

УДК 624.042.4; 697.8; 004.9

# Моделирование ветровых нагрузок в высоких вертикальных конструкциях

**Ю.В. Новиков<sup>1</sup>, С.Ю. Новиков<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»<sup>2</sup> ОАО «НПО Центр»

## Modeling wind loads in high vertical structures

**Yu.V. Novikov<sup>1</sup>, S.Yu. Novikov<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Educational Institution Vitebsk State Technological University<sup>2</sup> JSC NPO Center

Исследованы четыре варианта дымовых труб аспирационных установок на воздействие ветровой нагрузки. Разработаны методы численного моделирования воздействия ветровой нагрузки на высокие вертикальные конструкции и дымовые трубы. Осуществлен оптимальный выбор конструктивного исполнения дымовой трубы по полученным численным результатам и эпюрам воздействия ветровой нагрузки. Выполнен проверочный расчет. Разработана методика расчета дымовых труб с кронштейнами и вертикальных конструкций.

**EDN:** BIHJIM, <https://elibrary/bihjmm>**Ключевые слова:** ветровая нагрузка, ветровой поток, аспирационная установка, дымовые трубы, кронштейн, воздействие ветра

A study of four types of smoke stacks of aspiration installations on the impact of wind loads was conducted. The purpose of this work is to develop methods for numerical modeling of wind loads on high vertical structures and smoke stacks. An optimal choice of design was made based on the obtained numerical results and diagrams of the impact of wind loads. A verification calculation was performed. A sequence of methods for calculating smoke stacks with brackets and vertical structures was developed.

**EDN:** BIHJIM, <https://elibrary/bihjmm>**Keywords:** wind load, wind flow, aspiration system, chimneys, bracket, wind impact

В современном строительстве распространены высокие вертикальные конструкции с небольшим поперечным сечением. Такие конструкции подвержены внешним воздействиям, особенно ветровой нагрузке. Значительная динамическая сила ветра оказывает разрушительное воздействие на сооружения, что требует исследования ее влияния на устойчивость и прочность.

Актуальность этой темы обусловлена изменением климатических условий, что приводит к необходимости пересмотра существующих методов расчета ветровой нагрузки в зависимости от географического положения, высоты конструкции, геометрической формы и покрытия.

Изучению взаимодействия гибких конструкций с ветровым потоком посвящены многие работы [1–5].

Ветровые воздействия ветра определяли экспериментальными методами в аэродинамических трубах для воспроизведения естественных ветровых течений.

В настоящее время активно ведутся исследования в области вычислительной аэрогидродинамики (CFD), где численные модели специально разработаны для моделирования воздействия ветра на гражданские конструкции. Аэродинамику описывают тривиальными законами механики сплошных сред. Методика характеризуется

тем, что сохранение массы, энергии и импульса записывается для каждого элементарного объема движущейся среды.

Расчет ветрового воздействия на объекты повышенной этажности и сложной формы сводится к решению трехмерных нестационарных нелинейных уравнений гидрогазодинамики с учетом вязкости в постановке Навье — Стокса [6, 7].

Для нахождения ветровой нагрузки на сооружение в нормативно-технической литературе использованы тривиальные расчетные формулы для конструкций простейших геометрических форм. Образуются воздушные вихри, когда происходит обтекание цилиндра, и на них накладывается турбулентный поток. В результате такого взаимодействия возникает сложная картина взаимодействия, которую нельзя описать с помощью критерия Струхала [1, 8, 9].

В большинстве случаев ограничиваются рассмотрением силы лобового сопротивления, пренебрегая силовыми эффектами, связанными с подъемной силой и аэродинамической моделью [10–13].

Цель исследования — разработка методов численного моделирования ветровой нагрузки на высокие вертикальные конструкции и дымовые трубы (ДТ).

**Проектирование математической модели ветровой нагрузки в программе SolidWorks.**

В качестве объектов исследования выступали четыре модели — две ДТ с креплением в основании, ДТ с одним дополнительным креплением (кронштейном) и ДТ с двумя кронштейнами.

Модели ДТ высотой 22 м разделены на одиннадцать равных секций по 2 м. Диаметр первой ДТ с креплением в основании составлял 0,606 м, диаметр второй — 0,406 м. У ДТ с одним кронштейном его располагали на высоте 15 м от поверхности, а у ДТ с двумя кронштейнами — на высоте 15 и 10 м. Все четыре модели ДТ рассмотрены на примере обобщенной модели (рис. 1).

Расчет ветровой нагрузки выполнен с использованием значений основных коэффициентов по методике СП 20.13330.2016 [10]. Исходными данными являлись: нормативное ветровое давление на уровне 10 м над поверхностью земли для ветрового района 3  $W_0 = 0,3$  кПа; коэффициент пульсации давления ветра для высоты 10 м на местности типа А

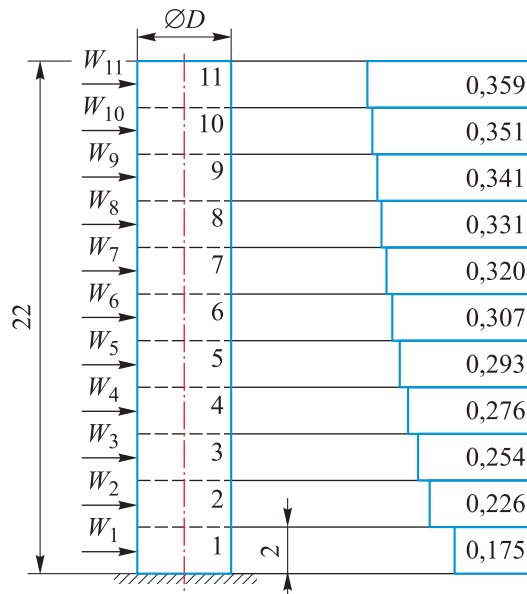


Рис. 1. Обобщенная математическая модель ДТ с общей ветровой нагрузкой  $W_i$  (кПа)

$\xi_{10} = 0,76$ ; коэффициент высоты, показывающий изменение ветрового давления по высоте на местности типа А,  $\alpha = 0,15$ ; коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте для типовой высоты 10 м на местности типа А  $k_{10} = 1$ . Определены коэффициенты для каждой секции.

Расчет первой и второй ДТ аспирационной установки. Ветровая нагрузка создает поперечную силу и изгибающий момент под действием ветра. Сила, возникающая в секторе (круглой обечайке) при таком воздействии, определяется как

$$F_i = W_i l_i D_i, \text{ кН,}$$

где  $W_i$  — ветровая нагрузка на  $i$ -м секторе ДТ, кПа;  $l_i$  — длина  $i$ -го сектора, на который действует соответствующая ветровая нагрузка, м;  $D_i$  — диаметр  $i$ -го сектора, м.

Результаты расчета сил, возникающих в секторах первой и второй ДТ под действием ветровой нагрузки, приведены в табл. 1.

Расчет третьей ДТ аспирационной установки. Схема расчета ДТ с одним кронштейном в виде жестко закрепленной балки с одной опорой показана на рис. 2.

Исследована система в точке В (кронштейне). Рассмотрены суммы реакций  $\sum R_B = 0$  и суммы моментов  $\sum M_B = 0$ . Путем совместного решения системы уравнений реакций и моментов в точках А и В получены следующие результаты:

Таблица 1

Результаты расчета сил, возникающих в первой и второй ДТ под действием ветровой нагрузки

Вариант ДТ	Сила, кН, в секторах ДТ										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0,212	0,273	0,307	0,334	0,355	0,372	0,387	0,401	0,413	0,425	0,435
2	0,142	0,183	0,206	0,224	0,237	0,249	0,259	0,268	0,276	0,285	0,291

• в точке А

$$\begin{cases} M_A = -1,4187 \text{ кН} \cdot \text{м}; \\ R_A = 0,8457 \text{ кН}; \end{cases}$$

• в точке В

$$R_B = 3,0727 \text{ кН}.$$

Расчет четвертой ДТ аспирационной установки. Схема ДТ с двумя кронштейнами в виде жестко закрепленной балки с двумя опорами приведена на рис. 3, а схема ее расчета — на рис. 4. Балка является статически неопределимой.

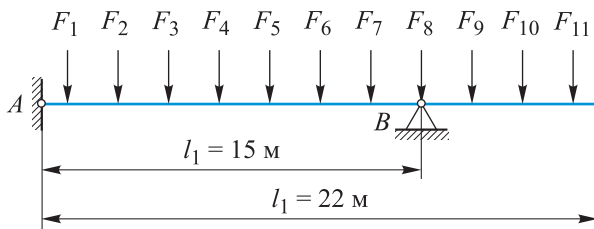


Рис. 2. Схема расчета ДТ с одним кронштейном в виде жестко закрепленной балки с одной опорой

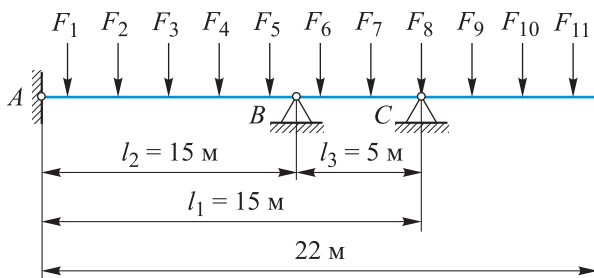


Рис. 3. Схема ДТ с двумя кронштейнами в виде жестко закрепленной балки с двумя опорами

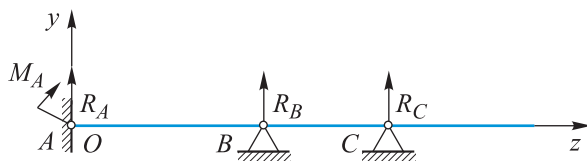


Рис. 4. Схема расчета ДТ с двумя кронштейнами в виде жестко закрепленной балки с двумя опорами

Уравнения статики для статически неопределимой ДТ имеют вид

$$\sum Z = 0; \sum Y = 0.$$

С учетом полученных значений имеем

$$R_A + R_B + R_C = 2,6251 \text{ кН}.$$

Для расчета силы и момента, действующих в точке А — в основании ( $\sum M_A = 0$ ), запишем

$$M_A + F_1 c_1 + \dots + F_{11} c_{11} - R_B l_2 - R_C l_1 = 0,$$

где  $c_i$  и  $c_{11}$  — расстояние от начала координат ( $x = 0$ ) до  $i$ -й точки приложения силы  $F_i$  и  $F_{11}$  относительно точки А, м.

Тогда имеем

$$M_A - 10R_B + 15R_C + 31,8296 = 0.$$

На основе обобщенного уравнения оси ДТ с началом координат в защемлении составляем уравнение прогиба в опорном сечении (в точке В)

$$\begin{aligned} EI_x y_B = EI_x y_0 + EI_x \theta_0 l_2 + M_A \frac{(l_2 - a_1)^2}{2!} - \\ - F_1 \frac{(l_2 - b_1)^3}{3!} - \dots - F_{11} \frac{(l_2 - b_{11})^3}{3!} + \\ + R_A \frac{l_2^3}{3!} + R_C \frac{(l_2 - b_{12})^3}{3!}, \end{aligned}$$

где  $E$  — модуль упругости;  $I_x$  — момент инерции сечения относительно оси  $x$ ;  $\theta_0$  — угол поворота (угловое перемещение) сечения в начале координат (в точке  $x = 0$ );  $b_1$ ,  $b_{11}$  и  $b_{12}$  — расстояние от начала координат до  $i$ -й точки приложения силы  $F_i$ ,  $F_{11}$  и  $F_{12}$  соответственно при рассмотрении сечения относительно точки В, м.

Принимая в опорных сечениях балки перемещение сечения  $y_B = y_A = y_0 = 0$  и  $\theta_A = \theta_0 = 0$ , где  $\theta_A$  — угол поворота сечения в точке А, запишем

$$\begin{aligned} 0 = M_A \frac{l_2^2}{2} - F_1 \frac{(l_2 - b_1)^3}{6} - \dots - F_{11} \frac{(l_2 - b_{11})^3}{6} + \\ + R_A \frac{l_2^3}{6} + R_C \frac{(l_2 - b_{12})^3}{6}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &M_A - F_1 \frac{(l_2 - b_1)^3}{3l_2^2} - \dots - F_{11} \frac{(l_2 - b_{11})^3}{3l_2^2} + \\
 &\quad + R_A \frac{l_2}{3} + R_C \frac{(l_2 - b_{12})^3}{3l_2^2} = 0; \\
 &M_A - \frac{1}{3l_2^2} [F_1(l_2 - b_1)^3 + \dots + F_{11}(l_2 - b_{11})^3] + \\
 &\quad + R_A \frac{l_2}{3} + R_C \frac{(l_2 - b_{12})^3}{3l_2^2} = 0; \\
 &M_A + R_A \frac{l_2}{3} - \frac{1}{3l_2^2} \left\{ [F_1(l_2 - b_1)^3 + \dots + F_{11}(l_2 - b_{11})^3] - \right. \\
 &\quad \left. - R_C(l_2 - b_{12})^3 \right\} = 0.
 \end{aligned}$$

С учетом значений имеем

$$M_A + \frac{10}{3}R_A - \frac{5}{12}R_C + 1,7767 = 0.$$

На основе обобщенного уравнения оси ДТ с началом координат в защемлении запишем уравнение прогиба в опорном сечении (точке С)

$$\begin{aligned}
 EI_x y_C = EI_x y_0 + EI_x \theta_0 l_1 + M_A \frac{(l_1 - a_1)^2}{2!} - \\
 - F_1 \frac{(l_1 - b_1)^3}{3!} - \dots - F_7 \frac{(l_1 - b_7)^3}{3!} - F_9 \frac{(l_1 - b_9)^3}{3!} - \\
 - F_{10} \frac{(l_1 - b_{10})^3}{3!} - F_{11} \frac{(l_1 - b_{11})^3}{3!} + \\
 + R_A \frac{l_1^3}{3!} + R_B \frac{(l_1 - b_{12})^3}{3!},
 \end{aligned}$$

где  $a_1$  — расстояние до действия сил в точке А относительно точки С, м;  $b_i$  — расстояние от начала координат до  $i$ -й точки приложения силы при рассмотрении сечения относительно точки С, м.

Принимая в опорных сечениях ДТ перемещение  $y_C = y_A = y_0 = 0$  и  $\theta_A = \theta_0 = 0$ , получаем

$$\begin{aligned}
 0 = M_A \frac{l_1^2}{2} - F_1 \frac{(l_1 - b_1)^3}{6} - \dots - F_7 \frac{(l_1 - b_7)^3}{6} - \\
 - F_9 \frac{(l_1 - b_9)^3}{6} - F_{10} \frac{(l_1 - b_{10})^3}{6} - \\
 - F_{11} \frac{(l_1 - b_{11})^3}{6} + R_A \frac{l_1^3}{6} + R_B \frac{(l_1 - b_{12})^3}{6}; \\
 M_A - F_1 \frac{(l_1 - b_1)^3}{3l_1^2} - \dots - F_7 \frac{(l_1 - b_7)^3}{3l_1^2} - F_9 \frac{(l_1 - b_9)^3}{3l_1^2} - \\
 - F_{10} \frac{(l_1 - b_{10})^3}{3l_1^2} - F_{11} \frac{(l_1 - b_{11})^3}{3l_1^2} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ R_A \frac{l_1}{3} + R_B \frac{(l_1 - b_{12})^3}{3l_1^2} = 0; \\
 &M_A - \frac{1}{3l_1^2} [F_1(l_1 - b_1)^3 + \dots + F_7(l_1 - b_7)^3 + \\
 &+ F_9(l_1 - b_9)^3 + F_{10}(l_1 - b_{10})^3 + F_{11}(l_1 - b_{11})^3] + \\
 &+ R_A \frac{l_1}{3} + R_B \frac{(l_1 - b_{12})^3}{3l_1^2} = 0; \\
 &M_A + R_A \frac{l_1}{3} - \frac{1}{3l_1^2} \left\{ [F_1(l_1 - b_1)^3 + \dots + F_7(l_1 - b_7)^3 + \right. \\
 &+ F_9(l_1 - b_9)^3 + F_{10}(l_1 - b_{10})^3 + F_{11}(l_1 - b_{11})^3] - \\
 &\quad \left. - [R_B(l_1 - b_{12})^3] \right\} = 0.
 \end{aligned}$$

Тогда имеем

$$M_A + 5R_A + \frac{5}{27}R_B - 1,5022 = 0.$$

Для расчета реакции и момента, действующих в точке В, принимаем сумму всех моментов в ней  $\Sigma M_B = 0$ . Тогда запишем

$$M_A + R_A l_2 - F_1 c_1 - \dots - F_5 c_5 + F_6 c_6 + \dots + F_{11} c_{11} - R_C l_3 = 0.$$

Для расчета реакции и момента, действующих в точке С (кронштейне), принимаем сумму всех моментов в ней  $\Sigma M_C = 0$ . Отсюда имеем

$$M_A + 15R_A + 5R_B - 7,5476 = 0.$$

Составляем уравнения, по которым находим реакции опор и моменты в исследуемых точках.

С учетом соотношений

$$\begin{cases} M_A + \frac{10}{3}R_A - \frac{5}{12}R_C + 1,7767 = 0; \\ M_A + 10R_A - 5R_C + 5,5779 = 0 \end{cases}$$

запишем

$$\begin{cases} M_A = \frac{(-30R_A - 15,7428)}{11}; \\ R_C = 0,2M_A + 2R_A + 1,1156. \end{cases}$$

Используя выражения

$$\begin{cases} M_A + 5R_A + \frac{5}{27}R_B - 1,5022 = 0; \\ M_A + 15R_A + 5R_B - 7,5476 = 0, \end{cases}$$

имеем

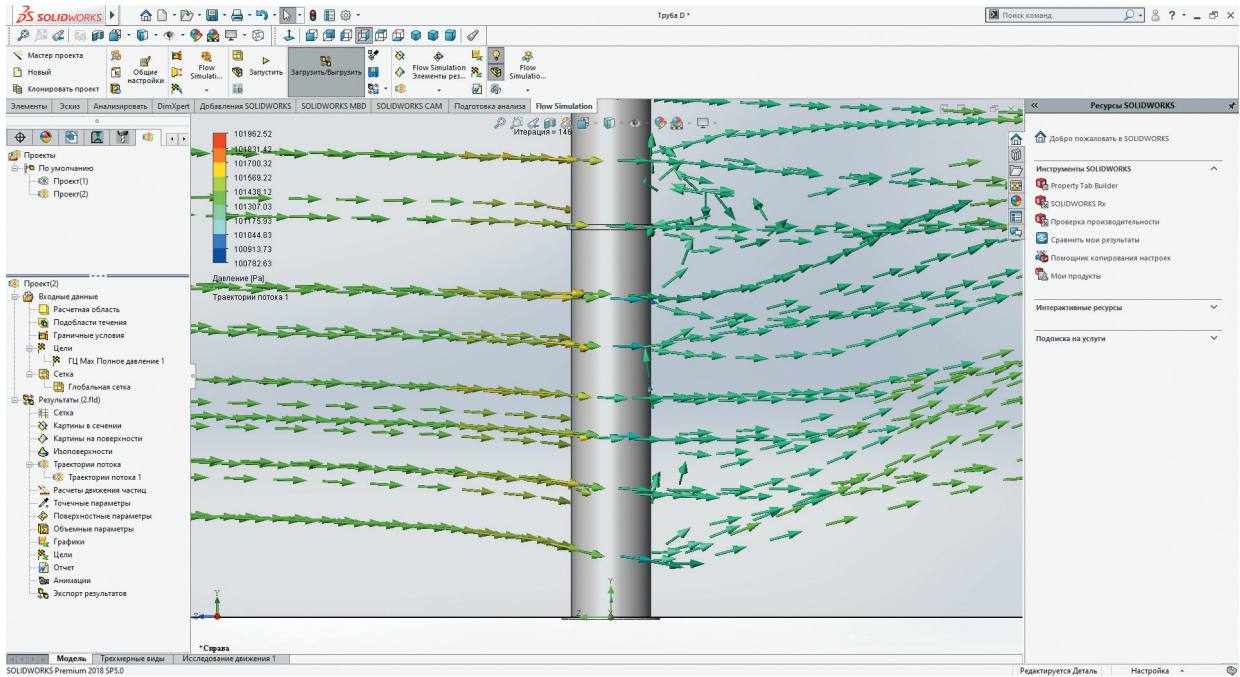
$$R_A = 1,4304 \text{ кН.}$$

С учетом указанных выражений получаем следующие параметры:

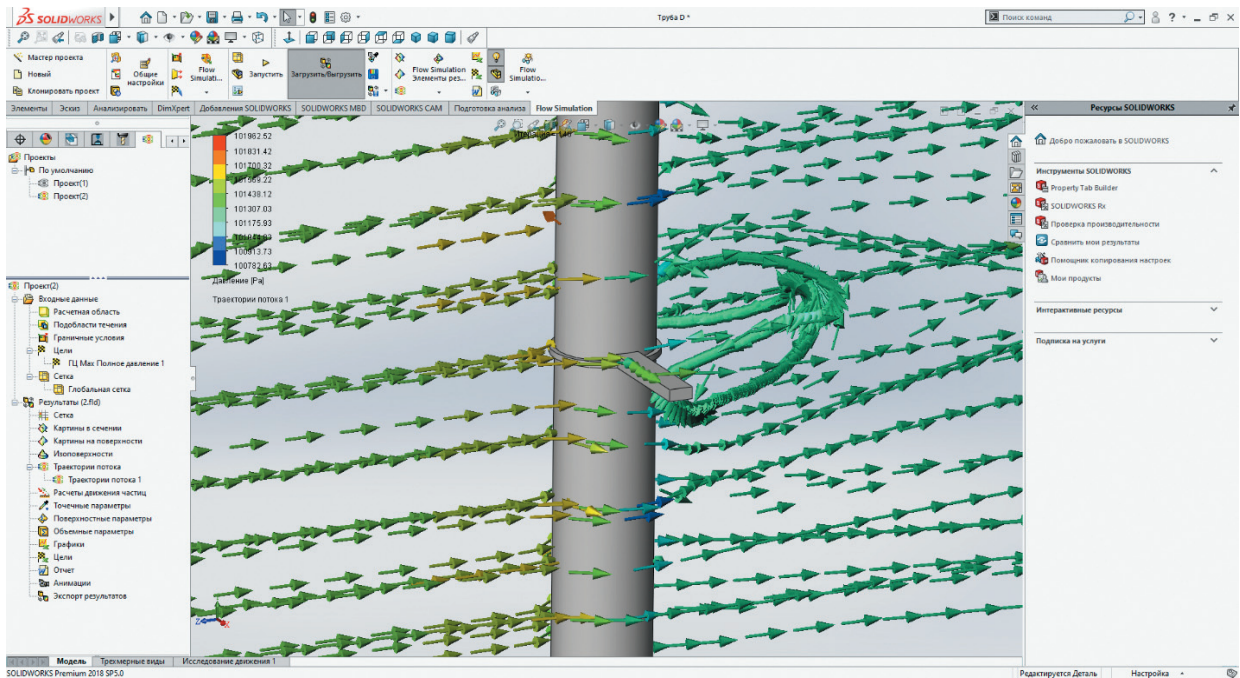
- момент в точке  $A$   $M_A = -5,3323$  кН·м;
- реакция опоры в точке  $C$   $R_C = 2,9099$  кН;
- реакция опоры в точке  $B$   $R_B = -1,7152$  кН.

**Компьютерное моделирование ветровой нагрузки.** Моделирование ветровой нагрузки

[14–16] проведено в программе SolidWorks. В качестве исходных данных приняты: толщина стенок секторов ДТ — 8 мм; внутренний диаметр первой, второй ДТ — 0,59 м и третьей, четвертой ДТ — 0,39 м; шероховатость поверхности ДТ — 20 мкм; максимальная скорость ветра — 26,4 м/с. Температура, давление и влажность соответствовали нормальным условиям.

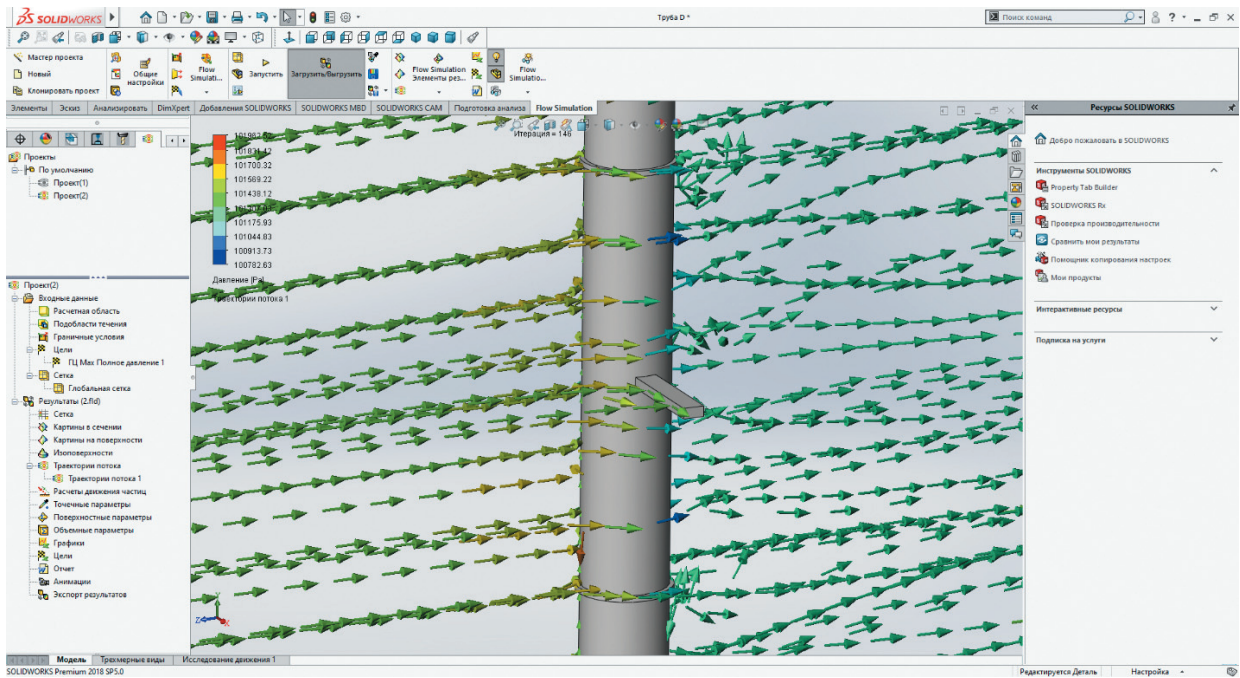


*a*



*б*

Рис. 5 (начало). Результаты моделирования движения потока ветра у основания (а), первого (б) и второго (в) кронштейнов ДТ



6

Рис. 5 (окончание). Результаты моделирования движения потока ветра у основания (а), первого (б) и второго (в) кронштейнов ДТ

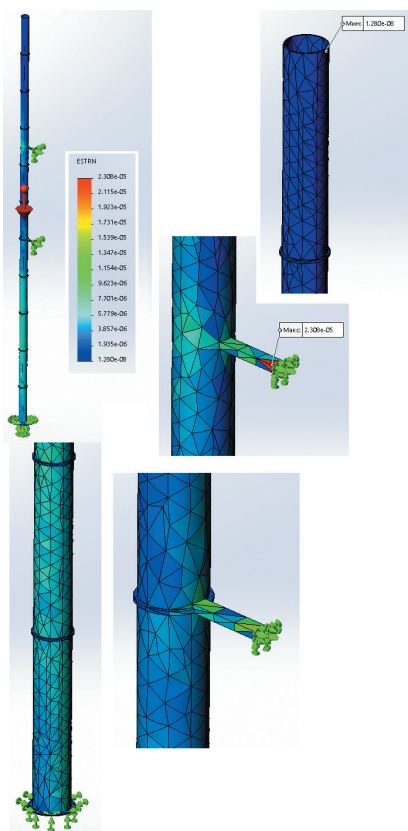


Рис. 6. Эпюры деформации ДТ

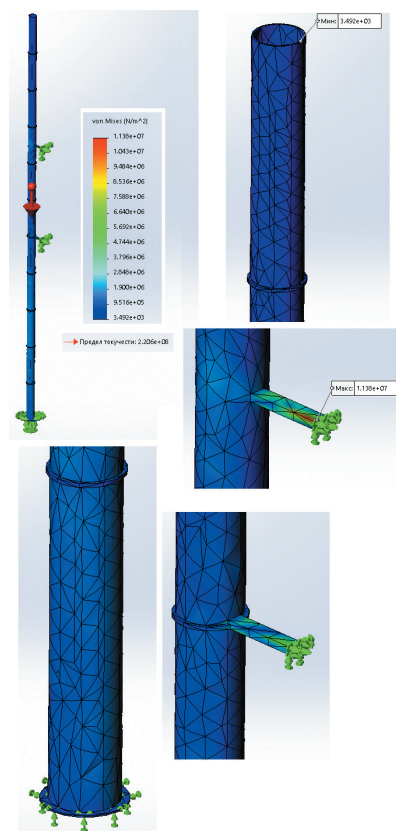


Рис. 7. Эпюры напряжения, Н/м<sup>2</sup>, в ДТ

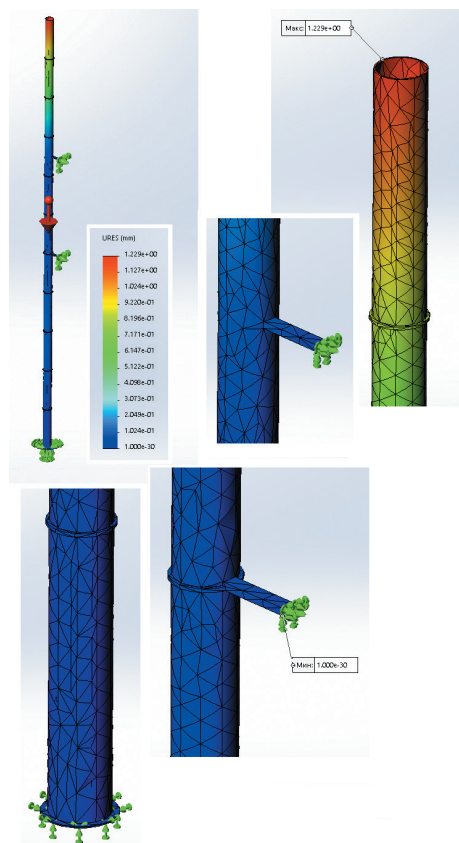


Рис. 8. Эпюры перемещения, мм, в ДТ

Задача исследования — определить максимальное давление от ветровой нагрузки. Выполнено моделирование первой–четвертой ДТ.

Результаты моделирования движения потока ветра в четвертой ДТ, полученные в программе SolidWorks, приведены на рис. 5. Исследовано движение потока ветра в следующих зонах [17]: *a* — у основания; *b* — у первого кронштейна, расположенного на высоте 10 м от поверхности; *в* — у второго кронштейна, размещенного на высоте 15 м. Условия и значения нагрузки приняты с учетом силы тяжести.

Результаты моделирования воздействия воздушного потока на ДТ приведены на рис. 6–8.

## Литература

- [1] Симиу Э., Сканлан Р. *Воздействие ветра на здания и сооружения*. Москва, Стройиздат, 1984. 358 с.
- [2] Горохов Е.В., Кузнецов С.Г. *Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения*. Донецк, Норд-Пресс, 2009. 169 с.
- [3] Магай А.А., Дубынин Н.В. *Архитектурно-художественный облик высотных зданий. Архитектура и строительство России*, 2009, № 7, с. 32–40.
- [4] Горгорова Ю.В. Гуманизация городской среды в условиях многоэтажной застройки (на примере делового района Кэнэри-Уорф в Лондоне). *Инженерный вестник Дона*, 2017, № 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4489>

## Выводы

1. Путем численного моделирования исследовано воздействие ветровой нагрузки на высокие вертикальные конструкции. Разработаны математические модели для четырех вариантов ДТ под действием ветровой нагрузки.

2. Выполнены расчеты ветрового давления, а также расчеты реакций на основание и кронштейны ДТ, что является важным этапом в оценке устойчивости и надежности высоких конструкций.

3. Определены максимально допустимые значения напряжений в программах SolidWorks Simulation и Компас 3D APM FEM. Установлено, что по максимальному перемещению имеются отклонения, которые вызваны интерпретацией давления на поверхность. Выявлены изменения в диапазоне  $-0,6...+9,6$  % по напряжению и в интервале  $-0,5...+1,0$  % по перемещению у ДТ с кронштейнами.

4. В программе SolidWorks Flow Simulation дополнительно учтены восходящий поток воздуха к верхней части ДТ и возникающие зоны меньшего давления.

5. Созданы трехмерные модели ДТ. Проведено моделирование ветровой нагрузки, что позволило визуализировать распределение напряжений и перемещений в ДТ. Эпюры напряжений и перемещений, полученные в результате моделирования, предоставляют важную информацию о поведении ДТ под действием ветровой нагрузки, что можно использовать для оптимизации их проектирования.

6. Разработан метод расчета ДТ с одним и двумя кронштейнами, с помощью которого можно более точно определять реакции на опоры и кронштейны. Метод можно рекомендовать к применению при проектировании и анализе высоких вертикальных конструкций.

- [5] Коротич М.А., Коротич А.В. Факторы развития архитектуры высотных зданий. *Академический вестник Уралниипроект РААСН*, 2009, № 3, с. 48–51.
- [6] Седов Л.И. *Механика сплошной среды*. Т. 1, 2. Москва, Наука, 1973. 536 с., 584 с.
- [7] ГОСТ 23281–78. *Аэродинамика летательных аппаратов. Термины, определения и буквенные обозначения*. Москва, Изд-во стандартов, 1978. 32 с.
- [8] Белоцерковский С.М., Ништ М.И. *Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью*. Москва, Наука, 1978. 351 с.
- [9] Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. *Вычислительная аэродинамика в задачах строительства*. Москва, АСВ, 2017. 720 с.
- [10] СП 20.13330.2016 *Нагрузки и воздействия*. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. Москва, Минстрой России, 2016. 80 с.
- [11] Дубовцев П.В., Хазов П.А., Мониц Д.В. Оценка возможности использования нормативной документации для определения ветрового давления на поверхность высотного здания путем численного моделирования. *Приволжский научный журнал*, 2021, № 2, с. 25–31.
- [12] Казакевич М.И. *Основы расчетов сооружений на ветровые воздействия*. Москва, МГСУ, 2019. 180 с.
- [13] *Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра*. Москва, ЦНИИСК им. Кучеренко, 1978. 216 с.
- [14] Дубинский С.И. *Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания*. Москва, МГСУ, 2010. 198 с.
- [15] Дубинский С.И., Болотов П.Е. Верификация методики компьютерного моделирования для расчета распределения давлений воздуха на наружной поверхности наружных ограждающих конструкций. *Вестник МГСУ*, 2011, № 7, с. 276–282.
- [16] Белостоцкий А.М. *Математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок и воздействий*. Москва, ФАУ ФЦС, 2020. 65 с.
- [17] Афанасьева И.Н., Усманов А.Р. Изучение трехмерной структуры воздушного турбулентного потока при обтекании призмы прямоугольной формы. *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций*, 2012, т. 8, № 3, с. 50–57.

## References

- [1] Simiu E., Scanlan R.H. Wind effects on structures. Wiley, 1978. 458 p. (Russ. ed.: *Vozdeystvie vetra na zdaniya i sooruzheniya*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 358 p.)
- [2] Gorokhov E.V., Kuznetsov S.G. *Eksperimentalnye metody opredeleniya vetrovykh nagruzok na zdaniya i sooruzheniya* [Experimental methods for determining wind loads on buildings and structures]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2009. 169 p. (In Russ.).
- [3] Magay A.A., Dubynin N.V. Architectural and artistic appearance of high-rise buildings. *Arkhitektura i stroitelstvo Rossii* [Architecture and Construction of Russia], 2009, no. 7, pp. 32–40. (In Russ.).
- [4] Gorgorova Yu.V. Humanization of urban area in terms of high-rise buildings (on the example of canary wharf business district in London). *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2017, no. 4. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4489> (in Russ.).
- [5] Korotich M.A., Korotich A.V. Factors of development of architecture of high-attitude building. *Akademicheskii vestnik Uralniiproekt RAASN*, 2009, no. 3, pp. 48–51. (In Russ.).
- [6] Sedov L.I. *Mekhanika sploshnoy sredy*. T. 1, 2 [Continuum mechanics. Vol. 1, 2]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 536 p., 584 p. (In Russ.).
- [7] GOST 23281–78. *Aerodinamika letatelnykh apparatov. Terminy, opredeleniya i bukvennyye oboznacheniya* [State standard GOST 23281-78. Flight vehicle aerodynamics. Terms, definitions and symbols]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1978. 32 p. (In Russ.).
- [8] Belotserkovskiy S.M., Nisht M.I. *Otryvnoe i bezotryvnoe obtekanie tonkikh krylyev idealnoy zhidkostyu* [Separated and non-separated flow of an ideal fluid around thin wings]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 351 p. (In Russ.).

- [9] Belostotskiy A.M., Akimov P.A., Afanasyeva I.N. *Vychislitel'naya aerodinamika v zadachakh stroitel'stva* [Computational aerodynamics in construction problems]. Moscow, ASV Publ., 2017. 720 p. (In Russ.).
- [10] SP 20.13330.2016 *Nagruzki i vozdeystviya*. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.01.07-85\*. [Loads and impacts. Updated version of SNIp 2.01.07-85\*]. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2016. 80 p. (In Russ.).
- [11] Dubovtsev P.V., Khazov P.A., Monich D.V. Evaluation of the possibility of using regulatory documentation to determine wind pressure on the surface of a high-rise building by numerical modeling. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], 2021, no. 2, pp. 25–31. (In Russ.).
- [12] Kazakevich M.I. *Osnovy raschetov sooruzheniy na vetrovye vozdeystviya* [Fundamentals of calculating structures for wind effects.]. Moscow, MGSU Publ., 2019. 180 p. (In Russ.).
- [13] *Rukovodstvo po raschetu zdaniy i sooruzheniy na deystvie vetra* [Guide to calculating buildings and structures for wind effects.]. Moscow, TsNIISK im. Kucherenko Publ., 1978. 216 p. (In Russ.).
- [14] Dubinskiy S.I. *Chislennoe modelirovanie vetrovykh vozdeystviy na vysotnye zdaniya* [Numerical modeling of wind effects on high-rise buildings]. Moscow, MGSU Publ., 2010. 198 p. (In Russ.).
- [15] Dubinskiy S.I., Bolotov P.E. Verification of the technique of computer modelling for calculation of air pressure allocation on the external surface of external constructions. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 7, pp. 276–282. (In Russ.).
- [16] Belostotskiy A.M. *Matematicheskoe (chislennoe) modelirovanie vetrovykh nagruzok i vozdeystviy* [Mathematical (numerical) modeling of wind loads and impacts]. Moscow, FAU FTsS Publ., 2020. 65 p. (In Russ.).
- [17] Afanasyeva I.N., Usmanov A.R. Study of three-dimensional features of turbulent flow around a rectangular cylinder. *Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruktsiy* [International Journal of Computational Civil and Structural Engineering], 2012, vol. 8, no. 3, pp. 50–57. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 08.07.2025

## Информация об авторах

**НОВИКОВ Юрий Васильевич** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов». Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» (210035, Витебск, Республика Беларусь, Московский проспект, д. 72, e-mail: nov\_u\_vik@mail.ru).

**НОВИКОВ Святослав Юрьевич** — инженер-конструктор второй категории, конструкторского отдела «Центр-45». ОАО «НПО Центр» (220018, Минск, Республика Беларусь, ул. Шаранговича, д. 19, e-mail: novikav\_svaitoslav.75@mail.ru).

## Information about the authors

**NOVIKOV Yuri Vasilievich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Automation of Production Department. Educational Institution Vitebsk State Technological University (210038, Vitebsk, Republic of Belarus, Moskovskiy Ave., Bldg. 72, e-mail: nov\_u\_vik@mail.ru).

**NOVIKOV Svaitoslav Yuryevich** — Design Engineer of the 2<sup>nd</sup> Category, Design Department Center-45. JSC NPO Center (220018, Minsk, Republic of Belarus, Sharangovicha St., Bldg. 19, e-mail: novikav\_svaitoslav.75@mail.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Новиков Ю.В., Новиков С.Ю. Моделирование ветровых нагрузок в высоких вертикальных конструкциях. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 4, с. 74–82.

### Please cite this article in English as:

Novikov Yu.V., Novikov S.Yu. Modeling wind loads in high vertical structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 4, pp. 74–82.