

## Уточнение методики определения ветровой нагрузки для объектов параметрической архитектуры

*Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, М.В. Полетаев*

*Донской государственный технический университет*

**Аннотация:** В статье рассмотрено моделирование ветрового воздействия на объекты параметрической архитектуры. Для определения оптимальной формы поверхности исследована эволюция формообразования аналитической поверхности, образующаяся конгруэнтными кривыми в параллельных плоскостях, полученная вращением треугольника Рело с плоскостью, перпендикулярной оси вращения. По результатам численного эксперимента с использованием метода конечных элементов определена рациональная аналитическая поверхность объекта параметрической архитектуры, устойчивая к ветровому воздействию. Получены динамические характеристики объекта параметрической архитектуры. Даны рекомендации по уточнению методики определения ветровой нагрузки для зданий и сооружений сложной геометрической формы.

**Ключевые слова:** параметрическая архитектура; ветровая нагрузка; модальный анализ; пульсационная составляющая; каркас здания; метод конечных элементов.

**Введение.** Влияние ветровой нагрузки на динамические характеристики зданий зависит не только от размеров объектов строительства и скорости ветра, но и от формы поверхности, оцениваемой аэродинамическими коэффициентами.

Для определения скорости ветра в непосредственной близости от здания и создаваемого им давления на поверхность со сложной геометрией возникает необходимость моделирования ветрового потока. С целью определения оптимальной формы поверхности исследована эволюция формообразования аналитической поверхности, образующаяся конгруэнтными кривыми в параллельных плоскостях, полученная вращением треугольника Рело, перпендикулярной оси вращения [1–2].

Параметрическая форма закрученной поверхности (рис. 1а):

$$x = x(u, v) = (a + X)\cos u - Y\sin u, \quad (1)$$

$$y = y(u, v) = (a + X)\sin u - Y\cos u, \quad (2)$$

$$z = z(u) = ut, \quad (3)$$

где  $X, Y$  – формулы задания формообразующей;  $u, v$  – параметры поворота поверхности;  $a$  – параметр, зависящий от траектории движения;  $t$  – параметр, зависящий от высоты поверхности.

Параметрическая форма треугольника Рело:

$$X = x(t) = \frac{D}{2} * \cos t - e * \cos 3t * \cos t - 3e * \sin 3t * \sin t, \quad (4)$$

$$Y = y(t) = \frac{D}{2} * \sin t - e * \cos 3t * \sin t - 3e * \sin 3t * \cos t, \quad (5)$$

где параметры  $D, e$  – представлены на рис. 1б.

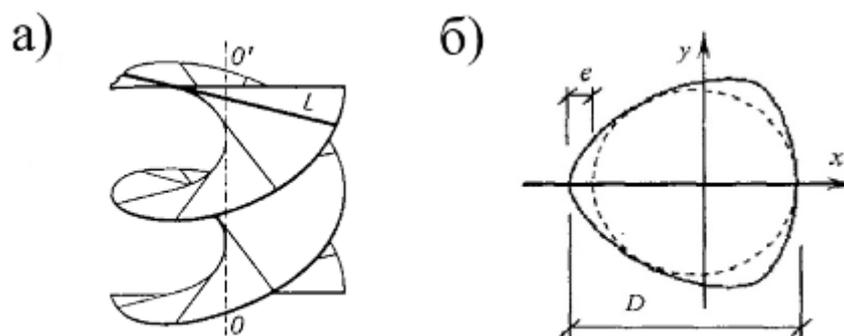


Рис. 1. – Параметрические формы:

а) закрученная поверхность; б) треугольник Рело

Варьируя параметры уравнений (1–5), выбираем оптимальную форму объекта параметрической архитектуры в соответствии с функциональным назначением:  $a = 0; D = 38,5; e = 2,5; t = 75; e = 2,5; 0 \leq v \leq 2\pi; 0 \leq u \leq 1,5\pi$ . Принятая форма здания офисного центра соответствует внешнему диаметру 41 м, внутреннему диаметру 36 м при высоте 75 м (рис.2 а).

Наиболее эффективным программным комплексом для выполнения поставленной задачи является ПК ANSYS с подмодулем Fluent,

предназначенный для моделирования ветровых воздействий на конструкции в аэродинамической трубе [3].

Создается расчетная область с размерами  $400 \times 1000 \times 200$  м с разбивкой в подмодуле mesh расчетного пространства на конечные элементы с последующим вычитанием трехмерной модели здания (рис.2 б). Выполнено сгущение сетки конечно-элементной схемы вблизи исследуемого объекта. Скорость ветра принимается в соответствии с СП 20.13330.2016. «Нагрузки и воздействия» и для данного района на высоте 10 м составляет 17 м/с.

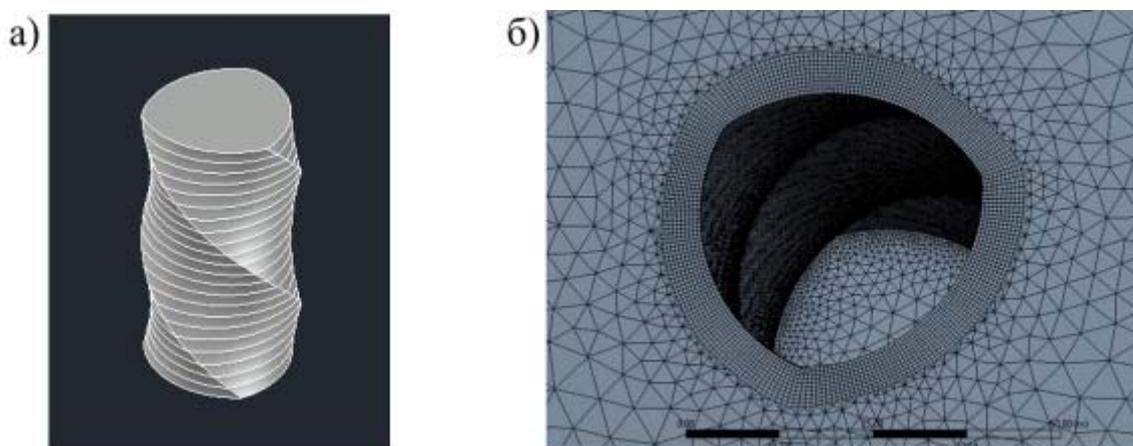


Рис. 2. – Моделирование расчетной области:

а) трехмерная модель здания; б) расчетная область в ПК ANSYS

Проведен численный эксперимент по исследованию зависимостей давления на поверхность объекта, скорости ветра и зон комфортности от параметрической формы. Разработанные модели здания приняты с углом закручивания  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $315^\circ$ ,  $360^\circ$ . Результаты моделирования ветровых воздействий на объект параметрической архитектуры приведены на рис. 3.

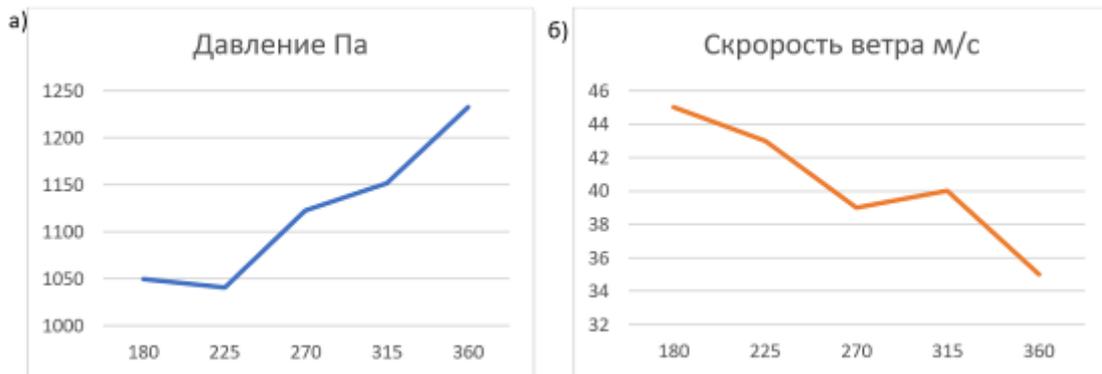


Рис. 3. – Графики зависимостей: а) давления (Па);  
б) скорости ветра (м/с) от угла закручивания поверхности

При вариации угла закручивания давление ветрового потока возрастает до 1250 Па. Поворот плит перекрытий разработанных, в форме треугольника Рело, образуют реберные очертания аналитической поверхности, которые разбивают ветровые потоки. Скорость ветра уменьшается до 35 м/с.

Оптимальная форма соответствует модели с углом поворота  $225^\circ$ , для которой давление ветрового потока 1041 Па (рис. 4), скорость ветра 43 м/с. (рис. 5).

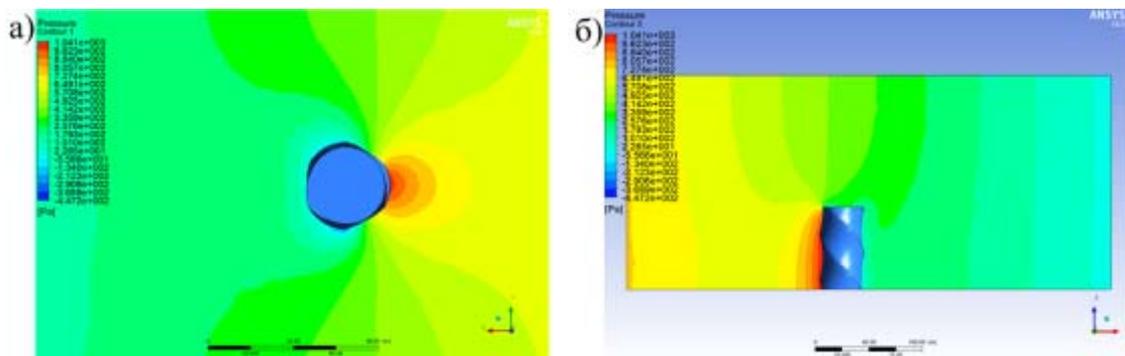


Рис. 4. – Изолинии давления ветрового потока в плоскостях: а) XY; б) XZ

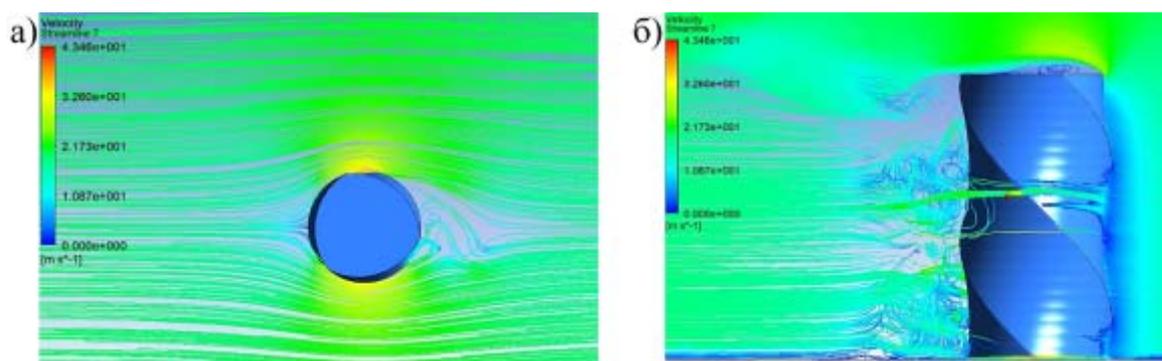


Рис. 5. – Изолинии скоростей ветрового потока в плоскостях: а) XY; б) XZ

Итак, по результатам численного эксперимента с использованием метода конечных элементов определена рациональная аналитическая поверхность объекта параметрической архитектуры, устойчивая к ветровому воздействию.

Для исследования напряженно-деформируемого состояния каркаса здания выбраны конструктивные решения: фундаментная плита толщиной 1500 мм, плиты перекрытий толщиной 220 мм, балки сечением 300×400 мм, сечение пилонов в подвале и на 1–3 этажах – 1200×500 мм; на 4–7 этажах – 1200×400 мм; выше – 1200×300 мм, сечение диафрагм жесткости – 250 мм, сечение стен ядра жесткости в подвале и на 1–7 этажах – 300 мм; выше – 250 мм, толщина стен подвала – 400 мм. Для элементов каркаса принят бетон класса В25.

Разработана конечно-элементная модель в ПК САПФИР по пространственной плитно-стержневой схеме на основе результатов моделирования оптимальной формы аналитической поверхности и экспортирована в ПК ЛИРА САПР. Используются конечные элементы: пластинчатые с 6 степенями свободы в узле КЭ 42; КЭ 44; стержневые с 6 степенями свободы в узле КЭ 10 (рис. 6) [4–5]. Совместная работа каркаса с основанием соответствует модели Пастернака с коэффициентами постели  $C_1=1000 \text{ т/м}^3$ ,  $C_2=3000 \text{ т/м}^3$  [6–8].

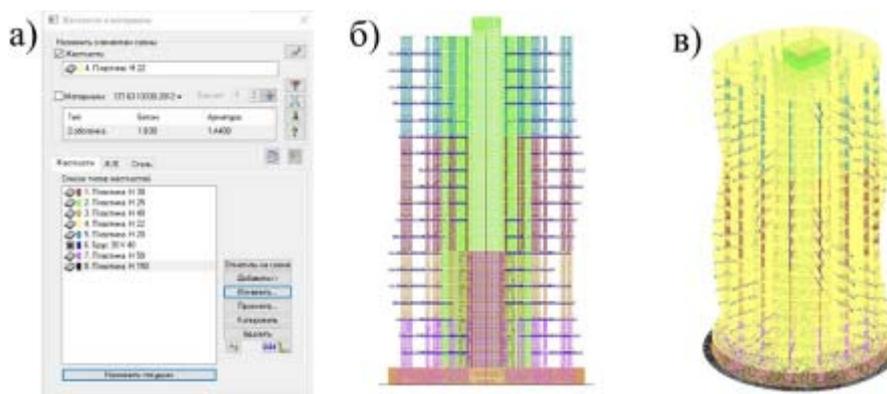


Рис. 6. – Распределение материалов в расчетной схеме:

а) таблица материалов; б) проекция здания на плоскость XZ; в) 3D-модель

На первом этапе каркас здания рассчитан на 5 статических нагрузжений: собственный вес несущих конструкций, постоянные нагрузки, временные (снеговая, полезная) нагрузки, статический ветер в продольном и поперечном направлении.

Максимальные статические перемещения в верхней точке каркаса вдоль оси X 11,8 мм; вдоль оси Y 12,8 мм; вдоль оси Z 63,9 мм; вертикальные перемещения демонстрируют податливость основания.

На втором этапе проектирования для оценки эффективности элементов каркаса здания выполнен модальный анализ (таблица №1) [9].

Таблица № 1

Собственные частоты, периоды колебаний

№ п/п	Частоты		Периоды С
	Рад/с	Гц	
1	3,50	0,56	1,7942
2	4,00	0,64	1,5687
3	4,34	0,69	1,4466
4	13,91	2,21	0,4516

На рис. 7 представлены главные формы колебаний, позволяющие сделать следующие выводы: 1-я форма собственных колебаний –

поступательная; 2-я форма – поступательная; 3-я форма – крутильная; 4-я форма – изгибно-крутильная.

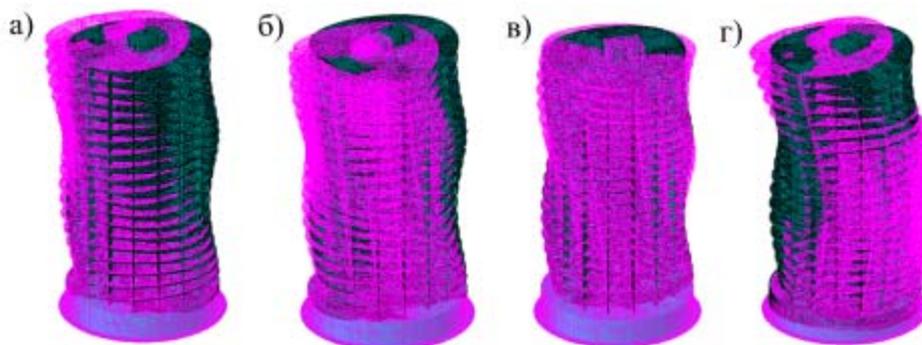


Рис. 7. – Главные формы собственных колебаний:

а) 1-я форма; б) 2-я форма; в) 3-я форма; г) 4-я форма

Рекомендуемая для учета частота собственных колебаний определяется формулой:

$$f_{lim} = \frac{\sqrt{w_0 \cdot k(z_{вк}) \cdot \gamma_f}}{940 \cdot T_{g,lim}}, \quad (6)$$

где  $w_0$  – нормативное значение давления ветра;  $k(z_{вк})$  – коэффициент учитывающий изменение давления ветра для высоты  $z_{вк}$ ;  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке;  $T_{g,lim}$  – параметр, определяемый по таблице 11.5 СП 20.13330.2016. «Нагрузки и воздействия».

Анализ результатов динамического расчета позволил выявить, что необходимо учесть только первые 3 формы колебаний, значения частот которых меньше предельных  $f_{lim} = 1,44$  Гц.

На третьем этапе выполнен расчет на действие ветровой нагрузки с учетом статической и динамической составляющих по двум вариантам расчетной схемы: на основе нормативных значений и по результатам анализа ветрового потока в ПК ANSYS Fluent [10].

Анализ результатов расчета с учетом пульсационной составляющей ветровой нагрузки первого варианта расчетной схемы показал, что максимальные горизонтальные перемещения вдоль оси X составляют 18,9 мм; вдоль оси Y 19,7 мм, что меньше предельно допустимых значений, определяемых отношением  $h/500$ .

На рис. 8 изолинии демонстрируют неравномерность распределения давлений ветрового потока на поверхность с наветренной и подветренной сторон в связи со сложной аналитической формой здания по второму варианту расчетной схемы. Максимальные действительные перемещения составляют вдоль оси X 30,7 мм; вдоль оси Y 33,1 мм, что меньше нормативных значений.

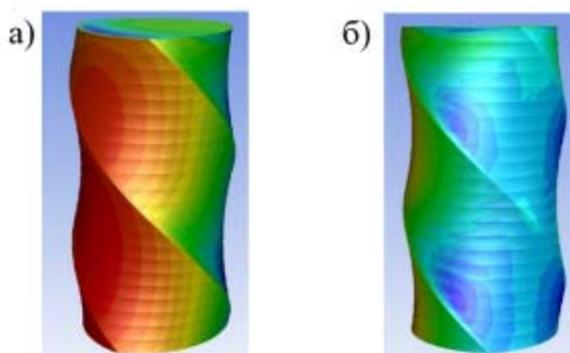


Рис. 8. – Распределение давлений ветрового потока на здание  
а) наветренная сторона; б) подветренная сторона

**Выводы.** Для определения оптимальной формы поверхности исследована эволюция формообразования аналитической поверхности, образующаяся конгруэнтными кривыми в параллельных плоскостях, полученная вращением треугольника Рело с плоскостью, перпендикулярной оси вращения. Проведено исследование давления ветрового потока, скорости ветра, зон комфортности объекта параметрической архитектуры с углом закручивания  $180^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $270^\circ$ ,  $315^\circ$ ,  $360^\circ$ . Выявлена оптимальная форма с углом поворота  $225^\circ$  для третьего ветрового района с максимальным давлением 1041 Па и скоростью ветра 43 м/с. По результатам численного

эксперимента с использованием метода конечных элементов определена рациональная аналитическая поверхность объекта параметрической архитектуры, устойчивая к ветровому воздействию. Получены динамические характеристики объекта параметрической архитектуры.

Сравнение результатов расчета каркаса здания по двум вариантам показало уточнение горизонтальных перемещений в осях X, Y соответственно на 38,4 % и 40,5 % с учетом моделирования ветровых потоков в ПК ANSYS Fluent.

Моделирование ветрового воздействия на объект параметрической архитектуры методом конечных элементов позволяет выбрать оптимальную форму здания сложной геометрии и определить зоны комфортности. Анализ моделирования ветрового воздействия по двум вариантам расчетных схем показал, что существующие нормы проектирования требуют уточнение методики определения ветровой нагрузки для зданий и сооружений сложной геометрической формы, к которым относятся объекты параметрической архитектуры.

### **Литература**

1. Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Долженко А.В. Динамический расчет зданий на ветровые нагрузки с учетом пульсационной составляющей: Электронный научный журнал APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. Краснодар, 2013. с. 2.
2. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н., Халаби С.М., Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей. Научное изд. М.: «Наука», 2006. 539 с.
3. Агаханов Э.К., Кравченко Г.М., Осадчий А.С., Труфанова Е.В. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. 44(2). с. 8–17.



4. Bathe K.-J. Finite Element Procedures. K.-J. Bathe // New Jersey: Prentice Hall, 1996. pp. 10-12.

5. Зотова Е.В., Панасюк Л.Н. Численное моделирование динамических систем с большим числом степеней свободы на импульсные воздействия // Инженерный вестник Дона, 2012. № 3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933.

6. Савостьянов В.Н., Агаханов Э.К. Об эквивалентности воздействий в статической задаче механики деформируемого твердого тела. Изв. Вузов. Строительство. – 1995. - № 10. – с. 26-30.

7. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2013. - №2. – с. 39-45.

8. Савостьянов В.Н., Агаханов Э.К. Об эквивалентности воздействий в статической задаче механики деформируемого твердого тела. Изв. Вузов. Строительство. – 1995. - № 10. – с. 26-30.

9. Clough R.W., Penzien J. Dynamics of Structures. Computer & Structure, Inc. Berkeley. USA. 2003. 752 p.

10. Зырянов В.В. Методы оценки адекватности результатов моделирования // Инженерный вестник Дона, 2013. № 2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707.

### References

1. Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Dolzhenko A.V. Elektronnyj nauchnyj zhurnal APRIORI. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. Krasnodar, 2013. p. 2.

2. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N., Halabi S.M. Analiticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej [Analytic surfaces: materials on 500 geometry surfaces]. M.: «Nauka», 2006. 539 p.



3. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchij A.S., Trufanova E.V. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2017. 44(2). p. 8–17.
4. Bathe K.-J. Finite Element Procedures. K.-J. Bathe. New Jersey: Prentice Hall, 1996. pp. 10-12.
5. Zotova E.V., Panasyuk L.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012. № 3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/933).
6. Savost'yanov V.N., Agahanov E.K. Izv. Vuzov. Stroitel'stvo. 1995. № 10. p. 26-30.
7. Agahanov E.K. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2013. №2. p. 39-45.
8. Savost'yanov V.N., Agahanov E.K. Izv. Vuzov. Stroitel'stvo. 1995. № 10. p. 26-30.
9. Clough R.W., Penzien J. Dynamics of Structures. Computer & Structure, Inc. Berkeley. USA. 2003. 752 p.
10. Zyryanov V.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №2. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707](http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1707).