

УДК 624.011

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОБОЛОЧКИ ТИПА ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ПАРАБОЛОИДА В АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ И СРАВНЕНИЕ С ЧИСЛЕННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ

Стоянов В.В., Жгалли Ш.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2018-12-64-58>

Для анализа поведения сооружений при воздействии ветровой нагрузки существуют различные способы определения значений аэродинамических параметров, используя аналитические и опытные данные. На сегодняшний день наиболее развитым считается численный метод определения вышеупомянутых характеристик, основанный на численном решении системы уравнений Навье-Стокса. Точность результатов, полученных с использованием такого расчетного метода, для получения значений аэродинамических сил возросла вследствие пересмотра математических моделей и развития программных комплексов для дискретизации тел рассматриваемых объектов. В статье выполнен аналитический обзор результатов проведенных научных исследований в сфере изучения воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие очертания гипара, а именно оболочки квадратной в плане в форме гиперболического параболоида. Выделены особенности исследуемой формы в виде дискретизация поверхности в зависимости от аэродинамических коэффициентов, полученных в зарубежных литературах. Особое внимание уделено численному определению аэродинамических коэффициентов на поверхностях гиперболического параболоида. Обсуждаются полученные результаты и характер распределения коэффициентов в зависимости от угла атаки ветра. Выполнено аналитическое сравнение методов компьютерного моделирования турбулентных ветровых течений, основанных на решении уравнений Рейнольдса, возникающих вследствие применения осреднения уравнений Навье-Стокса. Рассмотрены основные модели турбулентности такие как: k-ε модель Standard; ММК; DBN; Shear-Stress Transport k-ω модель; Transition k-kl-ω модель. Проанализирована возможность выбора той или иной модели в зависимости от свойств и характеристик ветрового потока, для применения в численном моделировании обтекания ветром гиперболических оболочек. Так же был выполнен сравнительный анализ полученных результатов из физического испытания в аэродинамической трубе с численным моделированием в программном комплексе Ansys Fluent.

**Ключевые слова:** ветровой нагрузки, аэродинамической трубе, численный метод, гиперболического параболоида, турбулентных ветровых течений, уравнений Рейнольдса, Навье-Стокса, модели турбулентности, k-ε модель Standard, ММК, DBN, Shear-Stress Transport k-ω модель, Transition k-kl-ω модель.

**Введение.** В справочнике по проектированию тентовых конструкций [1-2] представлено общее распределение аэродинамических коэффициентов для конкретного гиперболического покрытия с параметром формы 4,7.

Где:

– Параметр формы гипара, определяются как соотношением диагональю к вертикальным расстоянию между высоким и низким опором.

– Поверхность покрытия гипара разделена на зоны, как представлено на рис. 1.

– Аэродинамические коэффициенты давления в каждой зоне перечислены (см. табл. 1).

Внешние значения  $C_p$  аэродинамических коэффициентов гипара с параметром формы 4,7.

Для таких форм оболочек характерны высокие и низкие опоры, а так же необходимо учитывать два основных угла атаки ветра. При этом незначительные отличия в высоте высоких

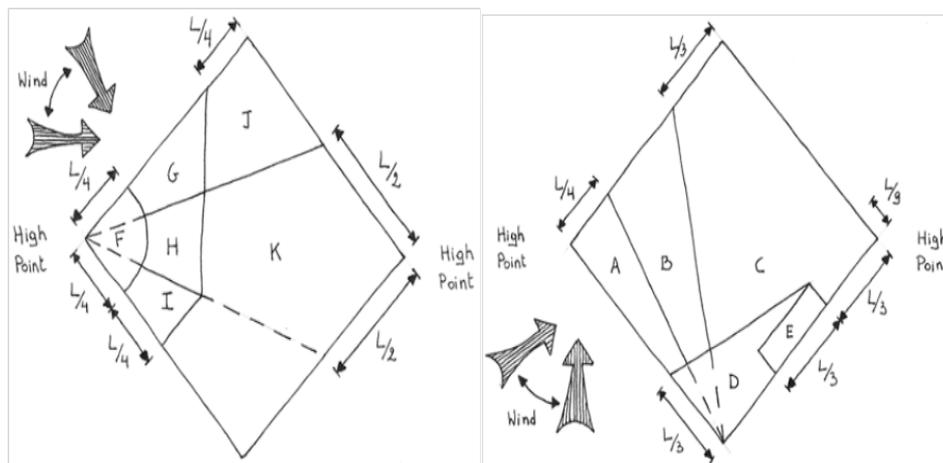


Рис. 1. Геометрические характеристики распределения аэродинамических коэффициентов гипара с параметром формы 4,7

Источник: [1-2]

© Стоянов В.В., Жгалли Ш., 2018

Таблица 1

Распределение аэродинамические коэффициенты давления

| Внешние значение $C_p$ | Зоны  |      |       |      |      |      |      |      |      |       |       |
|------------------------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
|                        | A     | B    | C     | D    | E    | F    | G    | H    | I    | J     | K     |
| позитивные             | 0     | 0    | +0.3  | +0.3 | +0.3 | 0    | 0    | +0.2 | 0    | 0     | +0.2  |
| отрицательные          | -1.45 | -0.9 | -0.65 | -0.7 | -1.2 | -1.8 | -1.2 | -0.9 | -1.2 | -0.65 | -0.65 |

Источник: [1-2]

и низких опор (ближе к плоской поверхности), создают маленькие кривизны поверхности, позволяя высокой скорости ветра обтекать здания, а в противном случае, уменьшает скорость ветра в зоне с меньшим радиусом кривизны, создавая положительное давление, что приводит к образованию низких значений.

**Анализ основных источников исследования и публикаций.** Существующие принципы (методики) определения характера и значений ветрового давления на объекты различных конструктивных форм, предложены в середине XX века специалистами ЦНИИСК им. Кучеренко опираясь на результаты, полученные в работах А. Давенпорта и А. Вайза, с последующей реализацией в профильном нормативном документе. В 1985 г. были упрощены зависимости, характеризующие динамическое поведение строительных конструкций в условиях ветровых воздействий [3].

Основные теоретические сведения об архитектурно-строительной аэродинамике, методиках определения ветровой нагрузки на здания и сооружения представлены в работах: Э. Симиу, Р. Сканлан, Э.И. Реттер, Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича [3-9]. Работы Е.В. Горохова, С.Г. Кузнецова [10], М.А. Березина, В.В. Катюшина [11], посвящены определению ветровых воздействий на здания и сооружения в аэродинамической трубе. В работах Р.И. Кинаша, Р.Л. Holroyd, М.С. Hort, Р.А. MacDonald [12-18] описано экспериментальное моделирование взаимодействия ветрового потока с инженерными сооружениями в аэродинамической трубе. В книгах Е.В. Горохова [19] и П.Г. Еремеева [20] представлены результаты модельных экспериментальных исследований ветровых и снеговых нагрузок на технически сложные большепролетные покрытия со сложной геометрией.

Также, отдельным аспектам численного моделирования ветровых воздействий посвящены исследования S. Murakami, A. Moshida, Y. Tominaga, T. Shirasawa [21-24] и др.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** В ДБНе, СНИПе, еврокоде, и в актуализированной редакции этих документов, отсутствуют схемы для определения характера распределения ветровой нагрузки, и снеговой нагрузки с учетом ссыпания и снегопереноса на гиперболических покрытиях, а в литературе также очень ограниченная информация о распределении давления ветра на покрытия. Это естественно заслужило повод исследования покрытий гипара экспериментальным путем в аэродинамической трубе параллельно с численным моделированием.

**Постановка задания.** Авторами предполагалось возводить модель гипара (рис. 2), для испытаний в аэродинамической трубе. Модель покрытия было изготовлено с параметром формы 9.42, пролетом 400 мм, и расстояния между низкими и высокими опорами составляет 60 мм. Благодаря геометрической симметрии покрытия, уменьшается общее количество точек измерения от 64 до 32 на каждой стороне.

Процессы изготовления модели представлены на (рис. 3). Форма гипара была создана в процессе отливания по предварительно заготовленному шаблону из пены полиуретана высокой плотности, которые были изготовленные фрезерным станком с чпу 5 осей модели BZT PFB 3020-G. Этот шаблон представляет собой пресс-форму, состоящую из двух частей верхней и нижней. Когда процесс фрезерования завершен, последняя обработка поверхности выполняется вручную, отшлифовывается чтобы удалить некоторые мелкие дефекты и достичь удовлетворительной гладкости, затем на формы наносится лак.

После чего высверливается 32 отверстия в местах расположения точек измерения, и устанавливаются трубки из ПВХ во время заливки.



Рис. 2. Модель гиперболической параболоид с прямолинейными краями внутри аэродинамической трубы

Источник: разработано авторами



Рис. 3. Процесс изготовления модели гипара

Источник: разработано авторами

За тем простилається два шари стеклоткани, внутренний 250 г/м<sup>2</sup>, и наружный по 18 г/м<sup>2</sup> для более гладкой отделки поверхности и для обеспечения прочности модели. Затем пресс-форма закрывается и с помощью затяжек закрепляется, после чего заливается ППУ.

Зарегистрированные данные и результаты были преобразованы в диаграммы распределения аэродинамических коэффициентов. Графики распределения коэффициентов давления производятся для различных углов атаки ветра.

Коэффициенты давления рассчитываются из полученных данных испытаний по Scanivalve и по формуле (1), которая преобразует среднее давление ветра в каждой точке, во время испытания. Таким образом, полученные коэффициенты давления представляют собой безразмерную форму регистрируемых давлений над рассматриваемой структурой.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} * \rho * V^2} = 1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (1)$$

где,  $C_p$  – коэффициент давления;  $P$  – давление ветра во время испытания;

$P_0$  – статическое давление ветра;  $\rho$  – плотность воздуха;  $V$  – скорость ветра во время испытания;  $V_0$  – статическая скорость ветра;

Уравнение коэффициента давления показывает, что в местах, где  $P > P_0$  или  $V < V_0$  накопление ветра приводит к положительным  $C_p$  значениям, тогда как при  $P < P_0$  или  $V > V_0$  приводит к отрицательным значениям  $C_p$ , а если  $P = P_0$  или  $V = V_0$ , то значениям  $C_p$  равным 0.

Уравнения могут быть расширены для средних и пиковых коэффициентов давления, как показано ниже.

$$C_{p,mean} = C_p = \frac{\Delta P_{mean}}{\frac{1}{2} * \rho * V_{mean}^2} \quad (2)$$

$$C_{p,peak} = C_p = \frac{\Delta P_{peak}}{\frac{1}{2} * \rho * V_{peak}^2} \quad (3)$$

**Основной материал и результаты по моделированию потока ветра.** Сначала проводили эксперимент со скоростью ветра 5 м/с и частотой 10 Гц, в течение 100 с. При этом модель здания поворачивается постепенно вокруг себя на 360°, чтобы определить наиболее критическое направление ветра. На каждом этапе испытания, регистрируются данные давления на обеих поверхностях покрытия.

Предварительные испытания проводились со скоростью ветра 5 м/с и при не быстром вращении модели, дабы не вызвать значительную турбулентность, что в свой очередь влияет на профиль ветра вблизи модели.

Кроме того, требуется достаточно большая частота регистрации измерений для нейтрализации эффектов турбулентности и получения непрерывности в измерениях по мере вращения модели.

Следующая серия испытаний в аэродинамической трубе выполняется для конкретных углов атаки ветра со скоростью ветра 5, 10 и 15 м/с с частотой 10 Гц в течение 50 с.

Ниже представлены полученные результаты, где иллюстрируют измеряемое наружное давление в зависимости от угла атаки ветра на здания

(рис. 4-6). Высокая скорость ветра, над покрытием ( $P < P_0$ ,  $V > V_0$ ), создает отрицательные аэродинамические коэффициенты, независимо от угла атаки ветра. Однако с большой концентрацией и интенсивностью в наветренной зоне покрытия.

Экстремальных значений давление видно при 45° и 315°, в то время как, наблюдается доминирующее значение отрицательных аэродинамических коэффициентов по всей поверхности оболочки, с затухающим эффектом в сторону подветренной зоны. Тем не менее, высокие локальные значения встречаются вблизи опоры и наветренных бортовых элементов оболочки, в результате локального разделения потока ветра следом над передней наветренной области (рис. 4-6).

Также, регистрировалась высокая турбулентность в зоне низкой опоры в случаи ее нахождения в подветренной стороне, и с наиболее экстремальными значениями при повороте от 270° до 360°. Относительно высоких опор, это явление происходит в случаи нахождения высоких опор в наветренной стороне при повороте от 0° до 90°.

Касательно средних аэродинамических коэффициентов внутренней стороны оболочки, то варьируются от -0,1 до -0,3 для всей 360°, с довольно равномерным и постоянным распределением по всей нижней поверхности покрытия.

Распределение внешних коэффициентов давления на покрытие здания определялось дискретно для основных направлений ветра от 0° до 180° с шагом 15°. Ветровая нагрузка на гиперболических покрытиях в основном оценивается двумя вариантами, соответствующее направление ветра по главным диагоналям. Эти два случая были также идентифицированы Отто Ф. в [2] и рассматриваются как два критических направления ветра при проектировании гипаров.

Наибольшее значение аэродинамических коэффициентов наблюдаются локально в наветренной стороне близко к опорам и в зоне бортовых элементов. Причем самые экстремальные значения в области высокой опоры при 45° и чуть меньшие значения в области низкой опоры при 135°. Вместе с тем, степень отрицательных коэффициентов уменьшается по мере приближения к центральной и подветренной области покрытия, за исключением зоны опор.

Ниже сравниваем полученные нами результаты, распределения внешних коэффициентов на гипара с параметром формы 9.42 и ранее полученных результатов представленных в [2] с параметром формы 4,7 (рис. 6-7), где можно сделать аналогичные выводы, как описано выше, и закон распределения аэродинамических коэффициентов в обеих экспериментах хорошо соответствуют друг другу. Хотя экспериментально полученные коэффициенты превосходят значения представленных в [2], в общем, закон распределения очень схож.

В первом случаи, где ветер направлен по диагонали, проходящей через высокие опоры (рис. 6), экспериментально полученные коэффициенты для всех зон покрытий примерно в 1,5 раза больше по сравнению с аналогичной схемой, представленной в [2]. Распределение коэффициентов, представленное в [2], иллюстрирует затухание отрицательных значения  $C_p$  в сторону подветренной опоры и по мере приближения к краям.

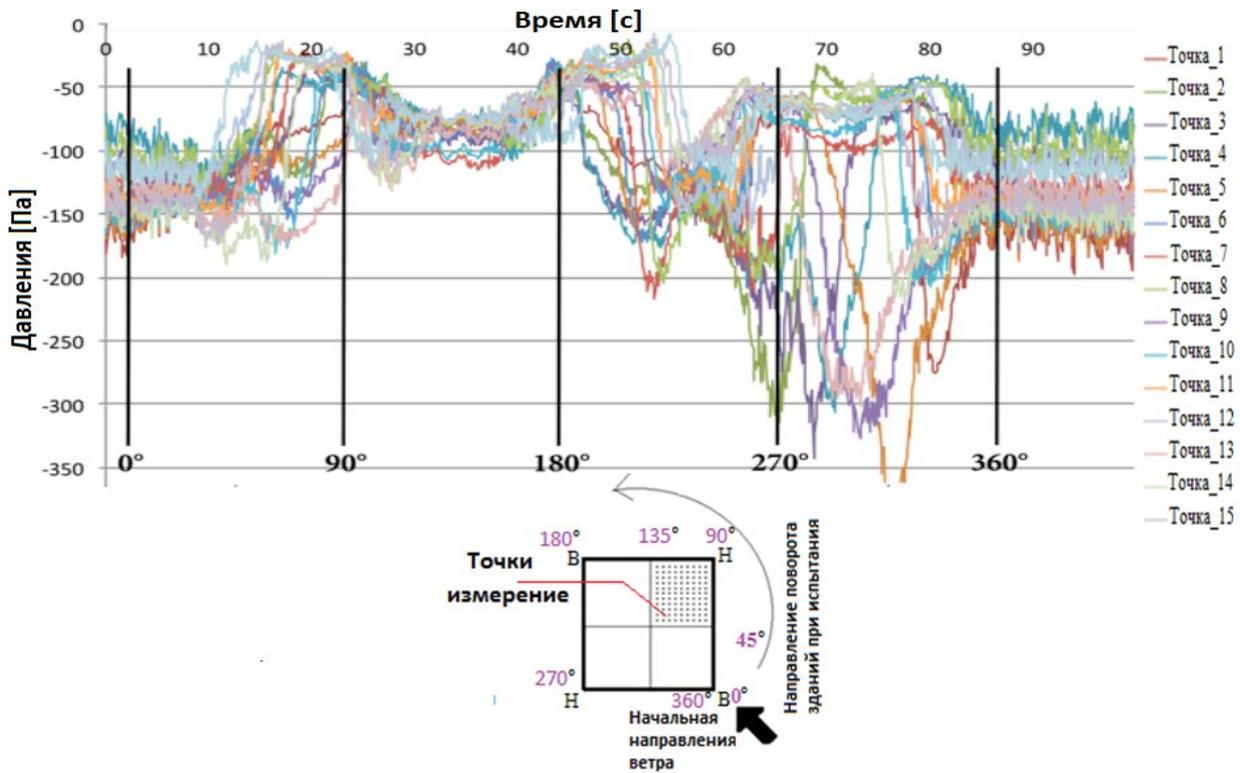


Рис. 4. Регистрация давления в первой четверти наружной стороны гиара, при повороте на 360°

Источник: разработано авторами

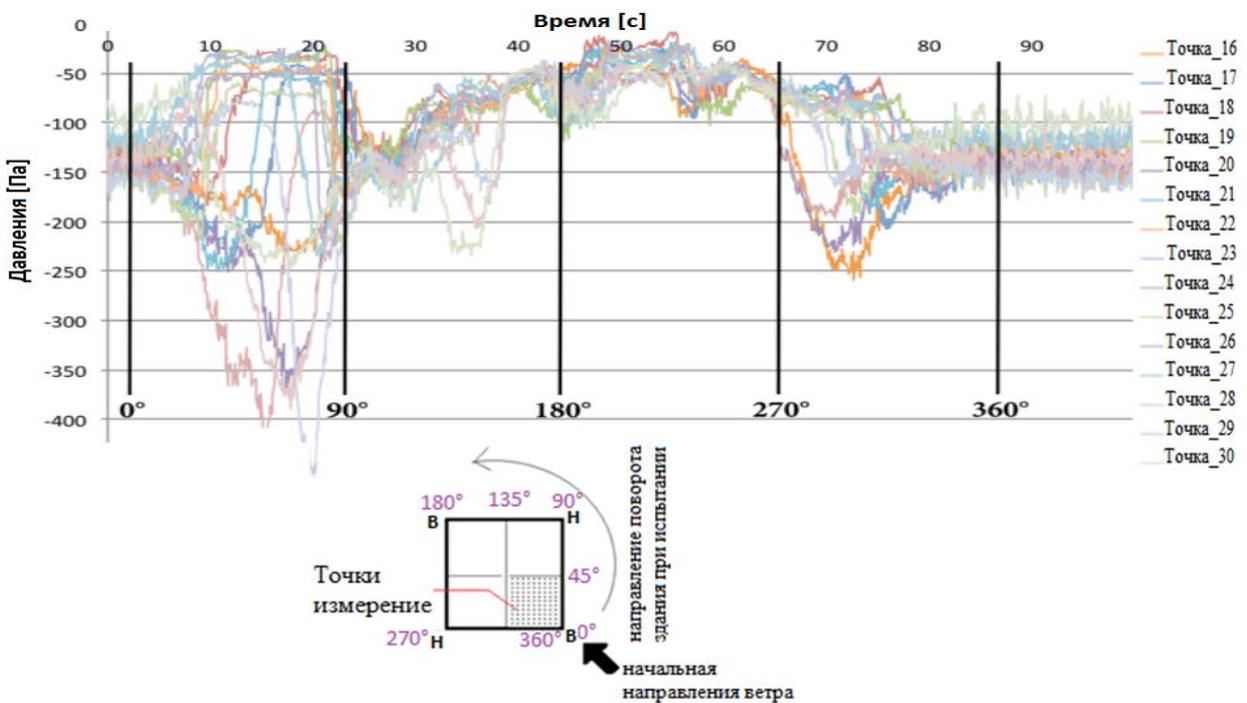


Рис. 5. Регистрации давления во второй четверти наружной стороны гиара при повороте на 360°

Источник: разработано авторами

В результате резкого изменения в геометрии здания, или препятствии потока ветер перенаправляется через покрытие, где скорость ветра увеличивается вокруг наветренных бортовых элементов, в последствии отделяется от покрытия создавая зону с отрицательными  $C_p$  вблизи

краев и опор. Вместе с этим и преобразуется экстремальных значений  $C_p$ . Кроме того, следует отметить, что увеличения скорости ветра, могут вызвать эффект вентури за счет местных наклонов поверхности покрытий в зоне высоких опор с наветренной стороны.

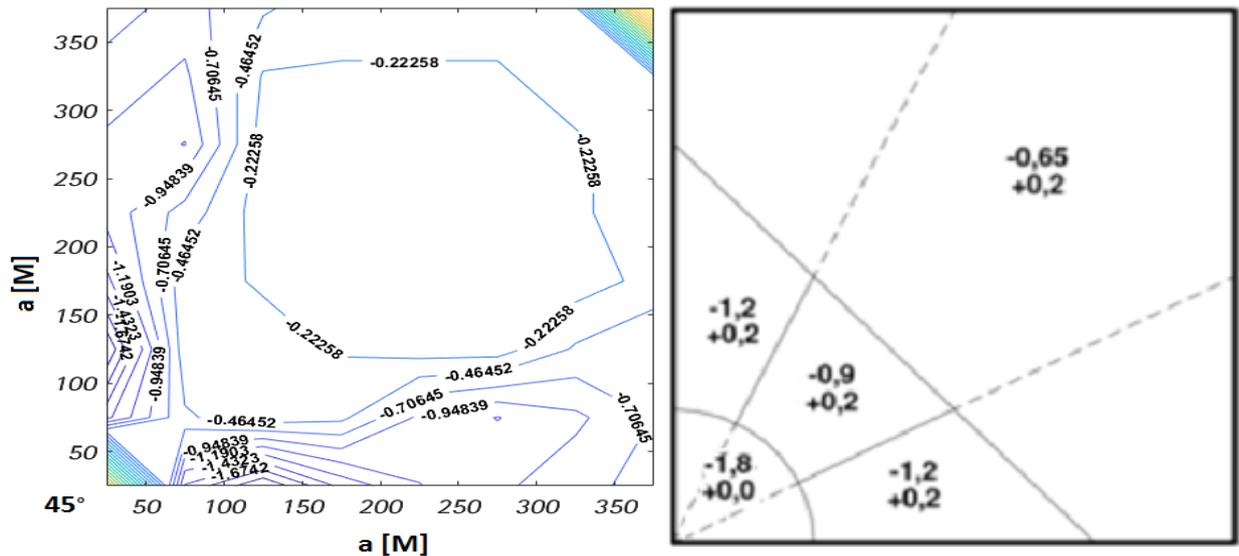


Рис. 6. Сравнение распределения внешних аэродинамических коэффициентов при направлении ветра по диагонали, проходящей через высокие опоры (нисходящие параболы гипара). Справа – результат испытания проведенный нами. Слева – результат испытания проведенный в Das hängende Dach

Источник: слева – разработано авторами; справа – [2]

На рис. 7 представлены экспериментально полученные аэродинамические коэффициенты на гипара, когда ветер направлен по низким опорам и как видно чуть больше чем в [2]. За исключением подветренной зоны, близко к низким опорам.

Распределение коэффициентов давления, представленное в [2], иллюстрирует более высокие значения всасывания на наветренных краях и довольно постоянные значения в зоне подветренной стороны. Отметим, что при направлении ветра по восходящей параболе, распределение коэффициентов, имеет более узкое радиальное подразделение по сравнению с тем, которое представлено для направления ветра по нисходящей параболе.

В данном случае интенсивность отрицательных значений  $C_p$  генерируется вблизи наветренного угла и краев в результате ускорения, и разделения перенаправленного потока ветра. Однако

зарегистрированные коэффициенты имеют ниже значения, чем в первом испытании, в результате снижения скорости ветра, протекающего по восходящей параболе.

В последствие сохраняет постоянную форму распределения коэффициентов для центральной и подветренной областей покрытия, за счет сложного взаимодействия между ветром находящимся ближе к поверхности покрытий и циркуляции ветра в подветренной зоне покрытия.

Как видно на рис. 8-9, закономерности распределения аэродинамических коэффициентов схоже между экспериментом и вычислением. Отметим, что в углах покрытия способ измерения в эксперименте допускает большие погрешности как показано на рисунках.

Это обстоятельство вызывается за счет сложной структуры потока, при первом столкновении

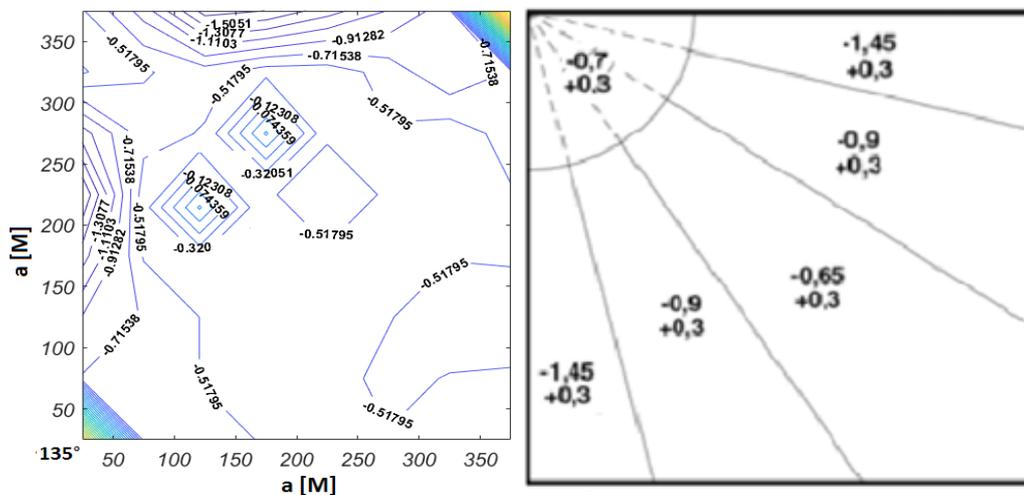


Рис. 7. Сравнение распределения внешних коэффициентов давления при направлении ветра по диагонали проходящей через низкие опоры (восходящие параболы гипара). Справа – результат испытания проведенный нами. Слева – результат испытания проведенный в Das hängende Dach [2]

Источник: слева – разработано авторами; справа – [2]

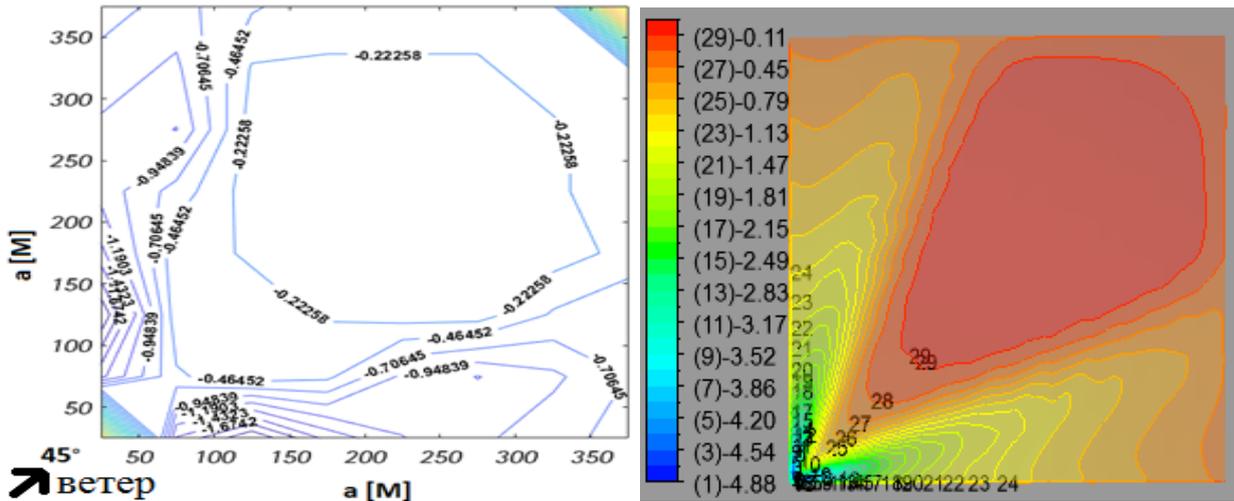


Рис. 8. Распределение аэродинамических коэффициентов при 45°. Справа – CFD. Слева – эксперимент

Источник: разработано авторами

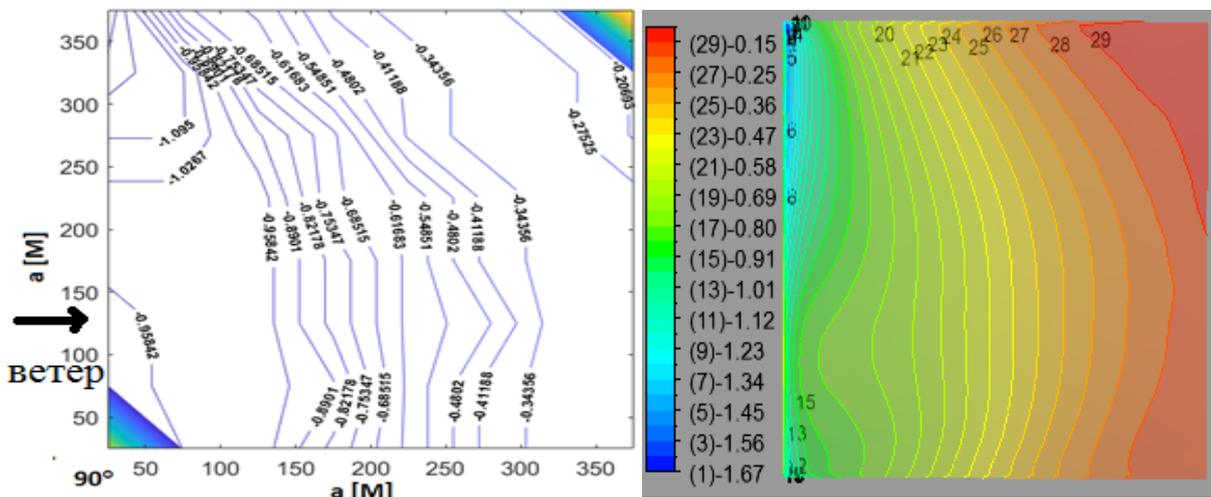


Рис. 9. Распределение аэродинамических коэффициентов при 90°. Справа – CFD. Слева – эксперимент

Источник: разработано авторами

с не плавно изменяемых геометрических форм (bluff body).

Изополя аэродинамических коэффициентов при направлении ветра 45° как показано на рис.7, разделяется на 6 участков, боковые центральную и переднюю зону, и это можно видеть и в численных результатах рис. 10. Однако площадь этих зон может, меняться в зависимости от моделей турбулентности, сохраняя при этом дислокации упомянутых участков.

По размерам площадь у боковых зон близкая к бортовым элементам наблюдается хорошее сходство между экспериментом и результатом, полученным при модели турбулентности DBN (модель дурбина). Центральные и боковые зоны, близкие к центру покрытий, также почти при всех моделях турбулентности хорошо совпадают с экспериментом. Распределение коэффициентов в передней наветренной зоне у низких опор по модели SST, MMK и DBN подобными эксперименту, а по SKE отличаются.

По численным значениям аэродинамических коэффициентов на рис. 11, где представлен график распределения аэродинамических коэффициентов

на поверхности гипара по линии Б, наблюдается близкое соответствие между экспериментом и вычислительной моделированием в центральной зоне с применением модели дурбина (DBN), а в боковых зонах модель, K-KL- $\omega$  больше всего близок к экспериментальными измерениями.

**Выводы.** В результате, наблюдается, что форма распределения аэродинамических коэффициентов с применением CFD хорошо совпадают с измерениями при физическом моделировании в аэродинамической трубе. Это указывает на высокую точность численного моделирования, и является достаточным основанием опираться на вычислительную гидроаэродинамику в дальнейших расчетах и определении снеговых нагрузок, поскольку моделирование снеговых нагрузок строиться на основе двухфазных моделях и фаза ветра играет первостепенное значение и находится на первом месте в процессе численного моделирования снегопереноса и снегоотложения.

В дальнейших расчетах будем уделять большее внимание следующим моделям турбулентности: SST, K-KL- $\omega$  и исправных моделей MMK и DBN.

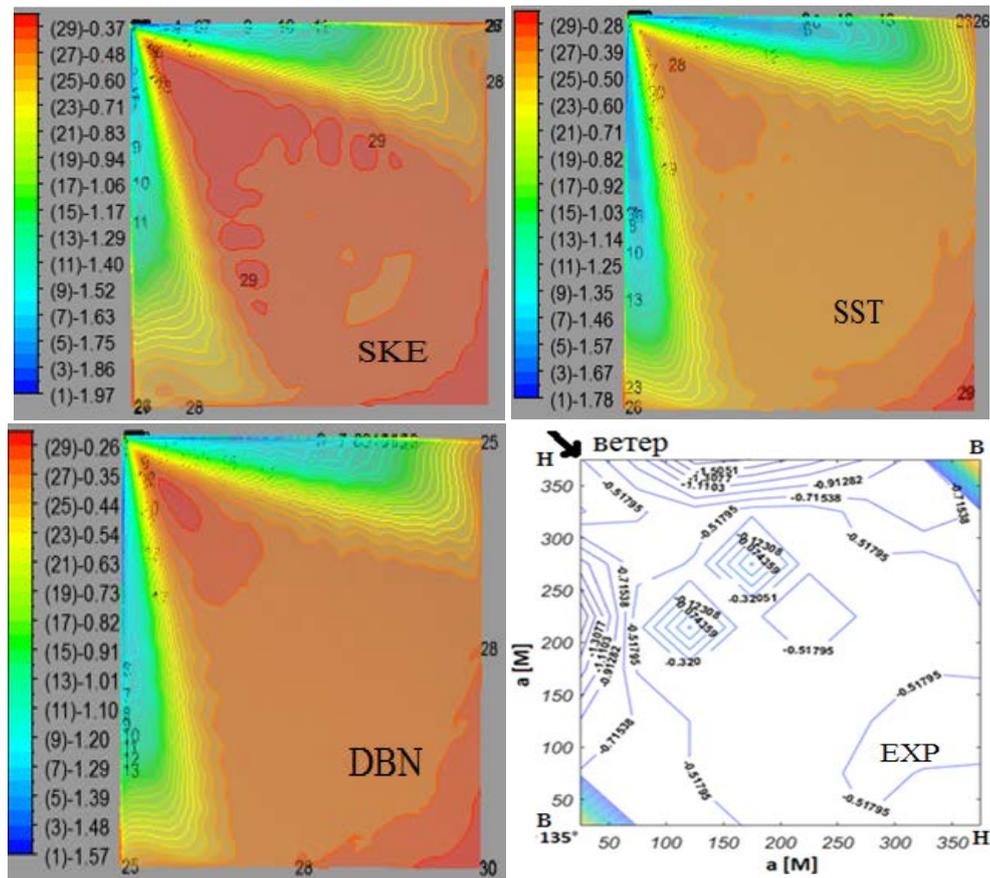


Рис. 10. Изополя распределения аэродинамических коэффициентов на поверхности гипара в эксперименте и CFD при разных моделях турбулентности

Источик: разработано авторами

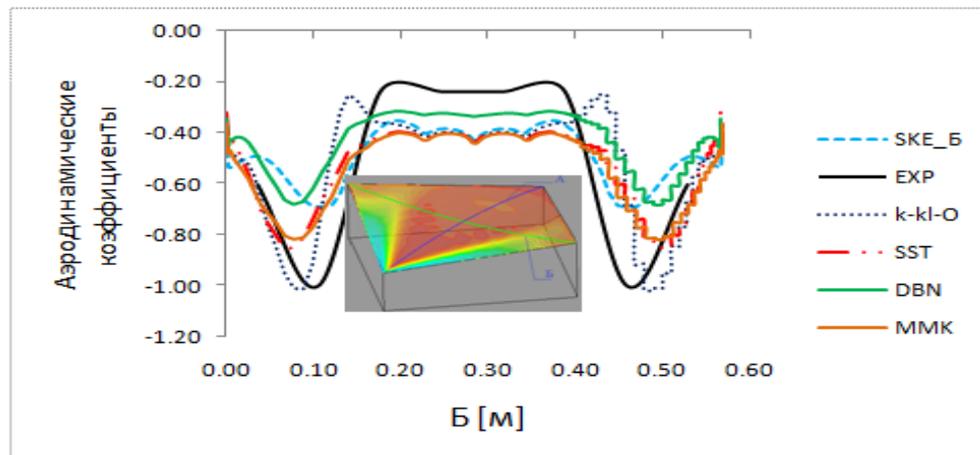


Рис. 11. График распределения аэродинамических коэффициентов на поверхности гипара по линии Б

Источик: разработано авторами

### Список литературы:

1. Forster, B., Mollaert, M. European design guide for tensile surface structures : TensiNet. Vrije Univ. Brussel . 2004. 354 p.
2. Otto, F. (1954). Das hängende Dach. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin.
3. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. – М.: Изд. лит. по стр-ву, 1972. 111 с.
4. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения [Текст]: пер. с англ. – М.: Изд. Стройиздат, 1984. 359 с.
5. Ретгер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика: монография. – М.: Изд. Стройиздат, 1984. – 294 с.
6. Корнев Б.Г., Рабинович И.М. Справочник по динамике сооружений. – М.: Изд. Стройиздат, 1972. 512 с.
7. Mushchanov, V.P., Zubenko, G.V., Moskalenko, I.V. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface [Текст] // Журнал Металлические конструкции. 2013. Vol. 3. P. 173-182.

8. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. М.: Изд. АСВ, Изд. СКАД СОФТ, Изд. ДМК Пресс, 2009. 528 с.
9. Пичугин С.Ф., Махилько А.В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции. – Полтава: Изд. АСМІ, 2005. 342 с.
10. Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения [Текст]. Донецк: Изд. Норд-Пресс, 2009. 169 с.
11. Березин М.А., Катюшин В.В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск: Изд. ООО Олденполиграфия, 2003. 140 с.
12. Кинаш Р.И., Копылов А.Е. Аэродинамические исследования четырех круглых цилиндров // Вестник НУ "Львовская политехника", "Теория и практика строительства". 2004. № 495. С. 88-92.
13. Кинаш Р.И., Копылов А.Е. Исследование аэродинамических параметров системы из двух круговых цилиндров // «Вестник». Донбасской национальной академия строительства и архитектуры. 2007. № 6(68). С. 32-40.
14. J. Franke, C. Hirsch, A.G. Jensen, H.W. Krüs, M. Schatzmann, P.S. Westbury, S.D. Miles, J.A. Wisse, N.G. Wright. Recommendations on the Use of CFD in Predicting Pedestrian Wind Environment, COST Action C14 "Impact of Wind and Storms on City Life and Built Environment", 2004.
15. Holroyd R.J. On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds (Part 1) [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1983. Vol. 12. P. 329-352.
16. Hort M.C., Robbins A.G. The dispersion of fugitive emissions from storage tanks [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2002. Vol. 90. P. 1321-1348.
17. MacDonald P.A. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1988. Vol. 31. P. 165-187.
18. MacDonald P.A. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: II. Effect of grouping [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1990. Vol. 34. P. 77-95.
19. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Кинаш Р.И., Шимановский А.В., Лебедич И.Н. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов [Текст]. Макеевка: Изд. РИО ДонНАСА, 2008. 405 с.
20. Еремеев П.Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений: монография. – М.: Изд. АСВ, 2009. – 336 с.
21. Mochida A., Tominaga Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R. Comparison of various k-ε models and DSM applied to flow around a high-rise building-Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. Wind Struct. 2002. Vol. 5(2-4). P. 227-244.
22. Murakami S. Computational wind engineering [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1990. Vol. 36, Part 1. P. 517-538.
23. Shirasawa T., Tominaga T., Yoshie R., Mochida A., Yoshino H., Kataoka H., Nozu T. Development of CFD method for predicting wind environment around a high-rise building part 2: the cross comparison of CFD results using various k-ε models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape // AIJ J. Technol. Des. 2003. Vol. 18. P. 169-174.
24. Tominaga Y., Mochida A., Shirasawa T. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex [Text] // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2004. Vol. 3. P. 63-70.

**Стоянов В.В., Жгаллі Ш.**

Одеська державна академія будівництва та архітектури

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОБОЛОНКИ ТИПУ ГІПЕРБОЛІЧНОГО ПАРАБОЛОЇДА В АЕРОДИНАМІЧНІЙ ТРУБІ І ПОРІВНЯННЯ З ЧИСЕЛЬНИМ МОДЕЛЮВАННЯМ

### Анотація

Для аналізу поведінки споруд при впливі вітрового навантаження існують різні способи визначення значень аеродинамічних параметрів, використовуючи аналітичні та дослідні дані. На сьогоднішній день найбільш розвиненим вважається чисельний метод визначення вищезазначених характеристик, заснованого на чисельному рішенні системи рівнянь Нав'є-Стокса. Точність результатів, отриманих з використанням такого розрахункового методу для отримання значень аеродинамічних сил зростає внаслідок перегляду математичних моделей і розвитку програмних комплексів для дискретизації тіл розглянутих об'єктів. У статті виконано аналітичний огляд результатів проведених наукових досліджень в сфері вивчення впливу вітрового навантаження на споруди, які мають обриси гіпару, а саме оболонки квадратної в плані у формі гіперболічного параболоїда. Виділено особливості досліджуваної форми у вигляді дискретизації поверхні в залежності від аеродинамічних коефіцієнтів, отриманих в зарубіжних літературах. Особливу увагу приділено чисельному визначенню аеродинамічних коефіцієнтів на поверхнях гіперболічного параболоїда. Обговорювалися отримані результати і характер розподілу коефіцієнтів в залежності від кута вітру. Виконано аналітичне порівняння методів комп'ютерного моделювання турбулентних вітрових течій, заснованих на вирішенні рівнянь Рейнольда, що виникають внаслідок застосування усереднення рівнянь Нав'є-Стокса. Розглянуто основні моделі турбулентності такі як: k-ε модель Standard; MMK; DBN; Shear-Stress Transport k-ω модель; Transition k-k1-ω модель. Проаналізовано можливість вибору тієї чи іншої моделі в залежності від властивостей і характеристик вітрового потоку, для застосування в чисельному моделюванні обтікання вітром гіперболічних оболонок. Так само було виконано, порівняльний аналіз отриманих результатів з фізичного випробування в аеродинамічній трубі з чисельним моделюванням у програмному комплексі Ansys Fluent.

**Ключові слова:** вітрового навантаження, аеродинамічній трубі, чисельний метод, гіперболічного параболоїда, турбулентних вітрових течій, рівняння Рейнольда, Нав'є-Стокса, моделі турбулентності, k-ε модель Standard, MMK, DBN, Shear-Stress Transport k-ω модель, Transition k-k1-ω модель.

Stojanov V.V., Jgalli S.

Odessa State Academy of Building and Architecture

## INVESTIGATION HYPERBOLIC PARABOLOID SHELL IN THE WIND TUNNEL AND COMPARISON WITH NUMERICAL SIMULATIONS

### Summary

There are different ways to determine aerodynamic parameters, using analytical and experimental data for analyzing the behavior of structures when exposed to wind load. To date, the most developed is considered a numerical method for determining the characteristics of the above methods, based on the numerical solution of the Navier-Stokes equations. The accuracy of the results obtained using such a calculation method and obtaining the values of aerodynamic forces has increased due to the revision of mathematical models and the development of software complexes for the discretization of object bodies. This article gives an analytical overview of the results of research in the field of study the impact of wind loads on hyper (shell square in plan with the form of a hyperbolic paraboloid). The features of the investigated forms a discretization surface depending on pressure coefficients obtained in foreign literatures. Particular attention is paid to the numerical determination of aerodynamic coefficients on the surfaces of a hyperbolic paraboloid. The results were discussed and the nature of the distribution of coefficients depending on the angle of attack of the wind. Achieved analytical comparison computer modeling turbulent wind flows, based on solving the Reynolds equations arising from the use of averaging the Navier-Stokes equations. The basic model of turbulence such as: k- $\epsilon$  Standard Model; MMK; DBN; Shear-Stress Transport k- $\omega$  model; Transition k-kl- $\omega$  model. The possibility of choosing one or another model depending on the properties and characteristics of the wind flow is analyzed, for application in numerical simulation of wind flow around hyperbolic shells. The same was done, a comparative analysis of the results of physical testing in a wind tunnel with a numerical simulation in Ansys Fluent.

**Keywords:** wind load, wind tunnel, numerical method, hyperbolic paraboloid, turbulent wind flow, Reynolds equations, Navier-Stokes equations, turbulence model, k- $\epsilon$  model Standard, MMK, DBN, Shear-Stress Transport k- $\omega$  model, Transition k-kl- $\omega$  model.