

УДК 624.042.41:624.074.2

П. А. ХАЗОВ, канд. техн. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики; **А. С. МОЛЬКОВ**, магистрант кафедры теории сооружений и технической механики; **А. А. МОЛЕВА**, студент

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И ЧИСЛЕННАЯ АЭРОДИНАМИКА КУПОЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В ФОРМЕ ШЕСТИГРАННОЙ ПИРАМИДЫ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»
Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96,
(951)-919-09-19; эл почта: khazov.nngasu@mail.ru

Ключевые слова: аэродинамика, аэродинамический коэффициент, аэротруба, ветровая нагрузка, ветер, конструкция, купол, макет, шестигранная пирамида, ПК *Robot Structure Analysis*, ПК *ANSYS*.

*Приводится сравнение результатов расчета ветровых нагрузок на купольную конструкцию в форме шестигранной пирамиды по нормативному документу с результатами испытаний макета купола в аэротрубе и моделями сгенерированных ветровых нагрузок в ПК *Robot Structure Analysis* и *ANSYS*.*

Введение

С развитием строительной сферы, усовершенствованием различных программно-вычислительных комплексов, ростом механизации и автоматизации строительства набирают популярность здания и сооружения нестандартной формы. Все они должны соответствовать повышенным требованиям безопасности, из-за чего проектирование таких объектов сопровождается решением сложных и ответственных задач, одной из которых является прогнозирование взаимодействия здания с ветровыми потоками. Широкий диапазон архитектурных решений стимулирует развитие аэродинамических исследований в интересах строительства [1-8]. Ключевая задача при этом – определение аэродинамических коэффициентов, устанавливающих пропорциональность между скоростным напором ветрового потока и результирующим избыточным давлением на ограждающих конструкциях сооружения.

Для некоторых типовых форм зданий и сооружений эта задача решается с применением свода правил [1]. Однако при проектировании объектов, принципиальная геометрическая схема которых не совпадает ни с одной из представленных в приложении В [1], определение аэродинамических коэффициентов возможно путем физических испытаний или с помощью математического моделирования.

Объектом исследования выступает купольная конструкция (рис. 1) высотой 6,275 м, с внешним и внутренним диаметрами основания 36 м и 31,75 м соответственно, угол наклона грани $21,16^{\circ}$. Выполнены испытания макета конструкции в аэродинамической трубе, аналитический расчет ветровой нагрузки и численные исследования в ПК *RSA* и *ANSYS*.

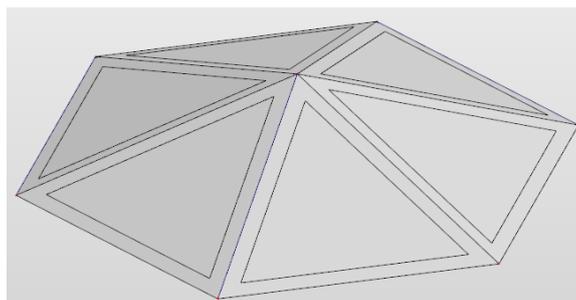


Рис. 1. Исследуемый купол

Нормативная методика расчета

Аналитический расчет ветровой нагрузки производился согласно методике, представляющей собой модификацию предложенных в СП 20.13330.2016 подходов [1]. Нормативное значение средней составляющей основной ветровой нагрузки w_m в зависимости от эквивалентной высоты z_e над поверхностью Земли определено по формуле 11.2 [1].

Для оценки ветрового воздействия в первой итерации рассматривается конус, огибающий купольную систему, при этом для направления потоков в ребро купола расчет ведется как для сооружения с коническим покрытием по п. В.1.4 [1] (рис. 2). Поскольку конструкция имеет несколько ребер, была предложена интеграция со схемой задания ветровых нагрузок на двускатные покрытия (зона J для из п. В.1.2 [1] (рис. 3)) при направлении ветра в грань купола.

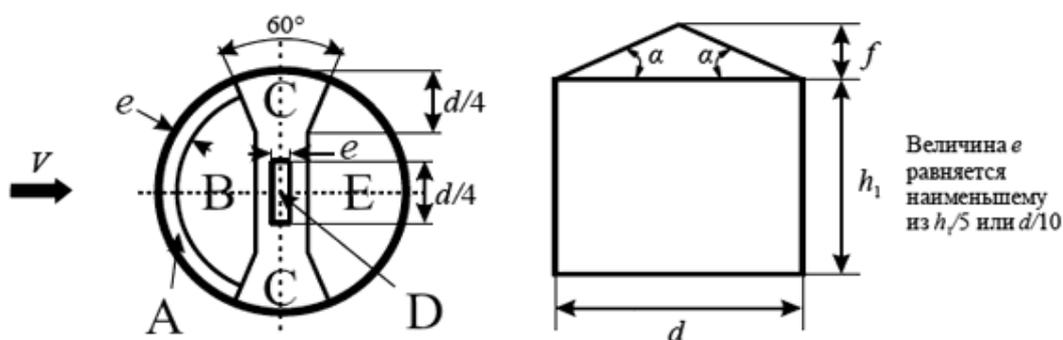


Рис. 2. Схема ветровых нагрузок для сооружений с коническим покрытием



Рис. 3. Схема ветровых нагрузок для двускатных покрытий при направлении ветра, перпендикулярном коньку



Результаты расчета ветровой нагрузки по зонам приведены в табл. 1.

Таблица 1

Нормативные ветровые нагрузки по зонам

z_e , м	$k(z_e)$	w_{0z} , кПа	A , кПа	B , кПа	C , кПа	D , кПа	E , кПа	JD , кПа	JS , кПа
			$c_e=-1,5$	$c_e=-1$	$c_e=-1,1$	$c_e=-2$	$c_e=-0,7$	$c_e=-1,59$	$c_e=-0,8745$
9,35	0,6305	0,23	-0,2175	-0,145	-0,1595	-0,29	-0,1015	-0,2306	-0,1268
10,35	0,657	0,23	-0,2267	-0,1511	-0,1662	-0,3022	-0,1058	-0,2403	-0,1321
11,35	0,677	0,23	-0,2336	-0,1557	-0,1713	-0,3114	-0,109	-0,2476	-0,1362
12,35	0,697	0,23	-0,2405	-0,1603	-0,1763	-0,3206	-0,1122	-0,2549	-0,1402
13,35	0,717	0,23	-0,2474	-0,1649	-0,1814	-0,3298	-0,1154	-0,2622	-0,1442
14,35	0,737	0,23	-0,2543	-0,1695	-0,1865	-0,339	-0,1187	-0,2695	-0,1482
15,35	0,757	0,23	-0,2612	-0,1741	-0,1915	-0,3482	-0,1219	-0,2768	-0,1523

Экспериментальное и численное исследование

Физический эксперимент заключается в испытании макета конструкции в аэродинамической трубе [9–13]. При проведении такого исследования, согласно приложению Ж [1], должно соблюдаться условие подобия чисел Рейнольдса, соответствующих модели и исследуемому объекту.

Число Рейнольдса определяется соотношением:

$$Re = \frac{V_0 l_y}{\nu},$$

где V_0 – характерная средняя скорость ветра или потока в аэродинамической трубе ($V_0^{\text{э}}$); l_y – размер сооружения или модели в направлении, перпендикулярном направлению скорости V_0 ; ν – кинематическая вязкость воздуха.

Так как значения кинематической вязкости воздуха для потока в аэродинамической трубе и в естественных условиях практически не отличаются, отношение чисел Рейнольдса, соответствующих макету и натурному сооружению, пропорционально линейному масштабу моделирования. Испытания в аэродинамической трубе можно считать достоверными при соблюдении геометрического подобия модели и исследуемого объекта.

В рабочей зоне аэродинамической установки (рис. 4) был установлен макет купола в масштабе 1:150 (рис. 1 цв. вклейки). На каждой грани модели выполнено по 9 отверстий диаметром 4 мм, к которым присоединялись гибкие трубки.

К СТАТЬЕ П. А. ХАЗОВА, А. С. МОЛЬКОВА, А. А. МОЛЕВОЙ
«ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ КУПОЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В
ФОРМЕ ШЕСТИГРАННОЙ ПИРАМИДЫ»



Рис. 1. Макет купола и испытательная установка

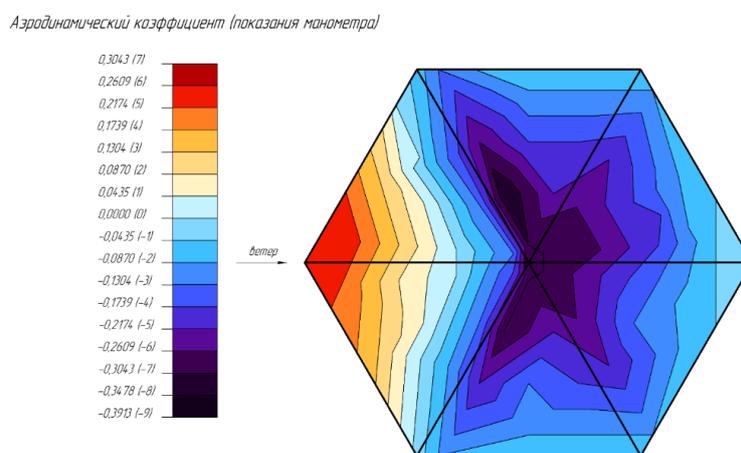


Рис. 2. Аэродинамические коэффициенты, полученные по результатам аэродинамических испытаний при направлении ветра в ребро купола

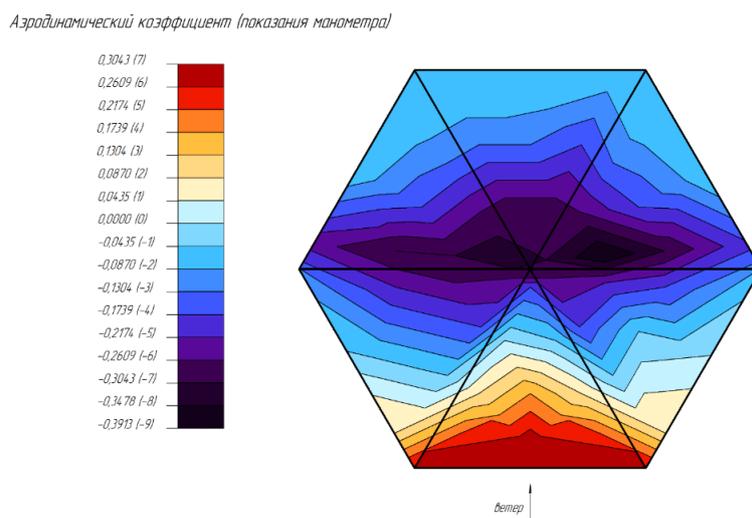


Рис. 3. Аэродинамические коэффициенты, полученные по результатам аэродинамических испытаний при направлении ветра в грань купола

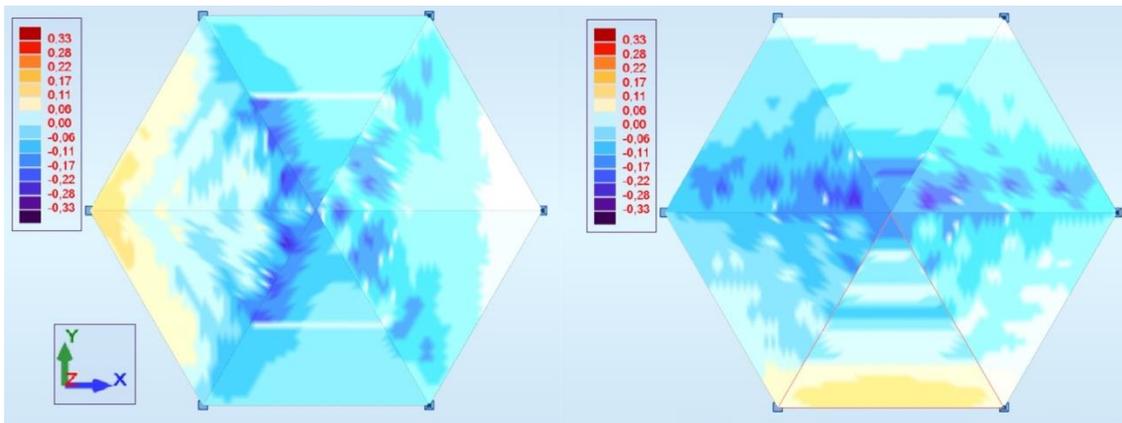


Рис. 4. Изополя ветрового давления: ветер в ребро по X^+ (слева), ветер в грань по Y^+ (справа) (ПК *RSA*)

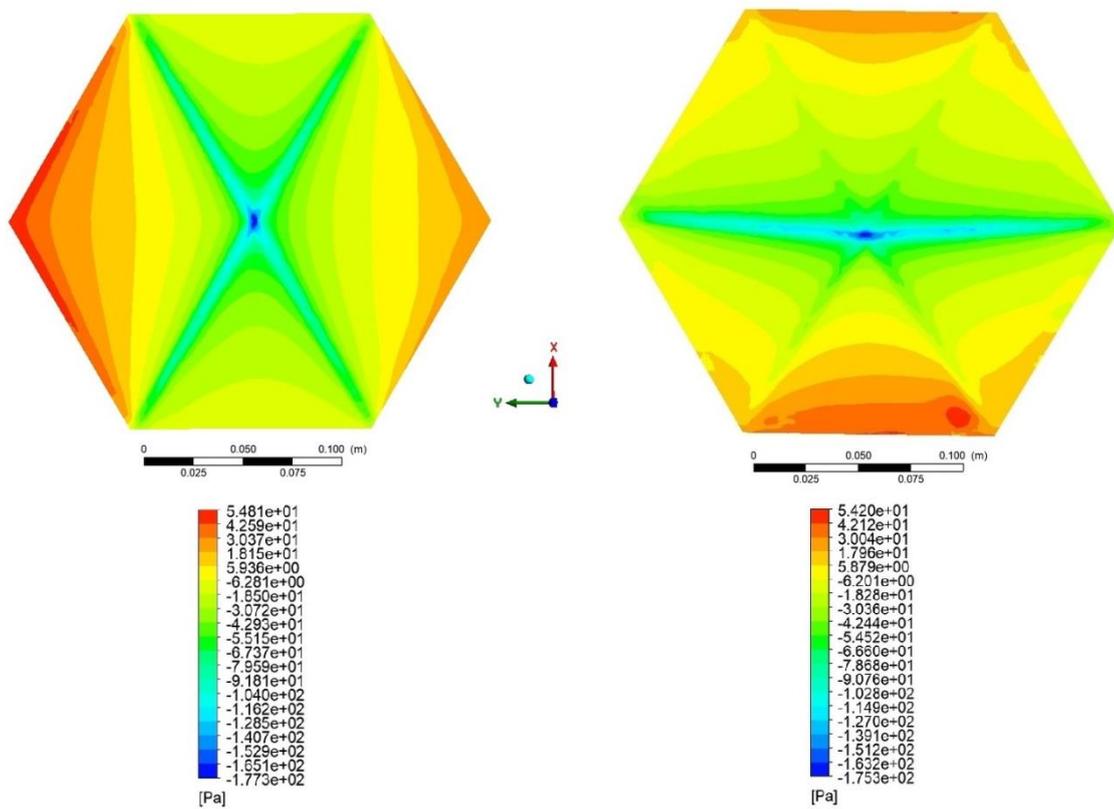


Рис. 5. Изополя ветрового давления: ветер в ребро по Y^- (слева), ветер в грань по X^+ (справа) (ПК *ANSYS*)

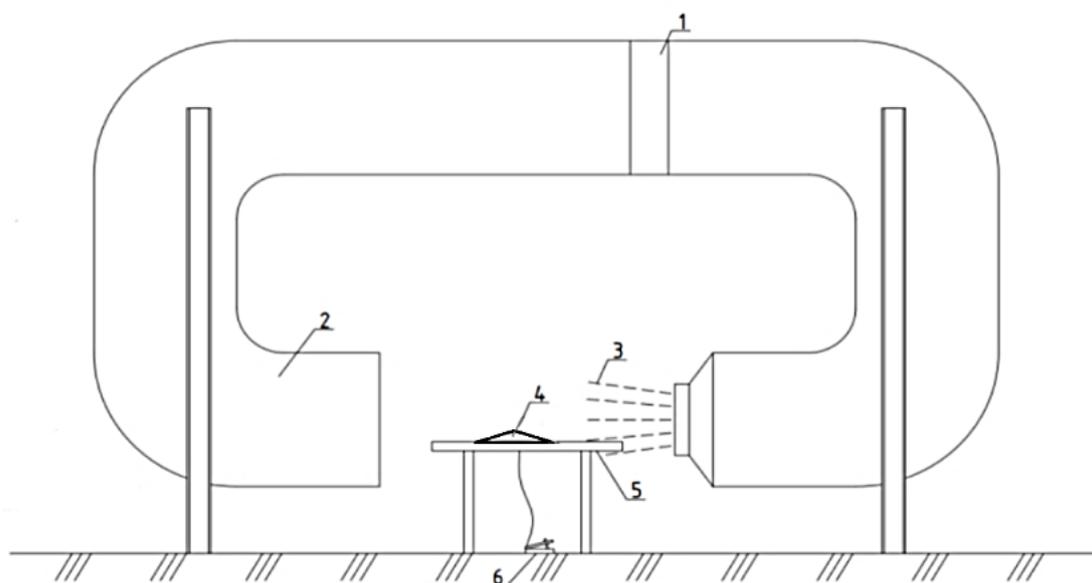


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – осевой вентилятор; 2 – аэродинамическая труба; 3 – ветровой поток в рабочей области трубы; 4 – исследуемый макет; 5 – специальный подиум; 6 – микроманометр

В рабочей области был создан равномерный поток воздуха. Для измерения давления ветра в характерных точках модели применялся спиртовой манометр. Макет продувался в двух направлениях: в ребро купола (рис. 2 цв. вклейки) и в грань (рис. 3 цв. вклейки).

Для контрольной проверки предложенного варианта аналитического расчета и результатов физических испытаний было проведено моделирование в ПК *Robot Structure Analysis* и *ANSYS* при помощи автоматической генерации ветровых нагрузок с нормативным значением давления ветра 0,23 кПа (рис. 4–5 цв. вклейки). Преимущества численного моделирования обусловлены возможностью учета различных факторов, влияющих на скорость и направление ветра в окрестности строительных объектов, которые не могут быть оценены с использованием нормативных методик. Применение расчетных комплексов позволяет получить результаты, более приближенные к реальности.

Сравнивая результаты расчета ветровых воздействий на исследуемую конструкцию по нормативной методике СП 20.13330.2016 с результатами испытаний макета купола в аэродинамической трубе и моделями сгенерированных нагрузок в ПК *RSA* и *ANSYS*, можно сделать следующие **выводы**:

1. Предложенный нормативным документом [1] вариант расчета с применением типовых геометрических схем не подходит для определения аэродинамических характеристик исследуемой конструкции даже при введении в схему дополнительных зон. По результатам расчета с использованием СП 20.13330.2016 на модели полностью отсутствуют участки положительного давления, которые получены при исследовании конструкции в аэродинамической трубе и с помощью программных комплексов. Наиболее вероятно это связано с тем, что представленная в СП методика распространяется в первую очередь на купольные покрытия зданий, опирающиеся на поднятые над землей конструкции



(рис. 2), в то время как объект настоящего исследования опирается непосредственно на основание.

2. Изополя распределения аэродинамических коэффициентов и ветрового давления по результатам экспериментального и численного исследований во многом совпадают. Для направления ветра как в ребро купола, так и в его грань при проведении натурных испытаний и численного моделирования можно выделить одинаковые участки, в которых наблюдается высокая сходимость результатов по характеру распределения ветрового давления (выявлена зона положительного давления на наветренной стороне покрытия, при этом наибольшее значение ветрового отсоса наблюдается в районе вершины пирамиды).

3. Стоит заметить, что при расчете в ПК *ANSYS*, помимо выявленной зоны положительного давления на наветренной стороне купола, ветровой напор наблюдается также и на участке подветренной части покрытия, который отсутствует на изополях, полученных в результате испытаний в аэродинамической трубе и расчета в ПК *RSA*.

Таблица 2

Максимальные и минимальные значения ветрового давления

Метод расчета	Направление ветра по отношению к куполу	Максимальное давление		Минимальное давление	
		Значение, кПа	Расположение	Значение, кПа	Расположение
Нормативный (СП 20.13330)	в ребро	-0,1015	нижняя зона подветренной стороны	-0,3482	вершина пирамиды
	в грань	-0,1268	нижние зоны боковых сторон	-0,2768	вершина пирамиды
Экспериментальный	в ребро	+0,0378	нижняя зона наветренной стороны	-0,0681	вершина пирамиды
	в грань	+0,0499	нижняя зона наветренной стороны	-0,0681	вершина пирамиды
ПК <i>RSA</i>	в ребро	+0,11	нижняя зона наветренной стороны	-0,17	вершина пирамиды
	в грань	+0,11	нижняя зона наветренной стороны	-0,17	вершина пирамиды
ПК <i>ANSYS</i>	в ребро	+0,0548	нижняя зона наветренной стороны	-0,1773	вершина пирамиды
	в грань	+0,0421	нижняя зона наветренной стороны	-0,1753	вершина пирамиды

4. По результатам исследований было определено, что на всем покрытии преимущественно происходит отсос, наибольшее его значение наблюдается в районе вершины пирамиды и составляет -0,17 кПа по данным вычислительных



комплексов. Также имеется зона с положительным давлением, максимальное значение которого для направления ветра в ребро купола составляет +0,11 кПа при моделировании в ПК *RSA*, +0,05 кПа при моделировании в ПК *ANSYS*; те же значения при направлении ветра в грань купола составляют +0,11 кПа, +0,04 кПа соответственно.

Для наглядности максимальные и минимальные значения ветрового давления, полученные по результатам исследований, с зонами их локации приведены в табл. 2.

Таким образом, при реальном проектировании зданий и сооружений нестандартной геометрической формы следует производить физический эксперимент и численное моделирование в различных программных комплексах, в которых реализованы *CFD*-технологии, принимая для дальнейшего расчета наименее выгодный вариант загрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Нижегородской области (грант Нижегородской области в сфере науки, технологий и техники от 04.07.2023 года № 316-06-16-118a/23).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия : свод правил : издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 03 декабря 2016 г. № 891/пр : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* : дата введения 04 июня 2017 г. : [редакция от 31.05.2022]. – URL: <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 16.11.2023). – Режим доступа: КонсультантПлюс. Законодательство. Нижегородская область (ННГАСУ). – Текст : электронный.
2. Проектирование, строительство и эксплуатация высотных зданий с учетом аэродинамических аспектов / М. К. Михайлова, В. С. Далинчук, А. В. Бушманова, Л. В. Доброгорская. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016 – № 10 (49). – С. 59–74.
3. Ретгер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика : монография / Э. И. Ретгер. – Москва : Стройиздат, 1984. – 294 с. – Текст : непосредственный.
4. Симиу, Э. Воздействия ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан. – Москва : Стройиздат, 1984. – 360 с. – Текст : непосредственный.
5. Березин, М. А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций / М. А. Березин, В. В. Катюшин. – Новосибирск : Олден-полиграфия, 2003. – 138 с. – ISBN 5-94905-002-9. – Текст : непосредственный.
6. Поддаева, О. И. Архитектурно-строительная аэродинамика : учебное пособие / О. И. Поддаева, А. С. Кубенин, П. С. Чурин / Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – Москва : НИУ МГСУ, 2015. – 88 с. – ISBN 978-5-7264-1194-1. – Текст : непосредственный.
7. Экспериментальное и численное исследование влияния покрытия на характеристики ветрового потока между соседними зданиями / Д. Гельбашц, Э. Буйрук, Б. Сахин [и др.]. – Текст : непосредственный // 8-я международная конференция передовых технологий. – Элязыг, 2017. – С. 1648–1655.
8. Мохамед, А. Сравнение численного исследования влияния выступов здания на аэродинамику с результатами аэродинамических испытаний / А. Мохамед, К. Уайт, С. Уоткинс. – Текст : непосредственный // 15-й семинар Австралийского общества ветроэнергетики. – Сидней, 2012. – 4 с.



9. Экспериментальное исследование распределения ветровой нагрузки на поверхность большепролетного здания / П. А. Хазов, А. В. Февральских, Б. Б. Лампси [и др.]. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2019. – № 2. – С. 9–16.

10. Сатанов, А. А. Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов по поверхностям уникального высотного здания / А. А. Сатанов, А. А. Молева, Е. П. Исаева, Н. Г. Абраамян. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2023. – № 2. – С. 61–68.

11. Шилов, С. С. Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие / С. С. Шилов, Б. Б. Лампси, П. А. Хазов. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ : научно-технический журнал. – 2022. – № 1. – С. 21–31.

12. Сатанов, А. А. Определение аэродинамических характеристик большепролетного здания экспериментальными методами / А. А. Сатанов, А. В. Симонов, П. А. Хазов. – Текст : непосредственный // Строительная механика и конструкции. – 2023. – № 1 (36). – С. 63–74.

13. Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий / С. В. Гувернюк, О. О. Егорычев, С. А. Исаев [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ : научно-технический журнал. – 2011. – Том 1, № 3. – С. 185–191.

KHAZOV Pavel Alekseevich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of theory of structures and technical mechanics; MOLKOV Andrey Sergeevich, undergraduate student of the chair of theory of structures and technical mechanics; MOLEVA Alina Aleksandrovna, student

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL AERODYNAMICS OF A DOME STRUCTURE IN THE SHAPE OF A HEXAGONAL PYRAMID

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Pjinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: +7 (831) 430-54-96,
+7 (951)-919-09-19; e-mail: khazov.nngasu@mail.ru

Key words: aerodynamics, aerodynamic coefficient, air tube, wind load, wind, structure, dome, layout, hexagonal pyramid, PC Robot Structure Analysis, PC ANSYS.

The article compares the results of calculation of wind loads on a dome structure in the form of a hexagonal pyramid according to a regulatory document with those obtained during the tests of a dome model in an air tube and models of wind loads generated in the PC Robot Structure Analysis and PC ANSYS.

REFERENCES

1. SP 20.13330.2016 Nagruzki i vozdeystviya [Loads and effects] : svod pravil : utverzhdyon i vved. v deystvie Prikazom Min-va stroit. i zhilishchno-kommun. khozyaystva RF ot 03 dekabrya 2016g. № 891/pr : aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85* : data vved. 04 iyunya 2017 g. : [red. ot 31.05.2022]. – URL: <http://www.consultant.ru> (data obrascheniya: 16.11.2023). – Rezhim dostupa: KonsultantPlyus. Zakonodatelstvo. Nizhegorodskaya oblast (NNGASU).

2. Mikhaylova M. K., Dalinchuk V. S., Bushmanova A. V., Dobrogorskaya L. V. Proektirovanie, stroitelstvo i ekspluatatsiya vysotnykh zdaniy s uchyotom aerodinamicheskikh



aspektov [Design, construction and operation of high-rise buildings taking into account aerodynamic aspects] // Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy [Construction of Unique Buildings and Structures] / Sankt-Peterburg. politekh. un-t Petra Velikogo, 2016 – № 10 (49). – P. 59–74.

3. Retter E. I. Arkhitekturno-stroitel'naya aerodynamika [Architectural and constructional aerodynamics] : monografiya. Moscow : Stroyizdat. 1984. 294 p.

4. Simiu E., Scanlan R. Vozdeystviya vetra na zdaniya i sooruzheniya [Wind effects on structures]. Moscow : Stroyizdat. 1984. 360 p.

5. Berezin M. A., Katyushin V. V. Atlas aerodinamicheskikh kharakteristik stroitelnykh konstruksiy [Atlas of aerodynamic characteristics of building structures]. Novosibirsk : Oldenpoligrafiya, 2003. – 138 p. – ISBN 5-94905-002-9.

6. Poddaeva O. I., Kubenin A. S., Churin P. S. Arkhitekturno-stroitel'naya aerodynamika [Architectural-construction aerodynamics]: uchebnoe posobie / Nnatsional. issled. Moskov. gos. stroit. un-t. – Moscow: NIU MGSU, 2015, 88 p. – ISBN 978-5-7264-1194-1.

7. Gelbashts D., Buyruk E., Sakhin B., et al. Eksperimentalnoe i chislennoe issledovanie vliyaniya pokrytiya na kharakteristiki vetrovogo potoka mezhdru sosednimi zdaniyami [Experimental and numerical study of the effect of the coating on the characteristics of the wind flow between neighboring buildings] // 8-ya mezhdunarodnaya konferentsiya peredovykh tekhnologiy. – Elyazyg, 2017. – P. 1648–1655.

8. Mohamed A., White K., Watkins S. Sravnenie chislennogo issledovaniya vliyaniya vystupov zdaniya na aerodinamiku s rezultatami aerodinamicheskikh ispytaniy [Comparison of a numerical study of the effect of building performances on aerodynamics with the results of aerodynamic tests] // 15-y seminar Avstraliyskogo obshchestva vetroenergetiki. – Sidney, 2012. – 4 p.

9. Khazov P. A., Fevralskikh A. V., Lampsy B. B., et al. Eksperimentalnoe issledovanie raspredeleniya vetrovoy nagruzki na poverkhnost bolsheprolyotnogo zdaniya [Experimental study of wind load distribution on the surface of large-span buildings]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2019. – № 2. – P. 9–16.

10. Satanov A. A., Moleva A. A., Isayeva E. P., Abraamyam N. G. Eksperimental'noe issledovanie raspredeleniya aerodinamicheskikh koeffitsientov po poverkhnostyam unikal'nogo vysotnogo zdaniya [Experimental research of the distribution of aerodynamic coefficients on the surfaces of a unique high-rise building] // Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal] / Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Nizhny Novgorod, 2023. – № 2. – P. 61–68.

11. Shilov S. S., Lampsy B. B., Khazov P. A. Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie vetrovykh potokov na bolsheprolyotnoe pokrytie [Numerical and physical modeling of wind flows on a long-span coating]. Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. – 2022. – № 1. – P. 21–31.

12. Satanov A. A., Simonov A. V., Khazov P. A. Opredelenie aerodinamicheskikh kharakteristik bolsheprolyotnogo zdaniya eksperimentalnymi metodami [Determination of aerodynamic characteristics of a large-span building by experimental methods]. Stroitel'naya mekhanika i konstruksii [Structural mechanics and structures]. – 2023. – № 1(36). – P. 63–74.

13. Guvernyuk S. V., Egorychev O. O., Isaev S. A., et al. Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie vetrovogo vozdeystviya na gruppu vysotnykh zdaniy [Numerical and physical modeling of wind impact on a group of high-rise buildings]. Vestnik MGSU [MGSU Bulletin] : nauch. tekhn. zhurnal. 2011. Vol. 1.– № 3. – P. 185–191.

© П. А. Хазов, А. С. Мольков, А. А. Молева, 2023

Получено: 08.09.2023 г.