on Spherical Domes // *International Journal of Space Structures*. 2013. Vol. 28, № 2. Pp. 87–100. doi: 10.1260/0266-3511.28.2.87.
7. *Uematsu Y. et al.* Wind-induced dynamic behavior and its load estimation of a single-layer latticed dome with a long span // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2001. Vol. 89, № 14–15. Pp. 1671–1687. doi: 10.1016/S0167-6105(01)00125-8.
8. *Chen B., Yan X.-Y., Yang Q.-S.* Wind-Induced Response and Universal Equivalent Static Wind Loads of Single Layer Reticular Dome Shells // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2014. Vol. 14, № 04. Pp. 1450008. doi: 10.1142/S0219455414500084.
9. *Qiu Y., Sun Y., Wu Y.* Characteristics of Wind Loads on Spherical Shells with Large Rise-Span Ratio // *Advanced Materials Research*. 2010. Vol. 163–167. Pp. 4149–4155. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.4149.
10. *Li Y.-Q., Tamura Y.* Wind-Resistant Analysis for Large-span Single-layer Reticulated Shells // *International Journal of Space Structures*. 2004. Vol. 19, № 1. Pp. 47–59. doi: 10.1260/026635104322988362.
11. *Chen L. et al.* Nonlinear Buckling Behavior of Cylindrical Shells of Uniform Thickness under Wind Load // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 594–597. Pp. 2753–2756. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.2753.
12. *Поддаева О. И., Буслаева Ю. С., Грибач Д. С.* Экспериментальное исследование ветровых нагрузок на многофункциональный высотный жилой комплекс // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2014. № 6. С. 58–62.
13. *Егорычев О. О., Чуринов П. С.* Экспериментальное исследование ветровых нагрузок на высотные здания // *Жилищное строительство*. 2015. № 6. С. 20–22.
14. *Ганеева М. С., Мусеева В. Е., Скворцова З. В.* Расчет нелинейного напряженно-деформированного состояния непологих оболочек вращения под действием ветровой нагрузки // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2009. № 9–10. С. 89–98.
15. *Селютин Л. Ф.* Компьютерное моделирование многоэтажных зданий с учетом ветрового воздействия // *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2013. № 8 (137). С. 84–87.
16. *Chen L., Rotter J. M.* Buckling of anchored cylindrical shells of uniform thickness under wind load // *Engineering Structures*. 2012. Vol. 41. Pp. 199–208. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.03.046.
17. *Huang P., Zhou X., Gu M.* Experimental study of wind loads on cylindrical reticulated shells // *Applied Mathematics and Mechanics*. 2013. Vol. 34, № 3. Pp. 281–296. doi: 10.1007/s10483-013-1670-6.

18. Jerath S., Sadid H. Buckling of Orthotropic Cylinders Due to Wind Load // *Journal of Engineering Mechanics*. 1985. Vol. 111, № 5. Pp. 610–622. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:5(610).

19. Li Y.Q. et al. Wind loading and its effects on single-layer reticulated cylindrical shells // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2006. Vol. 94, № 12. Pp. 949–973. doi: 10.1016/j.jweia.2006.04.004.

20. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. М., 2011.

21. СНиП 2.01.07–85*. Нагрузки и воздействия. М., 2004.

22. Горев В. В. Справочник «Строительные конструкции». Т. 2: Металлические конструкции. М.: АСВ, 1998. 576 с.

23. Davenport A. G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds // *Quarterly Journal Royal Meteorological society*. 1961. Vol. 87. Pp. 194–211. doi: 10.1002/qj.49708737208

24. Davenport A. G. The response of slender, line like structures to a gusty wind // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1962. Vol. 23, Issue 3. Pp. 389–408. doi: 10.1680/jicep.1962.10876

25. Davenport A. G. The buffeting of large superficial structures by a atmospheric turbulence // *Annals of New York Academy of Sciences*. 1964. Vol. 116. Pp. 135–160. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb33943.x

26. Davenport A. G. The dependence of wind loads on meteorological parameters // *Proceedings International Research Seminar “Wind effects on buildings and structures”*, Ottawa, 11–15 September 1967. Vol. 1. Pp. 19–82.

References

1. Iskhakov I., Ribakov Y. *Design principles and analysis of thin concrete shells, domes and folders*. Boca Raton, Florida, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016, 166 p.
2. Viola E. et al. Generalized stress-strain recovery formulation applied to functionally graded spherical shells and panels under static loading. *Composite Structures*, 2016, vol.156, pp. 145–164. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.12.060.
3. Karpov V. V., Semenov A. A. *Bezrazmernye parametry v teorii podkreplennykh obolochek* [Dimensionless parameters in the theory of the supported shells]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika – Bulletin of PNIPU. Mechanics*, 2015, no. 3, pp. 74–94. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.07
4. Ren D., Qu Y., Yang L. The Analysis of wind vibration coefficient of long-span dome structures with different thickness. *American Society of Civil Engineers*, 2012, pp. 1196–1204. DOI: 10.1061/9780784412190.130.
5. Al-Hashimi H., Seibi A. C., Molki A. Experimental study and numerical simulation of domes under wind load. *ASME*, 2009, pp. 519–528. DOI: 10.1115/PVP2009-77801.
6. Sun Y., Qiu Y., Wu Y. Modeling of wind pressure spectra on spherical domes. *International Journal of Space Structures*, 2013, vol. 28, no. 2, pp. 87–100. DOI: 10.1260/0266-3511.28.2.87.
7. Uematsu Y. et al. Wind-induced dynamic behavior and its load estimation of a single-layer latticed dome with a long span. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2001, vol. 89, no. 14–15, pp. 1671–1687. DOI: 10.1016/S0167-6105(01)00125-8.
8. Chen B., Yan X.-Y., Yang Q.-S. Wind-induced response and universal equivalent static wind loads of single layer reticular dome shells. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2014, vol. 14, no. 04, p. 1450008. DOI: 10.1142/S0219455414500084.
9. Qiu Y., Sun Y., Wu Y. Characteristics of wind loads on spherical shells with large rise-span ratio. *Advanced Materials Research*, 2010, vol. 163–167, pp. 4149–4155. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.4149.
10. Li Y.-Q., Tamura Y. Wind-resistant analysis for large-span single-layer reticulated shells. *International Journal of Space Structures*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 47–59. DOI: 10.1260/026635104322988362.
11. Chen L., et al. Nonlinear buckling behavior of cylindrical shells of uniform thickness under wind load. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 594–597, pp. 2753–2756. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.2753.
12. Poddaeva O. I., Buslaeva Yu. S., Gribach D. S. *Ehksperimental'noe issledovanie vetrovykh nagruzok na mnogofunktsional'nyy vysotnyy zhiloy kompleks* [Pilot study of wind loads effecting the multipurpose high-rise housing complex]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova – Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2014, no. 6, pp. 58–62.
13. Egorychev O. O., Churin P. S. *Ehksperimental'noe issledovanie vetrovykh nagruzok na vysotnye zdaniya* [Pilot study of wind loads effecting high-rise buildings]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2015, no. 6, pp. 20–22.
14. Ganeeva M. S., Moiseeva V. E., Skvortsova Z. V. *Raschet nelineynogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya nepologikh obolochek vrashcheniya pod deystviem vetrovoy nagruzki* [Calculation of the nonlinear intense deformed condition of non-flat shells of rotation under the influence of wind loading]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki – News of higher educational institutions. Power industry problems*, 2009, no. 9–10, pp. 89–98.
15. Selyutina L. F. *Komp'yuternoe modelirovanie mnogoetazhnykh zdaniy s uchetom vetrovogo vozdeystviya* [Computer modeling of multi-storey buildings taking into

account the wind effect]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta – Scientific notes of the Petrozavodsk State University*, 2013, no. 8 (137), pp. 84–87.

16. Chen L., Rotter J. M. Buckling of anchored cylindrical shells of uniform thickness under wind load. *Engineering Structures*, 2012, vol. 41, pp. 199–208. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.03.046.

17. Huang P., Zhou X., Gu M. Experimental study of wind loads on cylindrical reticulated shells. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, vol. 34, no. 3, pp. 281–296. DOI: 10.1007/s10483-013-1670-6.

18. Jerath S., Sadid H. Buckling of Orthotropic Cylinders Due to Wind Load. *Journal of Engineering Mechanics*, 1985, vol. 111, no. 5, pp. 610–622. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:5(610).

19. Li Y. Q., et al. Wind loading and its effects on single-layer reticulated cylindrical shells. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2006, vol. 94, no. 12, pp. 949–973. DOI: 10.1016/j.jweia.2006.04.004.

20. SP 20.13330.2011 «Nagruzki i vozdeystviya» [SP 20.13330.2011 “Loadings and influences”]. Moscow, 2011.

21. CNIП 2.01.07–85* «Nagruzki i vozdeystviya» [CNIП 2.01.07–85* “Loadings and influences”]. Moscow, 2004.

22. Gorev V. V. *Spravochnik «Stroitel'nye konstruksii»* [Reference book “Building constructions”]. Vol. 2. *Metallicheskie konstruksii* [Metal constructions]. Moscow, ASV Publ., 1998, 576 p.

23. Davenport A.G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. *Quarterly Journal Royal Meteorological society*, 1961, vol. 87, pp. 194–211. DOI: 10.1002/qj.49708737208

24. Davenport A. G. The response of slender, line like structures to a gusty wind. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 1962, vol. 23, iss. 3, pp. 389–408. DOI: 10.1680/iicep.1962.10876

25. Davenport A.G. The buffeting of large superficial structures by atmospheric turbulence. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1964, vol. 116, pp. 135–160. DOI: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb33943.x

26. Davenport A. G. The dependence of wind loads on meteorological parameters. *Proceedings International Research Seminar “Wind effects on buildings and structures”*, Ottawa, 11–15 September 1967, vol. 1, pp. 19–82.