

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК [533.6:624.07]:004.9

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762

Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни

Александр Михайлович Белостоцкий, Ирина Юрьевна Негрозова,
Олег Сергеевич Горячевский

Национальный исследовательский Московский государственный строительный
университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Большепролетные и гибкие конструкции весьма чувствительны к воздействию ветра. Такие конструкции подвержены возникновению аэроупругих явлений. В истории известны случаи, когда в результате ветрового воздействия происходило обрушение конструкции. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов оценки возникновения аэроупругой неустойчивости.

Материалы и методы. Динамические и жесткостные характеристики объекта, используемые при инженерной оценке возможности аэроупругих явлений, определили с помощью программного комплекса (ПК) ANSYS Mechanical. Моделирование обтекания исследуемого объекта провели в ПК ANSYS Fluent. Для подтверждения полученных оценок о невозможности возникновения аэроупругой неустойчивости по нормативной методике выполнили прямое численное моделирование двухстороннего взаимодействия шпиля и воздушного потока в ПК ANSYS (двухсторонний FSI, реализуемый связкой модулей Fluent и Mechanical).

Результаты. С применением разработанных расчетных динамических конечно-элементных моделей установили собственные частоты и формы колебаний. Провели оценку возможности возникновения галопирования по нормативной методике для исследуемого шпиля при скоростях ветра, наблюдаемых на площадке строительства. Осуществили прямое численное моделирование связанной задачи двухстороннего взаимодействия шпиля и воздушного потока в ПК ANSYS при максимально возможной скорости ветра для места строительства для наиболее опасного направления ветра (полученного по результатам инженерной оценки).

Выводы. Проведенная оценка о возможности возникновения аэроупругой неустойчивости по нормативной методике и поверочный двухсторонний связанный расчет аэроупругих колебаний шпиля подтвердили отсутствие явлений аэроупругой неустойчивости при максимально возможной скорости ветра для места строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аэроупругость, аэроупругая неустойчивость, галопирование, критерий Ден-Гартога, численное моделирование, связанная задача, FSI

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Белостоцкий А.М., Негрозова И.Ю., Горячевский О.С. Оценка аэроупругой устойчивости шпиля башни // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 11. С. 1745–1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762

Автор, ответственный за переписку: Ирина Юрьевна Негрозова, irina-lanzova@mail.ru.

Estimation of aeroelastic stability of a tower spire

Alexander M. Belostotsky, Irina Yu. Negrozova, Oleg S. Goryachevsky

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Large-span and flexible structures are very sensitive to the effects of wind. Such structures are subject to the occurrence of aeroelastic phenomena. In history there are known cases when as a result of wind impact, there was a collapse of the structure. In this regard, the development of methods for estimation of aeroelastic instability is an urgent task.

Materials and methods. Dynamic and stiffness characteristics of the object, used in engineering assessment of the possibility of aeroelastic phenomena, were determined using the ANSYS Mechanical software package. Modelling of the flow around the object under study was carried out using the ANSYS Fluent software package. To confirm the obtained estimates of the impossibility of the occurrence of aeroelastic instability according to the normative method, direct numerical simulation of the two-sided interaction between the spire and the air flow was carried out in the ANSYS software (two-way FSI, implemented by a combination of Fluent and Mechanical modules).

Results. Using the developed computational dynamic finite element models, natural frequencies and vibration modes are determined. An assessment of the possibility of galloping occurrence was carried out according to the normative method for the studied spire at velocity observed at the construction site. Direct numerical modelling of the coupled problem of two-sided interaction between the spire and the air flow was carried out in the ANSYS software package at the maximum possible wind speed for the construction site for the most dangerous wind direction (obtained from the results of engineering assessment).

Conclusions. The assessment of the possibility of aeroelastic instability according to the normative methodology and verification two-sided coupled calculation of aeroelastic oscillations of the spire confirmed the absence of aeroelastic instability phenomena at the maximum possible wind speed for the construction site.

KEYWORDS: aeroelasticity, aeroelastic instability, galloping, Den-Hartog criterion, numerical modelling, coupled problem, FSI

FOR CITATION: Belostotsky A.M., Negrozova I.Yu., Goryachevsky O.S. Estimation of aeroelastic stability of a tower spire. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(11):1745-1762. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.11.1745-1762 (rus.).

Corresponding author: Irina Yu. Negrozova, irina-lanzova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамическая неустойчивость может рассматриваться как процесс, происходящий исключительно внутри потока, когда, например, от неподвижного тела отрывается дорожка вихрей или быстро расходящаяся спутная струя. Но если тело в потоке жидкости отклоняется под действием некоторой силы и это начальное отклонение вызывает последующие отклонения, носящие колебательный характер или характер нарастающих во времени перемещений, то в таком случае говорят, что возникает аэроупругая неустойчивость.

До 1940-х гг. нагрузку от ветра считали второстепенной и не учитывали даже ее статическую составляющую. Так продолжалось вплоть до известного разрушения моста Такома-Нерроуз (Tacoma Narrows Bridge) в США. Несмотря на то что до крушения Такома-Нерроуз моста были известны и другие случаи обрушения (мост аббатства Драйбург в 1818 (Шотландия), цепной пирс в Брайтоне в 1896 (Англия), железнодорожный мост через Ферг-оф-Тей в 1879 (Шотландия)) [1], именно эта авария стала отправной точкой для проведения научных исследований и развития подходов для анализа аэродинамической неустойчивости конструкций. Появились первые фундаментальные работы Кармана, Давенпорта [2, 3], М.Ф. Барштейна [4], Э. Симиу, Р. Сканлана [5], Дж.П. Ден-Гартога [6, 7]. Опираясь на эти исследования, разработаны инженерные методы оценки возникновения аэроупругой неустойчивости.

Традиционно определение ветрового воздействия, а впоследствии и эффектов аэроупругости, выполнялось с помощью экспериментальных методов. Экспериментальным исследованиям эффектов аэроупругости посвящено множество работ [8–12]. Среди них можно выделить труды, рассматривающие модель высотного здания CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council). Эта «эталонная» (калибровочная) простая модель здания для проведения экспериментов в аэродинамической трубе впервые предложена Р.Л. Уордлоу и Г.Ф. Мосс [13]. Имеется много других исследований, в том числе с применением аэроупругой модели для данной модели здания [14–20].

С развитием компьютерных технологий появился альтернативный метод изучения ветрового воздействия на здания и сооружения — численное моделирование. Численные исследования аэродинамики зданий берут начало с 1980-х гг. Существуют публикации, в которых освещается численное моделирование аэродинамики зданий [21–27]. Стоит

отметить статьи [28–31], в них приводится анализ воздействия ветра на здание Техасского технологического университета (TTU), которое использовалось в качестве контрольной задачи для проверки математических моделей, поскольку для данного объекта существуют натурные измерения и измерения в аэродинамической трубе.

Большинство исследований по определению ветрового воздействия на здания и сооружения основаны на предположении абсолютно твердого тела. Аэроупругие модели зданий в задачах вычислительной аэродинамики в строительстве встречаются редко. Моделирование прямого взаимодействия ветра с конструкцией является трудоемкой процедурой, так как включает расчет трехмерных сложных течений с движением сетки, оценку ветровых нагрузок на поверхность тела и решение структурной подсистемы, что обычно осуществляется по неявным схемам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание исследуемой конструкции

Объект исследования представляет собой треугольный в плане шпиль, находящийся на вершине башни на отметке 248.400–288.100 (рис. 1). Несущие конструкции выполнены из армированного тяжелого бетона класса прочности В40 и углеродистой стали класса прочности С355.

Определение динамических и жесткостных характеристик наверхия башни, включая шпиль

Динамические и жесткостные характеристики наверхия, включая шпиль высотного здания, используются при инженерной оценке возможности аэроупругих явлений (резонансное вихревое возбуждение, галопирование, дивергенция и т.д.) в процессе эксплуатации здания и при численном моделировании поведения шпиля в нестационарном ветровом потоке. Установление динамических и жесткостных характеристик объекта производится численно с помощью его математической модели.

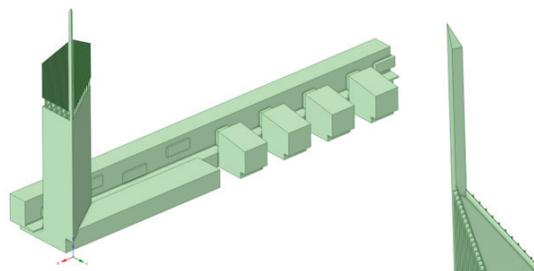


Рис. 1. Геометрия исследуемого шпиля
Fig. 1. Geometry of the studied spire

Математическая модель наверху башни, включая шпиль

Математическая модель объекта представляет собой балочно-оболочечную конечно-элементную модель с заданными поперечными сечениями и материалами несущих конструкций, граничными условиями и действующими нагрузками. Для построения математической модели объекта используется программный комплекс (ПК) ANSYS Mechanical.

В качестве граничных условий выступают ограничения всех шести степеней свободы по всем нижним ребрам стен и торцам колонн, т.е. $U_x = U_y = U_z = U_{RX} = U_{RY} = U_{RZ} = 0$. Граничные условия в математической модели показаны на рис. 2.

Математическая модель разбита на 26 806 конечных элементов (КЭ). Сетка КЭ математической модели исследуемого объекта приведена на рис. 3.

Математическая модель составлена из 24 отдельных элементов (ядро шпиля, стены, перекрытия, балки, колонны, фермы, каркас покрытия и наборы из них), между узлами конечно-элементной сетки которых заданы кинематические связи. Эти связи накладываются либо только на поступательные степени свободы (связи между опорными узлами стропильных ферм и колоннами, связи между элементами каркаса покрытия и верхними поясами стропильных ферм, связи между опорными узлами каркаса покрытия и колоннами), либо на все степени свободы (связи между железобетонными стенами, перекрытиями, балками, колоннами). Кинематические связи между элементами математической модели представлены на рис. 4.

Методика расчетов

Все расчеты проводились в линейной постановке (малые деформации и перемещения).

С целью выявления динамических характеристик объекта для его математической модели решалась задача на собственные значения. Решение осуществлялось с помощью блочного метода Ланцоша. Определялись первые 20 собственных частот и форм колебаний.

Для установления жесткостных характеристик объекта выполнялась серия из шести статических расчетов с использованием прямого метода решения, адаптированного для задач с разреженными матрицами. Рассматривается сечение шпиля на высоте 250,8 м, отстоящее от верхней грани его железобетонного ядра на 32 м (рис. 5). В характерной точке расчетного сечения шпиля, лежащей на пересечении его медиан, поочередно задаются сосредоточенные силы F_i и сосредоточенные моменты M_i , действующие вдоль одной из степеней свободы ($i = X, Y, Z$). Для каждого расчетного случая определяются перемещения этой точки по всем шести степеням свободы. По результатам расчетов устанавли-

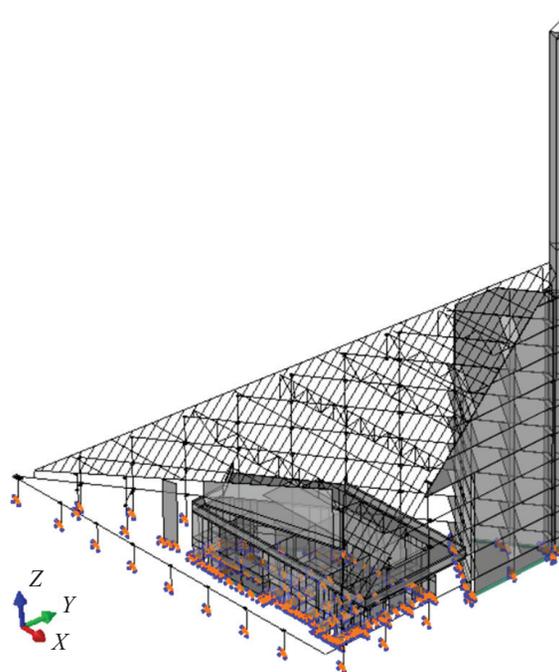


Рис. 2. Граничные условия в математической модели объекта (оранжевые стрелки — ограничение поступательных степеней свободы, синие стрелки — ограничение вращательных степеней свободы)

Fig. 2. Boundary conditions in the mathematical model of the object (orange arrows — limitation of translational degrees of freedom, blue arrows — limitation of rotational degrees of freedom)

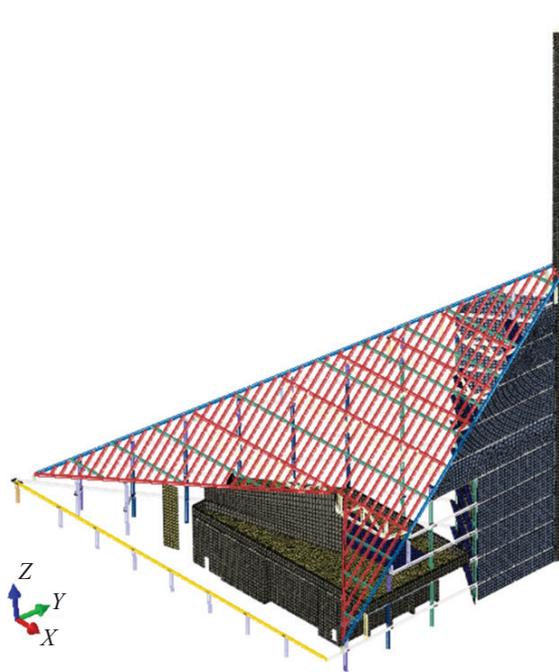


Рис. 3. Конечно-элементная сетка математической модели объекта

Fig. 3. Finite element mesh of the mathematical model of the object

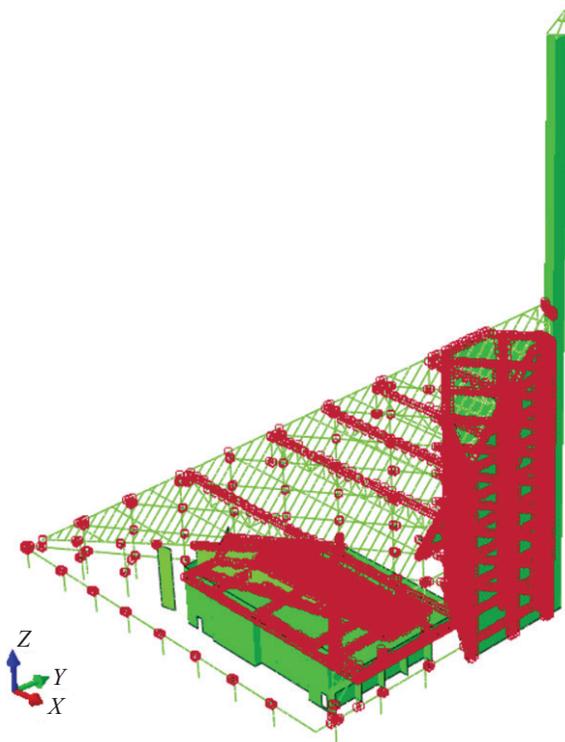


Рис. 4. Кинематические связи между элементами математической модели объекта

Fig. 4. Kinematic connections between the elements of the mathematical model of the object

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} F_x / U_x & F_x / U_y & F_x / U_z & F_x / UR_x & F_x / UR_y & F_x / UR_z \\ F_y / U_x & F_y / U_y & F_y / U_z & F_y / UR_x & F_y / UR_y & F_y / UR_z \\ F_z / U_x & F_z / U_y & F_z / U_z & F_z / UR_x & F_z / UR_y & F_z / UR_z \\ M_x / U_x & M_x / U_y & M_x / U_z & M_x / UR_x & M_x / UR_y & M_x / UR_z \\ M_y / U_x & M_y / U_y & M_y / U_z & M_y / UR_x & M_y / UR_y & M_y / UR_z \\ M_z / U_x & M_z / U_y & M_z / U_z & M_z / UR_x & M_z / UR_y & M_z / UR_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ливаются элементы K_{ij} матрицы жесткости K части объекта, лежащей ниже расчетного сечения шпиля:

Галопирование

В отечественных нормах СП^{1,2} и в Eurocode³ приводится рекомендация для оценки возникновения эффекта галопирования.

В Eurocode указано, что некруглые поперечные сечения, включая сечения *I*-, *U*-, *L*- и *T*-образной формы, склонны к возникновению галопирования. Для круглых сечений галопирование невозможно, так как характер обтекания не меняется с изменением угла атаки ветра, однако наличие обледенения на круглых сечениях может привести к возникнове-

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия (с Изменениями № 1–4).

² СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия (с Изменениями № 1).

³ Eurocode 1: Actions on structures. Part 1–4: General Actions — Wind actions.

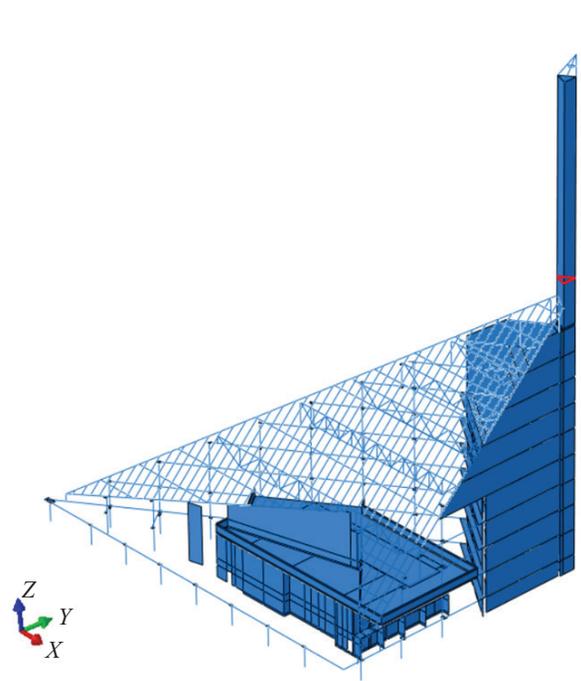


Рис. 5. Расчетное сечение шпиля (отмечено красным цветом), для которого определялась матрица жесткости нижележащей части объекта

Fig. 5. Estimated section of the spire (marked in red), for which the stiffness matrix of the underlying part of the object was determined

нию аэроупругих явлений галопирования. Колебания при галопировании начинаются с определенной начальной скорости $V_{cr,g}$, называемой критической. Амплитуды колебаний в этом случае быстро растут с увеличением скорости ветра.

В отечественных нормах СП 20.13330 отмечено, что аэродинамически неустойчивые колебания типа галопирования могут возникнуть в протяженных сплошнотенчатых сооружениях при одновременном выполнении трех условий:

1) относительное удлинение $\lambda_e > 20$, где λ_e определяется в соответствии с указаниями СП 20.13330 ($\lambda_e = l/b = 175/1,8 = 97$);

2) коэффициент a_g удовлетворяет условию:

$$a_g = \left(\frac{dC_L}{da} + C_D \right) < 0, \quad (2)$$

где C_L и C_D — аэродинамические коэффициенты силы лобового сопротивления и подъемной (боко-

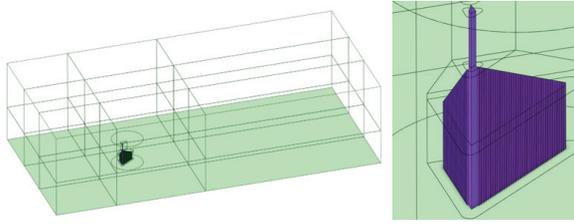


Рис. 6. Геометрическая модель шпиля с учетом навершия
Fig. 6. Geometrical model of the spire, taking into account the cap

вой) силы соответственно в поточной системе координат; α — угол атаки ветра;

3) максимально возможная скорость ветра для места строительства на высоте рассматриваемого сечения превышает критическую скорость $V_{cr,g}$:

$$V_{cr,g} = \frac{2 \cdot Sc \cdot f_i \cdot d}{-a_g \cdot \gamma_{cr}} \leq V_{max}, \quad (3)$$

где $Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho_a \cdot d^2}$ — число Скратона; m_1 — эквивалентная погонная масса, кг/м; δ_s — логарифмический декремент при поперечных колебаниях сооружения; ρ_a — плотность воздуха, кг/м³; d — характерный поперечный размер, м; f_i — частота колебаний по i -й изгибной собственной форме, Гц;

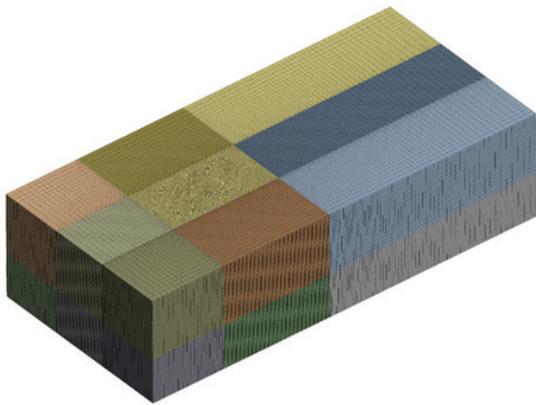


Рис. 7. Конечно-объемная сетка (1 743 746 узлов / конечных объемов)

Fig. 7. Finite volume mesh (1,743,746 nodes / finite volumes)

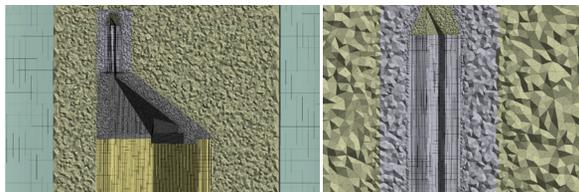


Рис. 8. Разрез конечно-объемной сетки

Fig. 8. Finite volume mesh section

γ_{cr} — коэффициент; V_{max} — максимально возможная скорость ветра для места строительства:

$$V_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot w_0 \cdot k(z) \cdot \gamma_f}{\rho_a}}, \quad (4)$$

где w_0 , $k(z)$ и γ_f определяются в соответствии с указаниями СП 20.13330.2016.

Аэродинамическая модель

Проведение серии нестационарных аэродинамических расчетов для полной модели башни требует значительного времени в силу высокой размерности задачи. Исследуемый объект существенно выше имеющейся окружающей застройки, поэтому ее влияние на обтекание шпиля отсутствует. Кроме того, результаты выполненных исследований обтекания полной и усеченной модели башни показали близкие количественные (значения ветровой нагрузки) и качественные (картина обтекания шпиля) значения. Рассмотрение только части башни (шпиль и навершие) позволяет получить выигрыш во времени проведения расчетов (рис. 6).

Конечно-объемная сетка

Моделирование обтекания сечения шпиля проводилось в ANSYS Fluent, лучше зарекомендовавшем себя в решении нестационарных задач,

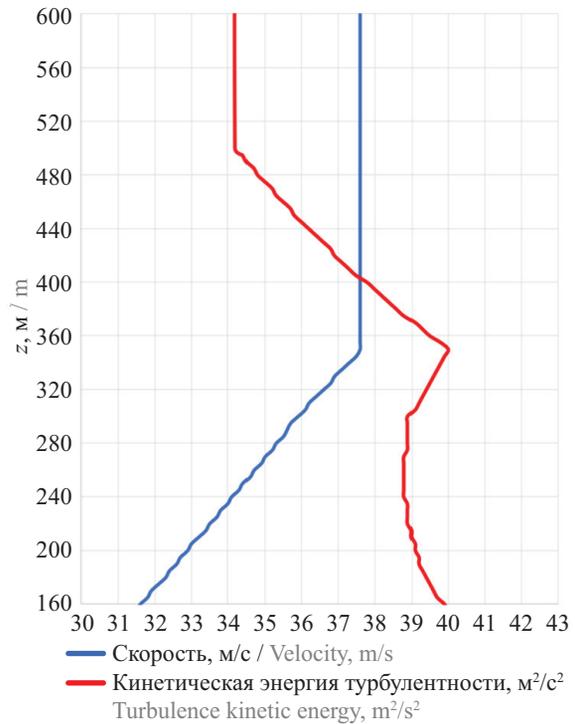


Рис. 9. Профили кинетической энергии турбулентности ТКЕ (красная линия), м²/с², и скорости ветра u (синяя линия), м/с, для первого ветрового района, тип местности В
Fig. 9. Profiles of turbulence kinetic energy TKE (red line), м²/с², and wind speed u (blue line), м/с, for the first wind region, terrain type B

а также обладающем большими возможностями настроек параметров решения подобных задач, чем ANSYS CFX.

Вся расчетная область воздуха разбивалась на конечные объемы с использованием модуля ANSYS Meshing. Вокруг шпильки был создан пограничный слой: 5 слоев вокруг шпильки, каждый следующий слой в 1,2 раза толще предыдущего. Поверхность шпильки разбита на элементы размером 0,2 м. Полученная расчетная сетка представлена на рис. 7, 8.

Граничные условия

Области расчета (рис. 6) задан соответствующий рассматриваемой среде домен Air (воздух), для которого определены следующие физические параметры: тип среды — несжимаемый воздух при температуре 25 °С и давление 1 атм.

Граничные условия на «входе» (INLET) для расчетной области (предназначенной для определения ветровых нагрузок) соответствуют первому ветровому району и типу местности В. При помощи разработанного макроса были пересчитаны профили давлений и пульсаций в аналогичные профили скорости, кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии для задания в ANSYS Fluent (рис. 9). Согласно рекомендациям Eurocode задан масштаб турбулентности, равный 300 м.

На «выходе» (OUTLET), а также на верхней грани воздушного домена заданы «мягкие» граничные условия типа Opening с нулевыми дополнительными давлениями. Также в этих условия назначены параметры турбулентности, как и на «входе».

На объекте задавалось условие «стенки с прилипанием» (No-Slip Wall, $U = V = W = 0$ м/с), которое не допускает проникновение воздуха через поверхность.

На остальных гранях задано условие симметрии (Symmetry).

Параметры расчетов

Для разработанной расчетной модели математическое (численное) моделирование ветровых нагрузок проводилось в стационарной постановке

с использованием подхода турбулентности RANS (модель турбулентности Realizable $k-\epsilon$ модель).

В стационарных расчетах критерием окончания счета назначено максимальное количество итераций — 200 или достижение максимальных невязок по давлению и по всем компонентам скорости 10^{-3} .

Для решения в нестационарной постановке шаг физического времени решения принят равным 0,1 с.

Экспериментальное определение аэродинамических характеристик

С целью получения аэродинамических характеристик шпильки, а именно коэффициентов подъемной силы и силы лобового сопротивления, применялся альтернативный метод — физическое моделирование. Экспериментальные исследования проводились в аэродинамической трубе НИУ МГСУ сотрудниками Учебно-научно-производственной лаборатории по аэродинамическим и аэроакустическим испытаниям строительных конструкций (УНПЛ ААИСК).

Описание экспериментальной аэродинамической трубы

Аэродинамическая труба имеет замкнутый циркуляционный контур и модульный вентиляторный блок из девяти установок при длине рабочей зоны 18,9 м. Основные технические характеристики: 1) длина рабочей зоны аэродинамической трубы МГСУ (18,9 м) позволяет корректировать профиль эпюры скорости потока, имитирующий приземный слой атмосферы в разных условиях; 2) диаметр рабочего поворотного стола — 3 м; 3) диапазон скоростей в рабочей зоне от 0 до 32 м/с.

Описание модели для физического (экспериментального) моделирования

Сотрудниками УНПЛ ААИСК разработана и изготовлена модель исследуемого объекта (рис. 10). Учитывая размеры рабочей части аэродинамической трубы, был выбран максимально возможный из условий загромождения потока масштаб макета 1:75. Модель изготовлена из фанеры и листового ПВХ.



Рис. 10. Модель исследуемого объекта

Fig. 10. Model of the object under study



Рис. 11. Узел крепления шестикомпонентного силомоментного датчика

Fig. 11. Mounting unit for a six-component force-torque sensor

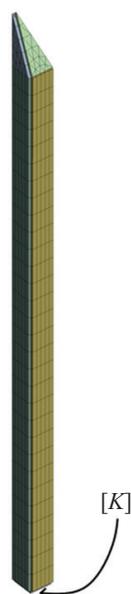


Рис. 12. Конечно-элементная сетка для шпиля (986 узлов)
Fig. 12. Finite element mesh for spire (986 nodes)

Внутримodelьное пространство выполнено с учетом необходимости размещения порядка 120 контрольных точек измерения давления на поверхности модели. В конструкции модели предусмотрен узел крепления шестикомпонентного силомоментного датчика, необходимого для определения интегральных характеристик ветровой нагрузки на краях шпиля (рис. 11).

Численное моделирование аэроупругого взаимодействия шпиля с воздушным потоком

Для определения возможности возникновения аэроупругой неустойчивости инженерных оценок недостаточно. С целью подтверждения (или опровержения) возникновения аэроупругой неустойчивости конструкции необходимо провести экспериментальное (физическое) или численное

моделирование. Для рассматриваемого шпиля выполнение экспериментального моделирования невозможно в силу ограничений, возникающих при создании модели. Поэтому в данном случае безальтернативным является численное моделирование.

Параметры расчетной модели динамики шпиля

Для моделирования динамического поведения шпиля была создана оболочечная конечно-элементная модель (рис. 12). Применялся тип элементов SHELL181. По вертикали шпиль разбит на 80 элементов, каждая сторона треугольного сечения разбита на 5 элементов.

Влияние «отброшенной» части наверху и шпиля учитывалось с помощью дополнительной симметричной матрицы жесткости K , установленной внизу моделируемой упругой части шпиля.

Параметры расчета в связанной постановке

Размер временного шага составляет $\Delta t = 0,1$ с. Физическое время расчета — 300 с.

Для процедуры связанного расчета существуют параметры, которые отвечают за обеспечение устойчивости и сходимости решения на каждом связанном шаге. К таким параметрам относятся:

- максимальное количество итераций для каждого связанного шага;
- критерий сходимости для нагрузок и перемещений;
- коэффициент нижней релаксации, участвующий в определении нагрузок и перемещений для каждой итерации связанного шага:

$$\varphi = \varphi_{pre} + \alpha(\varphi_{new} + \varphi_{pre}), \quad (5)$$

где φ — пересчитанное значение искомой величины на текущей итерации; φ_{pre} — значение переменной, вычисленной на предыдущей итерации; α — коэффициент релаксации; φ_{new} — значение переменной (нагрузка или перемещение), вычисленной на текущей итерации.

Табл. 1. Собственные частоты колебаний объекта

Table 1. Natural frequencies of the object oscillations

Номер собственной частоты колебаний Number of natural frequency of oscillations	Собственная частота колебаний, Гц Natural frequency of oscillation, Hz	Номер собственной частоты колебаний Number of natural frequency of oscillations	Собственная частота колебаний, Гц Natural frequency of oscillation, Hz
1	0,799	11	5,982
2	0,967	12	6,377
3	3,509	13	6,486
4	3,708	14	6,712
5	4,204	15	6,880
6	4,608	16	7,024
7	4,871	17	7,165
8	5,360	18	7,433
9	5,675	19	7,601
10	5,889	20	7,912

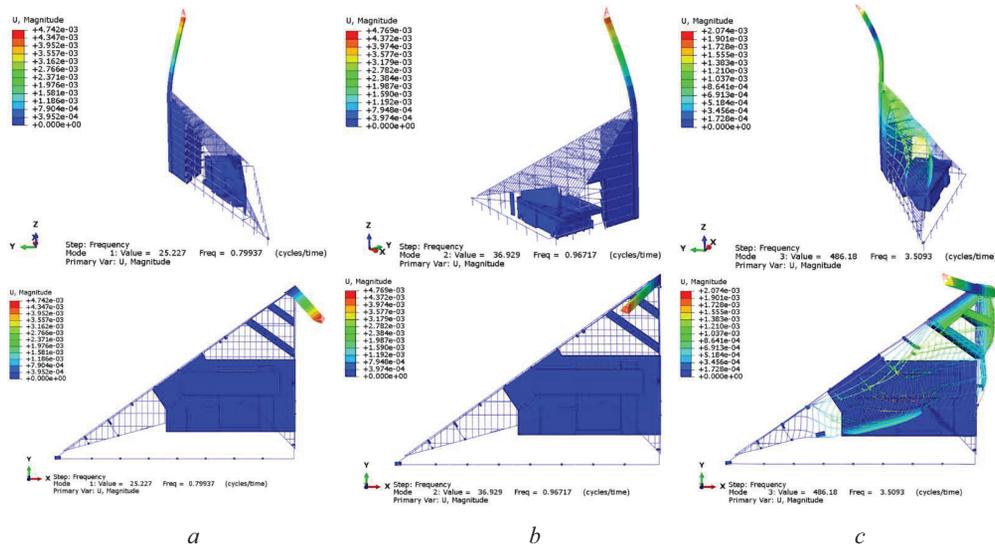


Рис. 13. Собственные формы колебаний: *a* — 1-я форма (0,799 Гц); *b* — 2-я форма (0,967 Гц); *c* — 3-я форма (3,509 Гц)

Fig. 13. Natural modes of oscillations: *a* — 1 mode (0.799 Hz); *b* — 2 mode (0.967 Hz); *c* — 3 mode (3.509 Hz)

Табл. 2. Обобщенные перемещения расчетного сечения шпиля при действии в нем заданных нагрузок

Table 2. Generalized displacements of the design section of the spire under the given loads in it

Тип нагрузки Load type	Направление действия нагрузки Load direction	Амплитуда нагрузки, Н Load amplitude, N	U_x , м / м	U_y , м / м	U_z , м / м	UR_x , рад rad	UR_y , рад rad	UR_z , рад rad
Сила Force	X	$1,00 \times 10^6$	$1,03 \times 10^{-2}$	$-1,80 \times 10^{-3}$	$-3,49 \times 10^{-4}$	$1,99 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$4,20 \times 10^{-4}$
Сила Force	Y	$1,00 \times 10^6$	$-1,80 \times 10^{-3}$	$7,51 \times 10^{-3}$	$-5,76 \times 10^{-4}$	$-9,10 \times 10^{-4}$	$-2,10 \times 10^{-4}$	$6,80 \times 10^{-6}$
Сила Force	Z	$1,00 \times 10^6$	$-3,49 \times 10^{-4}$	$-5,76 \times 10^{-4}$	$3,60 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-5}$	$-1,71 \times 10^{-5}$	$-2,10 \times 10^{-5}$
Момент Moment	X	$1,00 \times 10^6$	$1,99 \times 10^{-4}$	$-9,10 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-5}$	$2,28 \times 10^{-4}$	$4,36 \times 10^{-5}$	$4,13 \times 10^{-6}$
Момент Moment	Y	$1,00 \times 10^6$	$1,00 \times 10^{-3}$	$-2,10 \times 10^{-4}$	$-1,71 \times 10^{-5}$	$4,36 \times 10^{-5}$	$2,20 \times 10^{-4}$	$4,87 \times 10^{-5}$
Момент Moment	Z	$1,00 \times 10^6$	$4,20 \times 10^{-4}$	$6,80 \times 10^{-6}$	$-2,10 \times 10^{-5}$	$4,13 \times 10^{-6}$	$4,87 \times 10^{-5}$	$6,89 \times 10^{-4}$

Примечание: U_x, U_y, U_z — перемещение в направлении осей X, Y, Z; UR_x, UR_y, UR_z — поворот относительно осей X, Y, Z.

Note: U_x, U_y, U_z — movement in the direction of the X, Y, Z axes; UR_x, UR_y, UR_z — rotation relative to the X, Y, Z axes.

При решении связанной задачи в настоящем исследовании для нагрузок был принят коэффициент нижней релаксации $\alpha = 0,75$, перемещения передавались без пересчета через коэффициент нижней релаксации. Максимальное количество итераций на каждом связанном шаге (попытка FSI) было задано равным 5 для достижения критерия сходимости. Критерий сходимости для величин (перемещение и нагрузки) задан равным 10^{-3} .

Интегрирование для уравнений движения шпиля — метод Ньюмарка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Собственные частоты и формы колебаний конструкции. Жесткостные характеристики шпиля

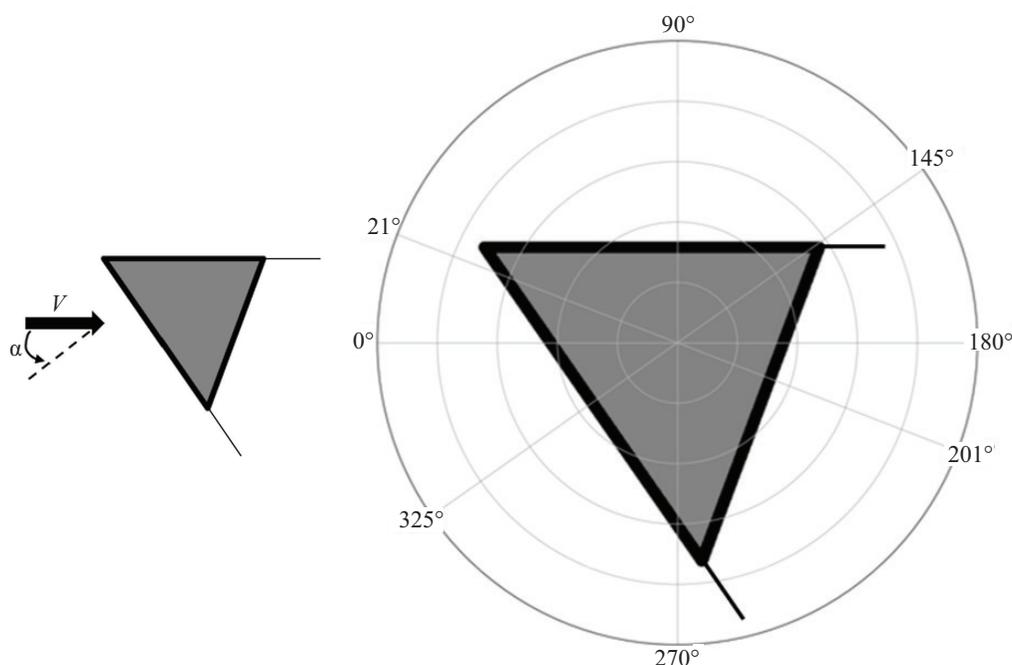
Ниже представлены результаты модального анализа (табл. 1, рис. 13) и жесткостные характеристики шпиля (табл. 2, 3).

Оценка аэроупругой неустойчивости шпиля по нормативной методике

Согласно описаниям аэроупругих явлений можно сделать вывод о том, что для исследуемого

Табл. 3. Матрица жесткости K несущих конструкций объекта, лежащих ниже расчетного сечения шпиляTable 3. Stiffness matrix K of the load-bearing structures of the object below the design cross-section of the spire

1	2	3	4	5	6
$9,75 \times 10^7$ Н/м N/m	$-5,54 \times 10^8$ Н/м N/m	$-2,87 \times 10^9$ Н/м N/m	$5,03 \times 10^9$ Н/рад N/rad	$9,97 \times 10^8$ Н/рад N/rad	$2,38 \times 10^9$ Н/рад N/rad
$-5,54 \times 10^8$ Н/м N/m	$1,33 \times 10^8$ Н/м N/m	$-1,74 \times 10^9$ Н/м N/m	$-1,10 \times 10^9$ Н/рад N/rad	$-4,75 \times 10^9$ Н/рад N/rad	$1,47 \times 10^{11}$ Н/рад N/rad
$-2,87 \times 10^9$ Н/м N/m	$-1,74 \times 10^9$ Н/м N/m	$2,78 \times 10^9$ Н/м N/m	$3,74 \times 10^{10}$ Н/рад N/rad	$-5,85 \times 10^{10}$ Н/рад N/rad	$-4,76 \times 10^{10}$ Н/рад N/rad
$5,03 \times 10^9$ Нм/м Nm/m	$-1,10 \times 10^9$ Нм/м Nm/m	$3,74 \times 10^{10}$ Нм/м Nm/m	$4,40 \times 10^9$ Нм/рад Nm/rad	$2,29 \times 10^{10}$ Нм/рад Nm/rad	$2,42 \times 10^{11}$ Нм/рад Nm/rad
$9,97 \times 10^8$ Нм/м Nm/m	$-4,75 \times 10^9$ Нм/м Nm/m	$-5,85 \times 10^{10}$ Нм/м Nm/m	$2,29 \times 10^{10}$ Нм/рад Nm/rad	$4,54 \times 10^9$ Нм/рад Nm/rad	$2,05 \times 10^{10}$ Нм/рад Nm/rad
$2,38 \times 10^9$ Нм/м Nm/m	$1,47 \times 10^{11}$ Нм/м Nm/m	$-4,76 \times 10^{10}$ Нм/м Nm/m	$2,42 \times 10^{11}$ Нм/рад Nm/rad	$2,05 \times 10^{10}$ Нм/рад Nm/rad	$1,45 \times 10^9$ Нм/рад Nm/rad

Рис. 14. Схема для пояснения критерия Ден-Гартога (V — вектор набегающего потока)Fig. 14. Scheme to explain the Den Hartog criterion (V is the vector of the impinging flow)

шпиля возможно возникновение такого вида неустойчивости как галопирование. Для оценки возможности возникновения галопирования определяются критерий Ден-Гартога (формула (2), рис. 14).

По результатам физического и численного моделирования получены аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления и подъемной (боковой) силы на шпиль (рис. 15). Далее по формуле (2) определен критерий Ден-Гартога a_g (табл. 4, рис. 16).

Число Скратона равно:

$$Sc = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \delta_s}{\rho_a \cdot d^2} = 45,66, \quad (6)$$

где $m_1 = 5764,17$ кг/м — эквивалентная погонная масса; $\delta_s = 0,1$ — коэффициент конструкционного демпфирования для железобетонных конструкций согласно Eurocode; $\rho_a = 1,225$ кг/м³ — плотность воздуха; $d =$

$= 4,54$ м — характерный поперечный размер (диаметр описанной окружности вокруг треугольного сечения).

В табл. 4 представлены полученные по формуле (3) значения критических скоростей возникновения галопирования ($f = 0,8$ Гц).

При этом максимально возможная скорость ветра для места строительства:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2w_0 k(z) \gamma_f}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 230 \text{ Па} \cdot 2,5 \cdot 1,4}{1,225 \text{ кг/м}^2}} = 36,25 \text{ м/с}, \quad (7)$$

где V_{\max} — максимально возможная скорость ветра (повторяемость — один раз в 50 лет) для шпиля на отметке 290 м.

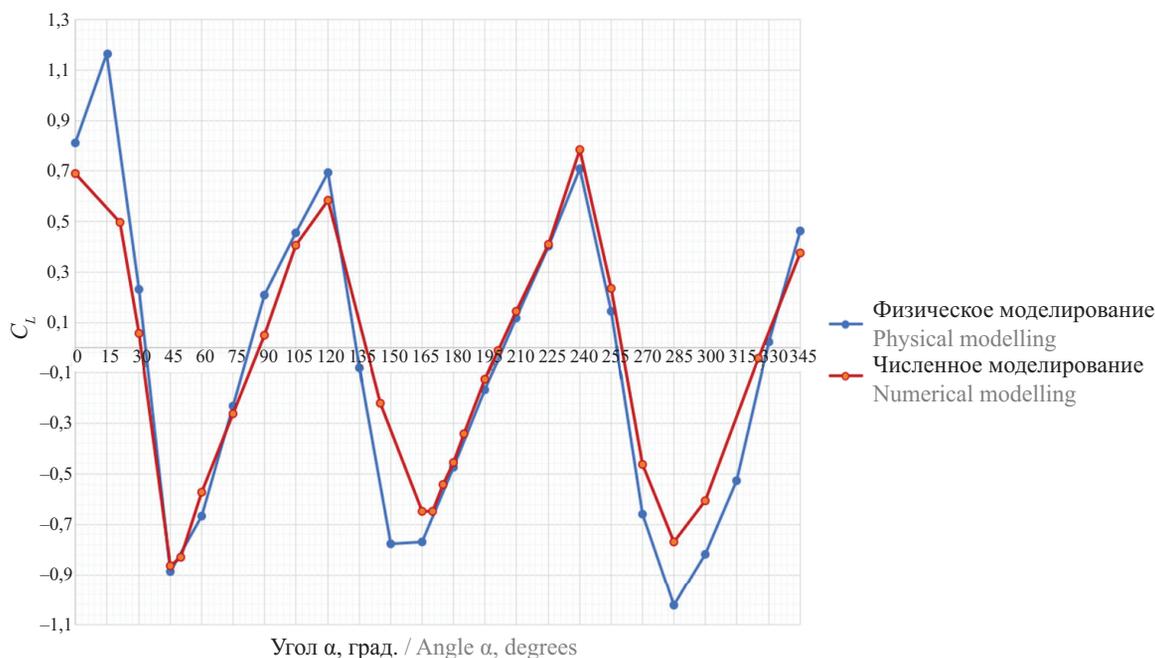
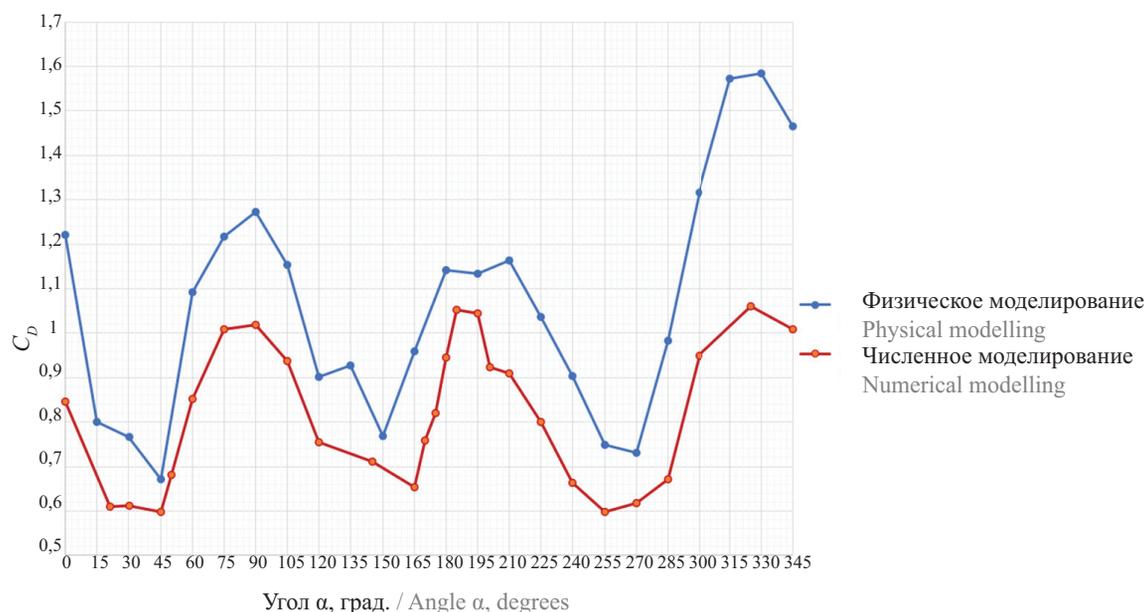


Рис. 15. Графики зависимости коэффициентов силы лобового сопротивления C_D и подъемной силы C_L от угла атаки ветра α
 Fig. 15. Graphs of dependence of the coefficients of drag force C_D and lift force C_L on the angle of attack of the wind α

Табл. 4. Значения критических скоростей возникновения галопирования
 Table 4. Values of critical velocity of galloping occurrence

Физическое моделирование Physical modelling			Численное моделирование Numerical modelling		
Угол α , град. / Angle α , degrees	a_g	$V_{cr.g}$, м/с / m/s	Угол α , град. / Angle α , degrees	a_g	$V_{cr.g}$, м/с / m/s
30	-2,80	94,8	30	-2,20	120,9
45	-3,61	73,6	45	-2,92	90,8
135	-2,02	131,2	145	-1,13	234,7
150	-1,90	139,8	165	-0,58	460,2
255	-1,41	188,5	255	-1,50	176,6
270	-2,34	113,3	270	-2,04	130,2
285	-0,40	665,5	285	-0,50	532,6

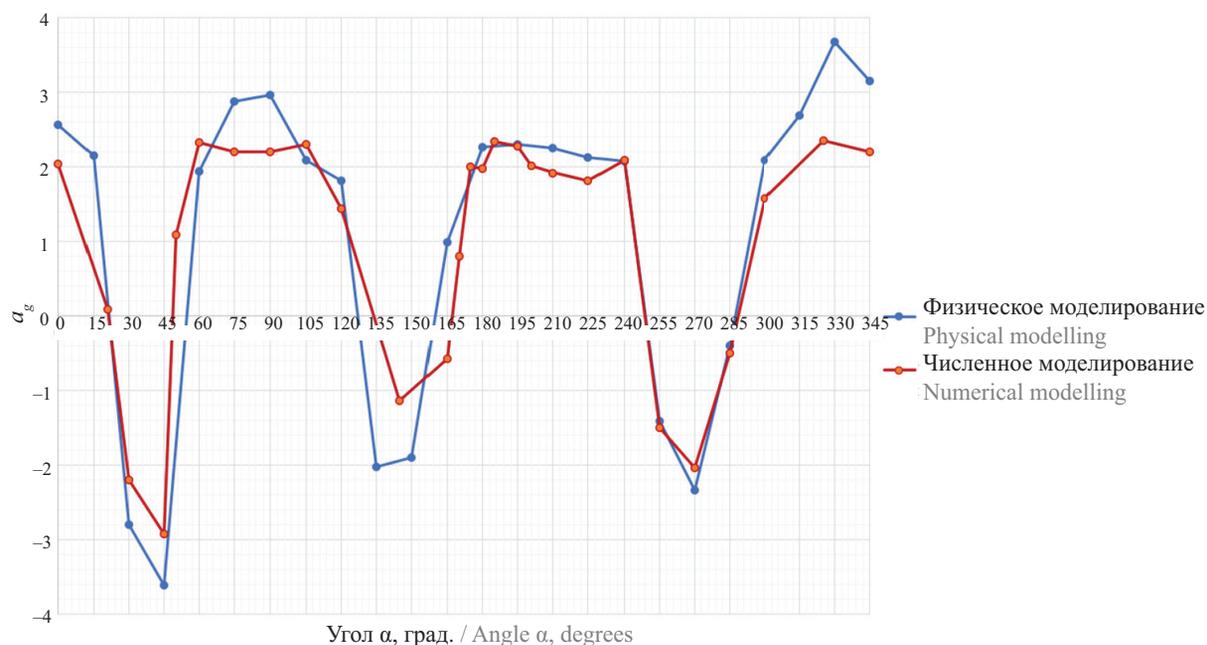


Рис. 16. График зависимости коэффициента a_g от угла атаки ветра α

Fig. 16. Graph of dependence of the coefficient a_g on the angle of attack of the wind α

Математическое (численное) моделирование аэроупругого взаимодействия шпиля с воздушным потоком

Для подтверждения полученной оценки о невозможности возникновения аэроупругой неустойчивости по нормативной методике было проведено прямое численное моделирование двухстороннего взаимодействия шпиля и воздушного потока в ПК ANSYS (двухсторонний FSI, реализуемый связкой модулей Fluent и Mechanical). Расчет выполнялся для максимально возможной скорости ветра для места строительства. Рассматривался угол атаки ветра 45° (рис. 17), так как, согласно проведенной оценке на галопирование, именно для этого угла критическая скорость ветра была минимальной (табл. 4). Поскольку

большой интерес представляет динамический отклик шпиля, а также для оптимизации вычислительных ресурсов, вся конструкция (кроме шпиля) принята абсолютно жестким телом (рис. 18).

Ниже представлены полученные результаты:

- графики зависимости перемещения точки (вершины шпиля) вдоль осей x и y от времени (рис. 19);
- графики зависимости силы лобового сопротивления F_D подъемной силы F_L , действующих на шпиль, от времени (рис. 20);
- изополе общего перемещения шпиля в момент времени $t = 300$ с (рис. 21);
- изополя скоростей в горизонтальных и вертикальных плоскостях в разные моменты времени (рис. 22, 23).

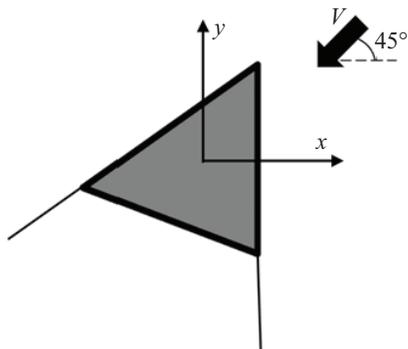


Рис. 17. Система координат и направление ветрового потока

Fig. 17. Coordinate system and wind flow direction



Рис. 18. Геометрическая модель

Fig. 18. Geometric model

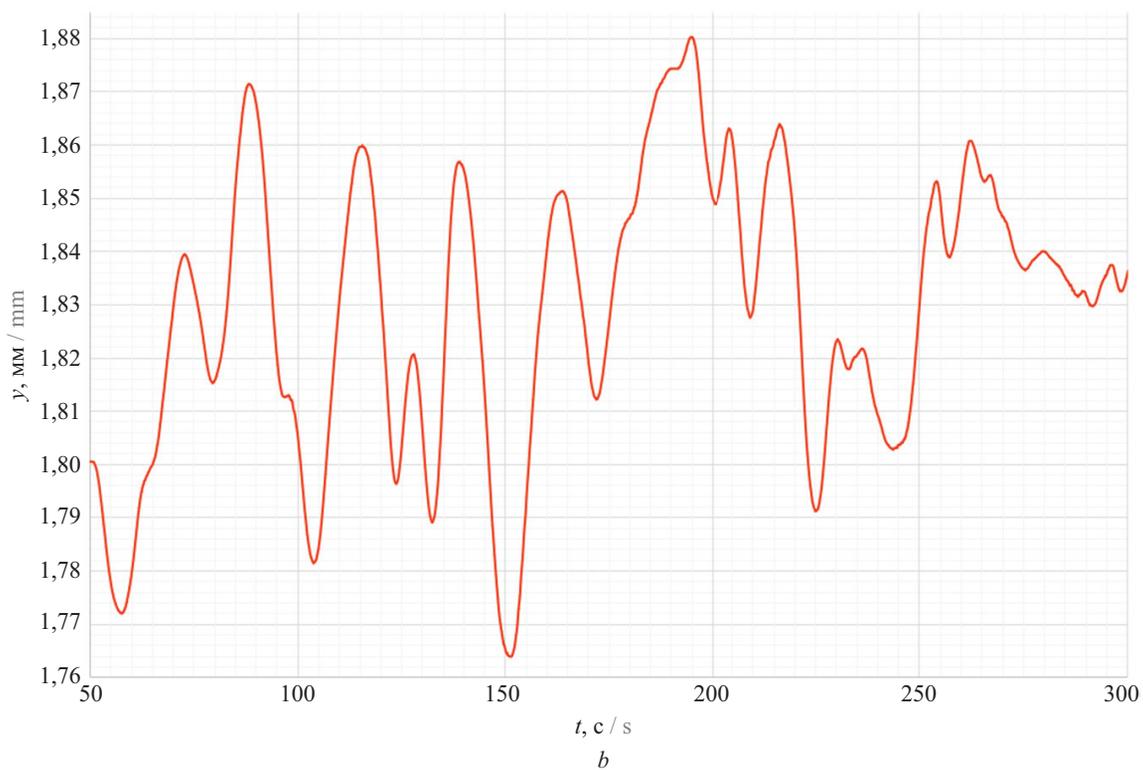
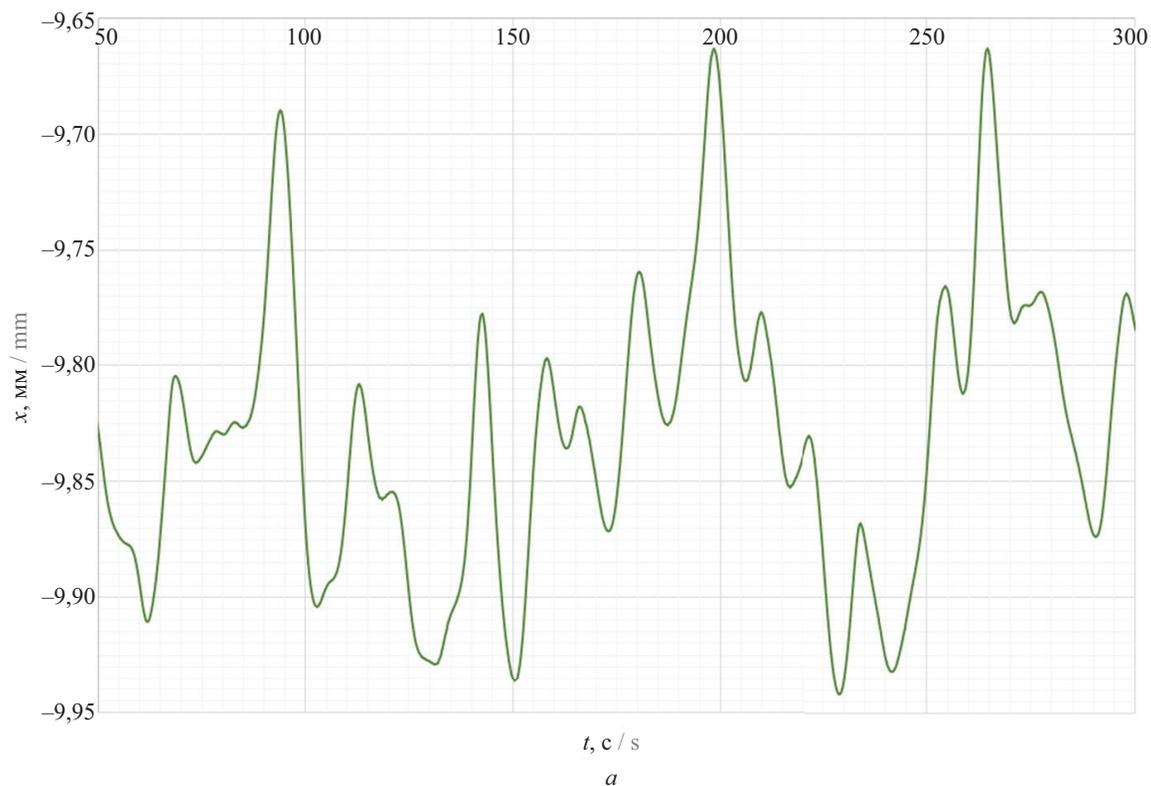


Рис. 19. График зависимости перемещения точки (вершины шпиля) от времени, мм: a — вдоль оси x ; b — вдоль оси y
Fig. 19. Graph of time dependence of point displacement (spire top), mm: a — along the x axis; b — along the y axis

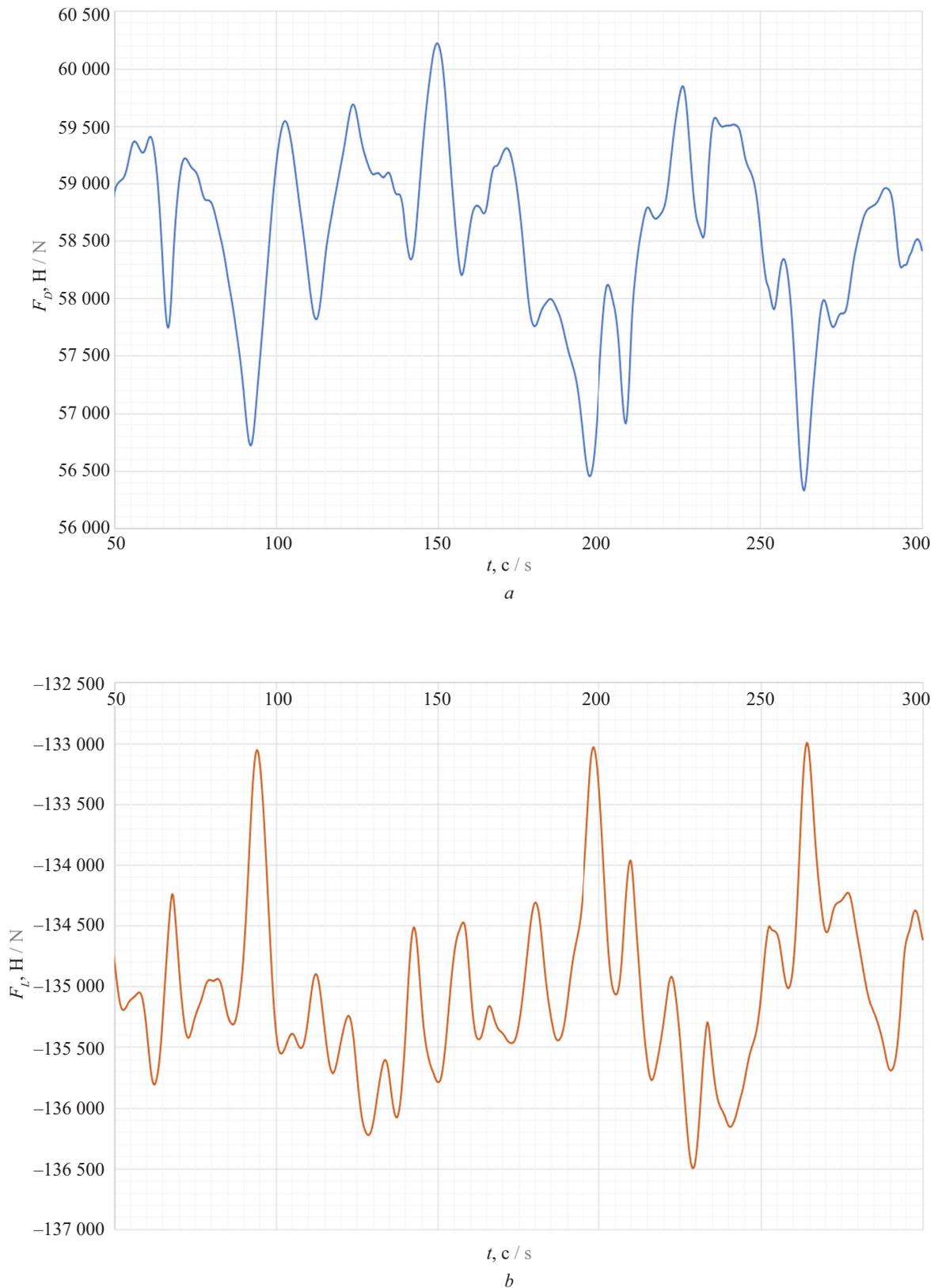


Рис. 20. Зависимость аэродинамических сил, действующих на шпиль, от времени, Н: a — сила лобового сопротивления F_D ; b — подъемная сила F_L

Fig. 20. Time dependence of aerodynamic forces acting on the spire, N: a — drag force F_D ; b — lift force F_L

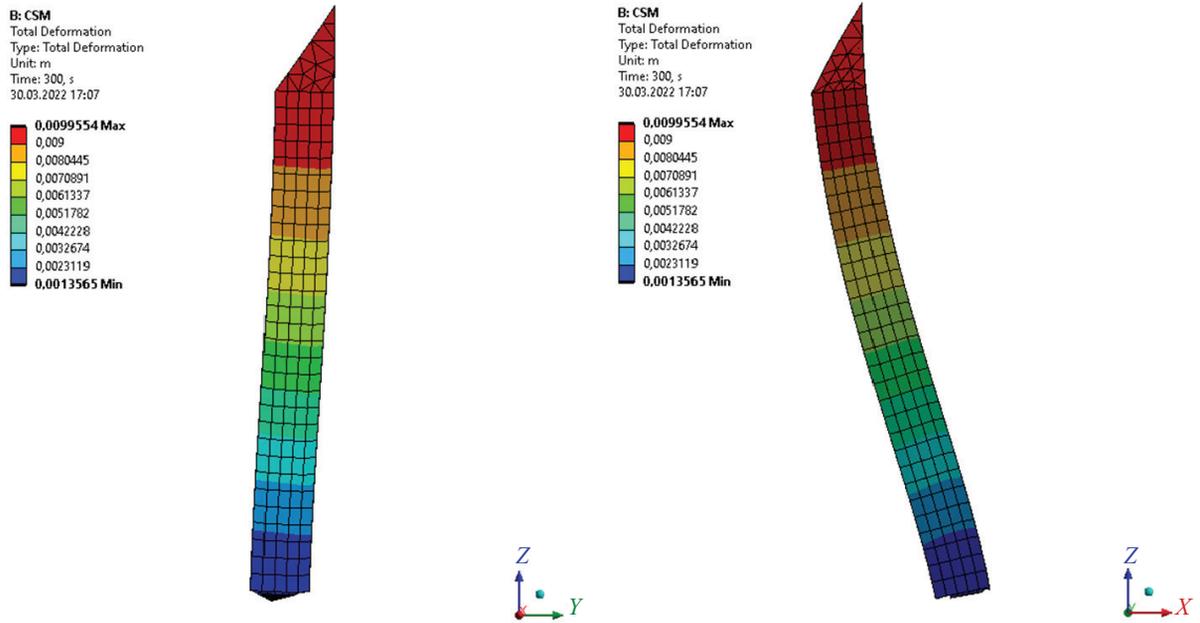


Рис. 21. Общее перемещение, м, шпиля в момент времени $t = 300$ с

Fig. 21. Total displacement, m, of the spire at time $t = 300$ s

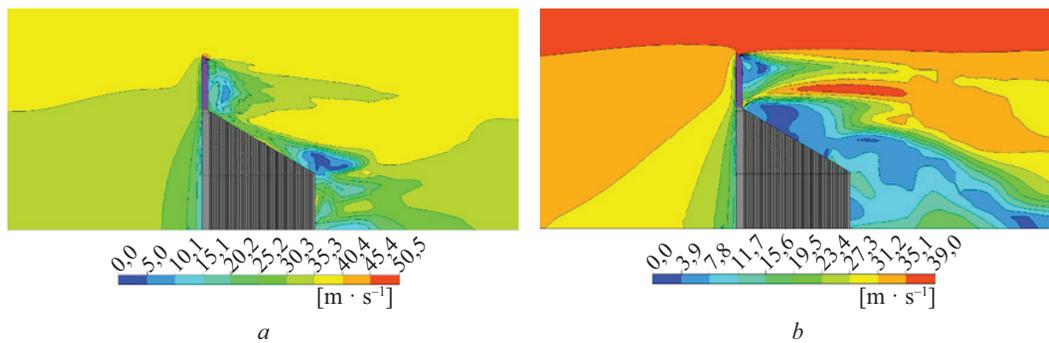


Рис. 22. Изополе скоростей, м/с, в вертикальной плоскости в разные моменты времени: $a — t = 50$ с; $b — t = 300$ с

Fig. 22. Isofield of velocity, m/s, in the vertical plane at different moments of time: $a — t = 50$ s; $b — t = 300$ s

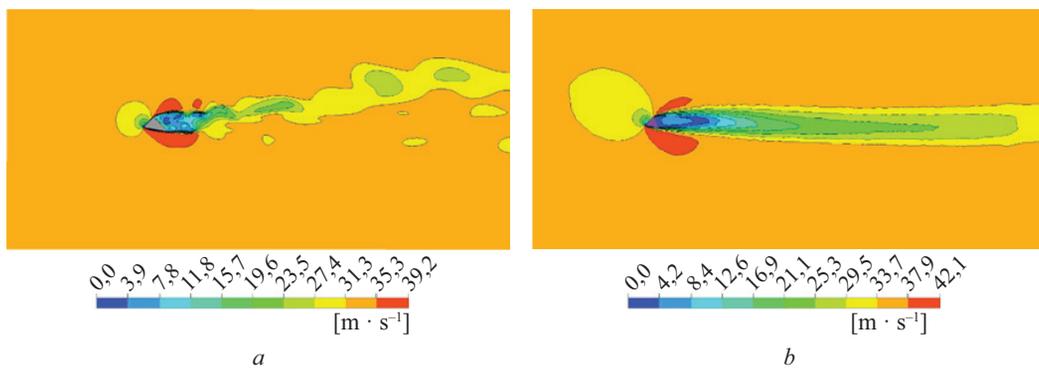


Рис. 23. Изополе скоростей, м/с, в горизонтальной плоскости на разных уровнях в момент времени $t = 300$ с: $a — 200$ м; $b — 275$ м

Fig. 23. Isofield of velocity, m/s, in the horizontal plane at different levels at time $t = 300$ s: $a — 200$ m; $b — 275$ m

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенная оценка по нормативной методике показывает, что для исследуемого шпиля невозможно возникновение явления галопирования при скоростях ветра, наблюдаемых на площадке строительства.

В результате прямого численного моделирования связанной задачи двухстороннего взаимодействия шпиля и воздушного потока в ПК ANSYS (двухсторонний FSI, реализуемый связкой модулей Fluent и Mechanical) при максимально возможной

скорости ветра для места строительства для наиболее опасного направления ветра выявлено:

- перемещение шпиля не превышают 10 мм, а амплитуда колебания составляет доли миллиметра;
- в течение 300 моделируемых секунд не было обнаружено увеличения амплитуд колебаний и изменения равновесного положения шпиля.

Таким образом, поверочный двухсторонний связанный расчет аэроупругих колебаний шпиля подтвердил отсутствие явлений аэроупругой неустойчивости при максимально возможной скорости ветра для места строительства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Holmes J.D.* Wind loading of structures. Boca Raton : CRC press, 2018.
2. *Davenport A.G.* The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1961. Vol. 19. Issue 4. Pp. 449–472. DOI: 10.1680/iicep.1961.11304
3. *Davenport A.G.* Gust Loading Factors // *Journal of the Structural Division*. 1967. Vol. 93. Issue 3. Pp. 11–34. DOI: 10.1061/jsdeag.0001692
4. *Барштейн М.Ф.* Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. М. : Стройиздат, 1978. 216 с.
5. *Симиу Э., Сканлан Р.* Воздействие ветра на здания и сооружения / пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецово. М. : Стройиздат, 1984. 358 с.
6. *Den-Hartog J.P.* Transmission line vibration due to sleet // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. 1932. Vol. 51. Issue 4. Pp. 1074–1076. DOI: 10.1109/T-AIEE.1932.5056223
7. *Den-Hartog J.P.* Mechanical Vibrations. New York : Dover Publications, 1985. 436 p.
8. *Boggs D.W., Peterka J.A.* Aerodynamic model tests of tall buildings // *Journal of Engineering Mechanics*. 1989. Vol. 115. Pp. 618–635. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:3(618)
9. *Pozzuoli C., Bartoli G., Peil U., Clobes M.* Serviceability wind risk assessment of tall buildings including aeroelastic effects // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013. Vol. 123. Issue 8. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.09.014
10. *Dongmei H., Ledong Z., Quanshun D., Xue Z., Wei C.* Aeroelastic and aerodynamic interference effects on a high-rise building // *Journal of Fluids and Structures*. 2017. Vol. 69. Pp. 355–381.
11. *Wang L., Liang S., Huang G., Song J., Zou L.* Investigation on the instability of vortex induced resonance of high-rise buildings // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018. Vol. 175. Pp. 17–31. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.025
12. *Zheng C., Liu Z., Wu T., Wang H., Wu Y., Shi X.* Experimental investigation of vortex-induced vibration of a thousand-meter-scale mega-tall building // *Journal of Fluids and Structures*. 2019. Vol. 85. Pp. 94–109. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.12.005
13. *Wardlaw R.L., Moss G.F.* A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels. CAARC, C.C.662m Tech. 1970.
14. *Whitbread R.E.* The measurement of non-steady wind forces on small-scale building models // *Proceedings of the 4th international conference on wind effects on buildings and structures*. 1977. Pp. 567–574.
15. *Blackmore P.A.* A comparison of experimental methods for estimating dynamic response of buildings // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1985. Vol. 18. Pp. 197–212. DOI: 10.1016/0167-6105(85)90098-4
16. *Tanaka H., Lawen N.* Test on the CAARC standard tall building model with a length scale of 1:1000 // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1986. Vol. 25. Pp. 15–29. DOI: 10.1016/0167-6105(86)90102-9
17. *Goliger A.M., Milford R.V.* Sensitivity of the CAARC standard building model to geometric scale and turbulence // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1988. Vol. 31. Pp. 105–123. DOI: 10.1016/0167-6105(88)90190-0
18. *Thepmongkorn S., Wood G.S., Kwok K.C.S.* Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002. Vol. 90. Issue 12–15. Pp. 1807–1815. DOI: 10.1016/s0167-6105(02)00289-1
19. *Tang U.F., Kwok K.C.S.* Interference excitation mechanisms on a 3DOF aeroelastic CAARC building model // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004. Vol. 92. Issue 14. Pp. 1299–1314. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.08.004
20. *Balendra T., Anwar M.P., Tey K.L.* Direct measurement of wind-induced displacement in tall building models using laser positioning technique //

Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2005. Vol. 93. Issue 5. Pp. 399–412. DOI: 10.1016/j.jweia.2005.03.003

21. *Hanson T., Summers D.M., Wilson C.B.* A three-dimensional simulation of wind flow around buildings // International Journal for Numerical Methods in Fluids. 1986. Vol. 6. Issue 3. Pp. 113–127.

22. *Murakami S., Mochida A., Hibi K.* Three-dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1987. Vol. 25. Pp. 291–305. DOI: 10.1016/0167-6105(87)90023-7

23. *Murakami S.* Current status and future trends in computational wind engineering // Journal of wind engineering and industrial aerodynamics. 1997. Vol. 67. Pp. 3–34.

24. *Tominaga Y., Mochida A., Murakami S., Sawaki S.* Comparison of various revised k - ϵ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1:2 shape placed within the surface boundary layer // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2008. Vol. 96. Issue 4. Pp. 389–411. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.01.004

25. *Blocken B., Carmeliet J., Stathopoulos T.* CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings: effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2007. Vol. 95. Pp. 941–962. DOI: 10.1016/J.JWEIA.2007.01.013

26. *Montazeri H., Blocken B.* CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis // Building and Environment. 2013. Vol. 60. Pp. 137–149. DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2012.11.012

27. *Zheng X., Montazeri H., Blocken B.* CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES // Building and Environment. 2020. Vol. 173. Pp. 106747. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106747

28. *Mochida A., Murakami S., Shoji M., Ishida Y.* Numerical simulation of flowfield around Texas Tech building by large eddy simulation // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1993. Vol. 46–47. Pp. 455–460. DOI: 10.1016/0167-6105(93)90312-C

29. *He J., Song C.C.S.* A numerical study of wind flow around the TTU building and the roof corner vortex // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1997. Vol. 67–68. Pp. 547–558.

30. *Selvam R.P.* Finite element modelling of flow around a circular cylinder using LES // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1997. Vol. 67–68. Pp. 129–139.

31. *Senthooran S., Lee D.D., Parameswaran S.* A computational model to calculate the flow-induced pressure fluctuations on buildings // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2004. Vol. 92. Issue 13. Pp. 1131–1145. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.07.002

Поступила в редакцию 27 августа 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 сентября 2023 г.

Одобрена для публикации 13 сентября 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Михайлович Белостоцкий — доктор технических наук, профессор кафедры информатики и прикладной математики, научный руководитель научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова), академик РААСН; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; amb@stadyo.ru;

Ирина Юрьевна Негрозова — младший научный сотрудник научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; irina-lanzova@mail.ru;

Олег Сергеевич Горячевский — заместитель директора научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова); **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ);** 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; osgoryachevskij@mail.ru.

Вклад авторов:

Белостоцкий А.М. — научное руководство, концепция исследования, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Негрозова И.Ю. — сбор и обработка материала, написание статьи.

Горячевский О.С. — сбор и обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Holmes J.D. *Wind loading of structures*. Boca Raton, CRC press, 2018.
2. Davenport A.G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1961; 19(4):449-472. DOI: 10.1680/iicep.1961.11304
3. Davenport A.G. Gust loading factors. *Journal of the Structural Division*. 1967; 93(3):11-34. DOI: 10.1061/jsdeag.0001692.
4. Barshtein M.F. *Guidelines for the calculation of buildings and structures for the action of the wind*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978; 216. (rus.)
5. Simiu E., Scanlan R.H. *Wind effects on structures: an introduction to wind engineering*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984; 358. (rus.)
6. Den-Hartog J.P. Transmission line vibration due to sleet. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. 1932; 51(4):1074-1076. DOI: 10.1109/T-AIEE.1932.5056223
7. Den-Hartog J.P. *Mechanical Vibrations*. New York, Dover Publications, 1985; 436.
8. Boggs D.W., Peterka J.A. Aerodynamic model tests of tall buildings. *Journal of Engineering Mechanics*. 1989; 115:618-635. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:3(618)
9. Pozzuoli C., Bartoli G., Peil U., Clobes M. Serviceability wind risk assessment of tall buildings including aeroelastic effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013; 123(8). DOI: 10.1016/j.jweia.2013.09.014
10. Dongmei H., Ledong Z., Quanshun D., Xue Z., Wei C. Aeroelastic and aerodynamic interference effects on a high-rise building. *Journal of Fluids and Structures*. 2017; 69:355-381.
11. Wang L., Liang S., Huang G., Song J., Zou L. Investigation on the instability of vortex induced resonance of high-rise buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2018; 175:17-31. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.01.025
12. Zheng C., Liu Z., Wu T., Wang H., Wu Y., Shi X. Experimental investigation of vortex-induced vibration of a thousand-meter-scale mega-tall building. *Journal of Fluids and Structures*. 2019; 85:94-109. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.12.005
13. Wardlaw R.L., Moss G.F. *A standard tall building model for the comparison of simulated natural winds in wind tunnels*. CAARC, C.C.662m Tech. 1970.
14. Whitbread R.E. The measurement of non-steady wind forces on small-scale building models. *Proceedings of the 4th international conference on wind effects on buildings and structures*. 1977; 567-574.
15. Blackmore P.A. A comparison of experimental methods for estimating dynamic response of buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1985; 18:197-212. DOI: 10.1016/0167-6105(85)90098-4
16. Tanaka H., Lawen N. Test on the CAARC standard tall building model with a length scale of 1:1000. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1986; 25:15-29. DOI: 10.1016/0167-6105(86)90102-9
17. Goliger A.M., Milford R.V. Sensitivity of the CAARC standard building model to geometric scale and turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1988; 31:105-123. DOI: 10.1016/0167-6105(88)90190-0
18. Thepmongkorn S., Wood G.S., Kwok K.C.S. Interference effects on wind-induced coupled motion of a tall building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002; 90(12-15):1807-1815. DOI: 10.1016/s0167-6105(02)00289-1
19. Tang U.F., Kwok K.C.S. Interference excitation mechanisms on a 3DOF aeroelastic CAARC building model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004; 92(14):1299-1314. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.08.004
20. Balendra T., Anwar M.P., Tey K.L. Direct measurement of wind-induced displacement in tall building models using laser positioning technique. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2005; 93(5):399-412. DOI: 10.1016/j.jweia.2005.03.003
21. Hanson T., Summers D.M., Wilson C.B. A three-dimensional simulation of wind flow around buildings. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 1986; 6(3):113-127.
22. Murakami S., Mochida A., Hibi K. Three-dimensional numerical simulation of air flow around a cubic model by means of large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1987; 25:291-305. DOI: 10.1016/0167-6105(87)90023-7
23. Murakami S. Current status and future trends in computational wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997; 67:3-34.
24. Tominaga Y., Mochida A., Murakami S., Sawaki S. Comparison of various revised $k-\epsilon$ models and LES applied to flow around a high-rise building model with 1:1.2 shape placed within the surface boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008; 96(4):389-411. DOI: 10.1016/j.jweia.2008.01.004
25. Blocken B., Carmeliet J., Stathopoulos T. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings: effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2007; 95:941-962. DOI: 10.1016/J.JWEIA.2007.01.013.
26. Montazeri H., Blocken B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis.

sis. *Building and Environment*. 2013; 60:137-149. DOI: 10.1016/J.BUILDENV.2012.11.012

27. Zheng X., Montazeri H., Blocken B. CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies: Comparison of RANS and LES. *Building and Environment*. 2020; 173:106747. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106747

28. Mochida A., Murakami S., Shoji M., Ishida Y. Numerical simulation of flowfield around Texas Tech building by large eddy simulation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1993; 6-47:455-460. DOI: 10.1016/0167-6105(93)90312-C

29. He J., Song C.C.S. A numerical study of wind flow around the TTU building and the roof corner vortex. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997; 67-68:547-558.

30. Selvam R.P. Finite element modelling of flow around a circular cylinder using LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1997; 67-68:129-139.

31. Senthoooran S., Lee D.D., Parameswaran S. A computational model to calculate the flow-induced pressure fluctuations on buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004; 92(13):1131-1145. DOI: 10.1016/j.jweia.2004.07.002

Received August 27, 2023.

Adopted in revised form on September 11, 2023.

Approved for publication on September 13, 2023.

B I O N O T E S: **Alexander M. Belostotsky** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, Scientific Director of the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova, Academic of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; amb@stadyo.ru;

Irina Yu. Negrozova — Junior Researcher of the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; irina-lanzova@mail.ru;

Oleg S. Goryachevsky — Deputy Director of the Scientific and Educational Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes named after A.B. Zolotova; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; osgoryachevskij@mail.ru.

Contribution of the authors:

Alexander M. Belostotsky — scientific guidance, research concept, scientific editing of the text; final conclusions.

Irina Yu. Negrozova — materials gathering, materials analyzing, text preparation.

Oleg S. Goryachevsky — materials gathering, materials analyzing, text preparation.

The authors declare no conflict of interest.