

УДК 533.6.07; 533.68; 532.527

*А. Б. Айрапетов¹, В. В. Вышинский^{2,3}, А. В. Катунин^{1,2}*¹Научно-исследовательский Московский комплекс Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н. Е. Жуковского²Московский физико-технический институт (государственный университет)³Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского

Расчётные и экспериментальные исследования обтекания высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки

Приведена методика проведения экспериментальных исследований обтекания моделей высотных зданий в условиях окружающей застройки в аэродинамической трубе Т-1-2 ЦАГИ в условиях приземного ветрового профиля и в равномерном потоке в рамках требований нормативной базы.

Ключевые слова: методика эксперимента в аэродинамических трубах, моделирование обтекания зданий и сооружений, приземный ветровой слой, вычислительная аэродинамика.

*A. V. Airapetov¹, V. V. Vyshinsky^{2,3}, A. V. Katunin^{1,2}*¹Scientific Research Complex of N. E. Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute²Moscow Institute of Physics and Technology (State University)³N. E. Zhukovsky Central Aerohydrodynamic Institute

Numerical and experimental research of high-rise buildings and structures aerodynamics in the presence of environmental building

The methodology of TsAGI's T-1-2 wind tunnel testing of the high-rise building models aerodynamics in presence of environmental building in case of near ground wind profile and uniform stream within the requirements of the regulatory framework is given.

Key words: wind-tunnel experiment methodology, simulation of buildings and structures aerodynamics, ground wind layer, computational fluid dynamics.

1. Введение

Проектирование и строительство в современных высотных (выше 75 м) зданий, имеющих с аэродинамической точки зрения уникальные архитектурные формы (в том числе многокорпусность), регламентируется нормами [1]. В части ветровых нагрузок и воздействий нормы предписывают получение в модельном аэродинамическом эксперименте в специализированных аэродинамических трубах (АДТ):

- статических интегральных нагрузок на здание;
- распределенных средних и мгновенных (пиковых) нагрузок на поверхности здания (вентилируемые фасадные системы);
- характеристик аэроупругих колебаний здания в случае, если отношение высоты здания к характерному поперечному размеру $h/D > 7$.

Требование экспериментального определения перечисленных характеристик диктуется невозможностью их получения расчетным путем с точностью и достоверностью, достаточной для безопасного жилого строительства.

Специализированные АДТ должны обеспечить возможность реализации в них режима потока типа приземного ветрового слоя (ПВС) с определенным профилем средней скорости по высоте. При этом размеры рабочей части АДТ должен обеспечивать размер моделей, достаточный для реализации «автомодельного» режима обтекания, т.е. независимость аэродинамических характеристик от числа Рейнольдса: $Re = \frac{V_\infty D}{\nu}$, где V_∞ — скорость потока, где D — характерный поперечный размер модели, ν — коэффициент кинематической вязкости.

Именно реализация автомодельного режима позволяет получать в модельном эксперименте натурные значения аэродинамических коэффициентов без пересчета «на натуру». Нижняя граница значения числа Re по опыту исследования обтекания плохообтекаемых объектов [2] составляет порядка $2 \cdot 10^5$. Это исключает возможность применения «комнатных» АДТ с характерным размером моделей в несколько сантиметров.

В настоящей работе показана основанная на интенсивных предварительных расчётах средствами вычислительной аэродинамики технология экспериментального определения аэродинамических характеристик высотных зданий и сооружений в условиях городской застройки (рельефа местности) [3].

2. Математическая модель: объект и система расчёта

В качестве объекта исследования рассмотрено проектируемое для строительства в Москве высотное здание (рис. 1).



Рис. 1. Проектируемое высотное здание

Математическое моделирование предоставляет возможность предварительного анализа характера и структуры обтекания здания ветровым потоком, а также рационального определения масштаба модели для АДТ, степени влияния окружающей застройки (городского ландшафта) на исследуемый объект и величины наиболее критичных углов направления ветра. Более подробное описание данной методики может быть найдено в работе [3].

В соответствии с методикой проведена серия расчётов в рамках краевой задачи для стационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с SST-моделью замыкания, описывающих течение вязкой несжимаемой жидкости. Набегающий поток имеет заданный профиль скорости приземного ветра. Для проведения расчетов построена блочная структурированная сетка с призматическим подслоем на поверхности земли, состоящим из 20 ячеек, имеющих высоту первой ячейки 0.01 м и коэффициент роста ячеек 1.2. Общий объем сетки составляет 5 млн ячеек, притом около половины приходится на призматиче-

ческий подслон. Технология проведения расчётных исследований изложена в [4], пример моделирования атмосферного течения над горным ландшафтом приведен в работе [5].

При решении задачи все переменные приведены к безразмерному виду. Расчет проводился до выхода величин интегральных осредненных нагрузок на стационарные значения. За характерные линейный размер и скорость приняты $D = 27$ м, $V_\infty = 20$ м/с, так что $Re = 2 \cdot 10^5$. При таких значениях течение автомодельно по числам Рейнольдса.

На рис. 2 приведён общий вид высотного комплекса и окружающей застройки, а на рис. 3 приведены пять направлений ветра, для которых проводился подробный сравнительный анализ.

В табл. 1 представлены сравнительные значения коэффициентов сопротивления C_x и боковой силы C_y для здания при наличии полной окружающей застройки и для здания с сокращённым вариантом застройки, когда сохраняется только ближайшее здание, $C_{x\text{ упр}}$ и $C_{y\text{ упр}}$.

Из сравнения видно, что отброшенная часть окружающей застройки не вносит существенного искажения в интегральные аэродинамические характеристики проектируемого высотного здания, в связи с чем в состав модели в масштабе 1:130 было включено ближайшее здание, изображённое на проектном эскизе (рис. 1). Максимальное загромождение рабочей части при этом составило 9,5%.

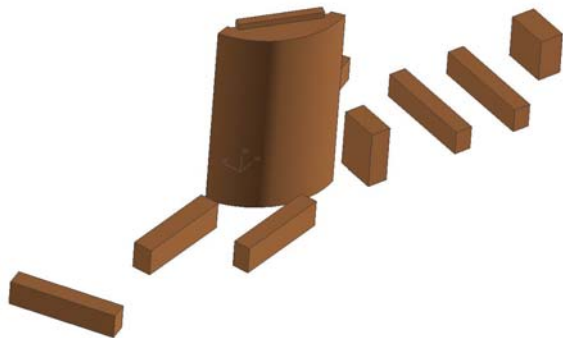


Рис. 2. Заложенная в расчёт геометрия высотного здания и окружающей застройки

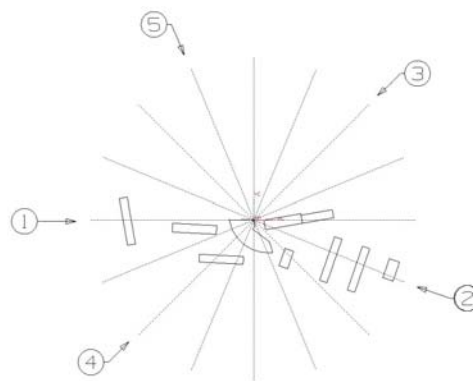


Рис. 3. Направления ветра, при которых получены эпюры

Т а б л и ц а 1

Сравнение интегральных характеристик

Направление	1	2	3	4	5
C_x	0,50	0,24	1,14	1,01	0,45
C_y	0,28	0,69	0,10	0,08	-0,94
$C_{x\text{ упр}}$	0,50	,260	1,18	1,07	0,49
$C_{y\text{ упр}}$	0,22	1,02	0,13	0,09	-0,77

3. Модели и методика эксперимента

Модели комплекса зданий для испытаний в АДТ Т-1-2 ЦАГИ представляют собой исследуемое и ближайшее к нему здания застройки в масштабе 1:130 для измерения средних статических сил и моментов на прецизионных рычажно-рейтерных весах АВТ-1 (рис. 4, 5) и распределенных нагрузок на поверхность здания – средних и пульсационных характеристик давления.

Система организации ПВС в АДТ Т-1-2 с двумя рабочими частями Т1 и Т2 ЦАГИ является уникальной, поскольку не содержит традиционной системы неравномерного загромождения поперечного сечения трубы (пирамиды, сетки и т.д.) для создания верти-

кального градиентного профиля средней скорости. Последний образуется в рабочей части АДТ-2 при работе трубы в полной конфигурации Т1/Т2 в диффузорном течении между рабочими частями Т1 и Т2 с системой «макрошероховатостей» на длине 50–60 м. Типичные профили средней скорости и интенсивности турбулентности по высоте приведены на рис. 6.



Рис. 4. Заложенная в расчёт геометрия высотного здания и окружающей застройки

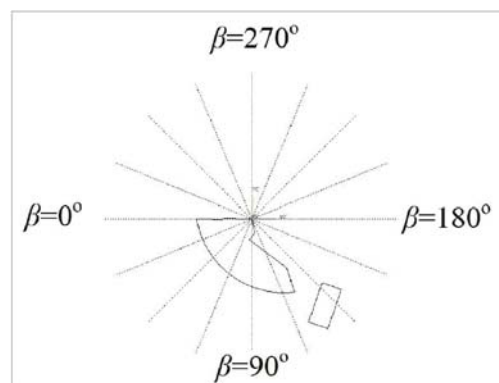
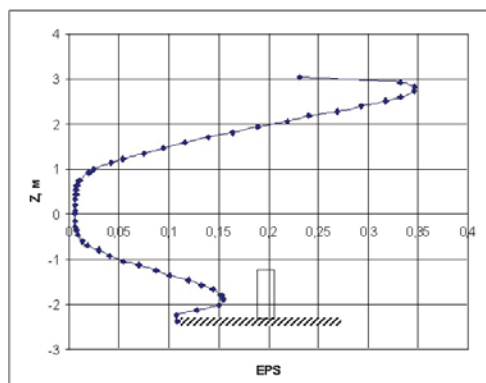
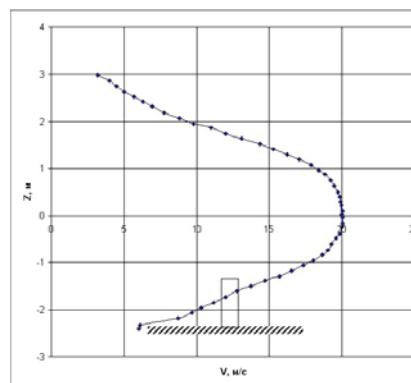


Рис. 5. Направления ветра, при которых получены эпюры



а)



б)

Рис. 6. Типичные профили средней скорости и интенсивности турбулентности по высоте

Средние аэродинамические нагрузки – лобовое сопротивление X , боковая сила Y и крутящий момент M_z – определялись на автоматических рычажно-рейтерных весах АВТ-1 со струнной подвеской модели. На подвеске крепилась «взвешиваемая» модель, не имеющая механической связи с моделью здания застройки, расположенной на круговом экране. При повороте модели на поворотном устройстве весов на очередной угол β на этот же угол поворачивался экран с моделью здания застройки, формирующей, таким образом, точное моделирование течения при любом угле ветра.

Аэродинамические коэффициенты соответствующих сил и момента определялись соотношениями

$$C_x = \frac{X}{qS}, \quad C_y = \frac{Y}{qS}, \quad m_z = \frac{M_z}{qSb}, \quad q = \frac{\rho V_\infty^2}{2},$$

где V_∞ – скорость на верхней границе ПВС или на входе в рабочую часть АДТ, $S = bH$ – характерная площадь модели; b – характерный поперечный размер (ширина по острым углам здания); H – высота модели. Для комплекса моделей масштаба 1:130: $H = 0,97$ м, $b = 0,62$ м, $S = 0,6$ м². Определение нагрузок на натурный объект осуществляется по полученным натурным значениям коэффициентов путем «обращения» вышеприведенных формул: $X = C_x qS$, $Y = C_y qS$, $M_z = m_x qS$. Эпюра нагрузок в сечениях по высоте, например, X получается с использованием коэффициента и значения скорости на данной

высоте h :

$$X(h) = C_x S \frac{\rho(V(H))^2}{2}.$$

На рис. 7 показана зависимость коэффициента лобового сопротивления C_x здания от скорости V_∞ для углов ветра $\beta = 225^\circ$ (верхняя кривая) и 315° (нижняя кривая). Начиная со скорости 10 м/с, величина остаётся неизменной, т.е. режим автомодельности имеет место при $V_\infty > 10$ м/с. На основании чего выбрана рабочая скорость потока $V_\infty = 20$ м/с.

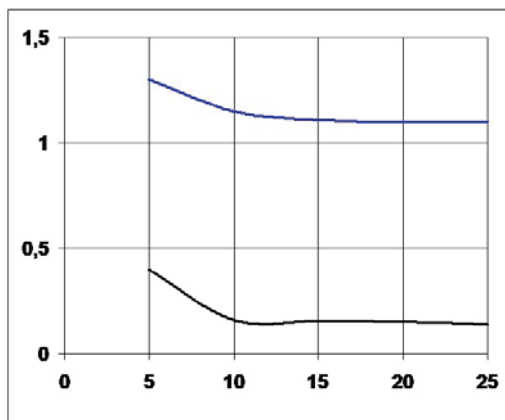


Рис. 7. Зависимость $C_x(V_\infty)$

Модель здания оборудована на четырех уровнях, соответствующих натурным высотам 25, 55, 90, 125 м, датчиками давления для измерения средних и мгновенных значений давления, Измерение давления производилось при тех же углах β , что и весовой эксперимент. Использовались внутримодельные дифференциальные датчики полного давления фирмы FREESCALE MPXV 5004D (максимальное давление 4 кПа), сигналы которых через аналогово-цифровой преобразователь фирмы National Instruments NI USB-6009 передавались на компьютерную обработку с выдачей данных в темпе эксперимента.

4. Результаты испытаний

Результаты измерений аэродинамических коэффициентов сопротивления C_x , боковой силы C_y и крутящего момента m_z для здания в зависимости от угла β приведены на рис. 8–10. На рис. 11 приведен фактор неустойчивости галопирования Ден-Гартога $D = C_x + C_y^\beta$.

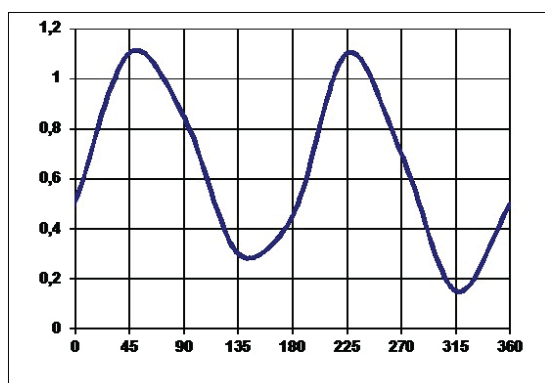


Рис. 8. Зависимость $C_x(\beta)$

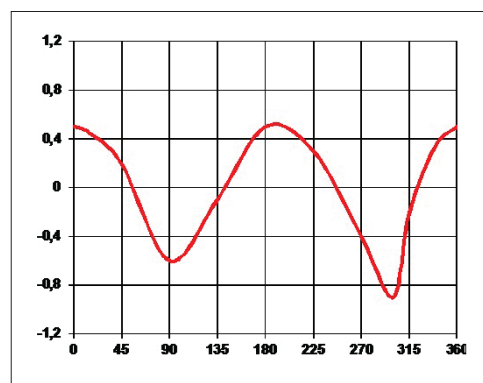


Рис. 9. Зависимость $C_y(\beta)$

Анализ результатов экспериментов позволяет выявить следующие характерные особенности аэродинамического нагружения:

— обтекание здания по характеру качественно близко к крылу самолёта низкого аэродинамического качества с заостренными передней и задней кромками, в связи с чем наличие

большой боковой (нормальной направлению ветра) силы $C_y \sim 1$ является естественным, так же как и очень большие величины локального разрежения ($C_p \approx -3,5$) на небольших участках фасадных поверхностей и острых кромок;

— максимумы боковой силы по β приходятся на минимумы силы сопротивления C_x , в результате чего максимальная результирующая аэродинамическая сила $C_r = (C_x^2 + C_y^2)^{1/2}$ не превосходит значения 1,15. На это значение целесообразно ориентироваться при оценке нагрузок по требованиям СНиП;

— влияние здания застройки отчетливо видно из сравнения наветренного ($\beta \approx 90^\circ$) и подветренного ($\beta \approx 270^\circ$) направлений: здание заметно «затеняет» проявление боковой силы;

— фактор неустойчивости галопирования Ден-Гартога $D = C_x + C_y^\beta$ для здания положителен во всей области изменения β , за исключением сектора углов ветра β около 45° и 270° , где величина $D \approx 1$. Это означает, что в указанном диапазоне углов ветра существуют необходимые (но недостаточные) условия аэродинамической неустойчивости галопирования. Анализ этой ситуации с использованием специального динамического колебательного стенда не входил в поставленную задачу в связи с тем, что удлинение здания менее 7 [1].

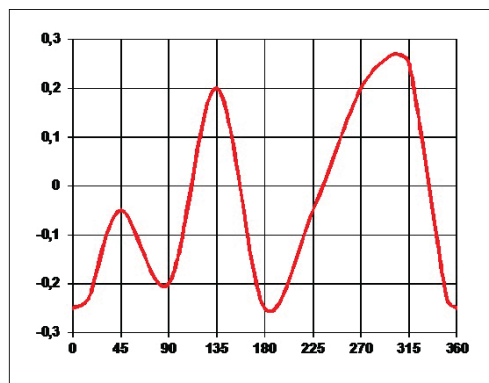


Рис. 10. Зависимость $m_z(\beta)$

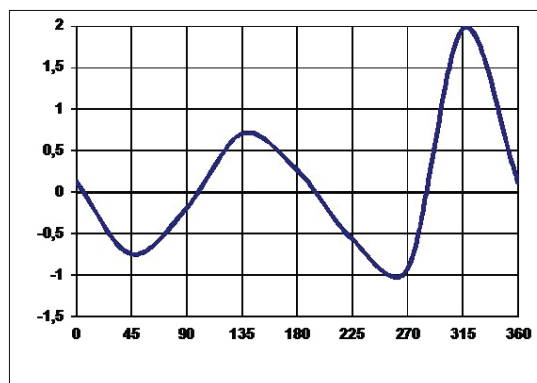


Рис. 11. Зависимость $D(\beta)$

При обработке сигнала мгновенного давления $p(t)$ получены коэффициенты статического давления \bar{P} , $c_p = (\bar{p} - p_\infty)/q$; среднеквадратичные пульсации давления $\overline{p'^2} = \overline{(p - \bar{p})^2}$; пиковые значения реализации p_{\max} и p_{\min} . Среди общих закономерностей распределенного нагружения следует отметить:

- наличие зон торможения потока на нормальных потоку участках поверхности зданий с характерными величинами коэффициента давления $C_p \sim 1$;
- наличие обширных застойных зон с характерными $C_p \approx -0,5$;
- наличие небольших (3–5% длин сторон сечения) локальных зон ускоренного течения около острых углов здания с характерными значениями $C_p \sim -3,5$;
- практическую неизменность коэффициента среднего давления C_p по высоте здания;
- умеренную интенсификацию пульсационной картины течения по высоте здания от нулевого уровня до крыши;

— практическое отсутствие влияния ПВС на характеристики давления на рассмотренных высотах $h = 55$ м и $h = 90$ м, обнаруженное при сравнительных испытаниях с ПВС и в равномерном потоке. На уровне, соответствующем натурной высоте 25 м, отличия достигают 15% в меньшую сторону в присутствии ПВС.

Сложная архитектурная форма здания приводит к зрительно сложной и далекой от практической необходимости информации по распределению давления для значений углов ветра из всего кругового диапазона от 0° до 360° . Эпюры давления показывают, что при рассмотрении массива данных для множества углов ветра в круговом диапазоне в каждой точке поверхности с очевидностью можно обнаружить с высокой вероятностью любое значение C_p от $C_{p \max}$ до $C_{p \min}$.

Поскольку в эксперименте непосредственно получены значения интегральных нагрузок, необходимость в использовании для их оценки процедуры интегрирования по поверхности зданий распределений давления отсутствует. Таким образом, использование характеристик распределений давления представляется необходимым только для анализа локального нагружения элементов фасадных систем.

В связи с однородностью структуры фасадных систем на поверхности здания и отсутствием нормативных требований по оценке нагрузок на отдельных выделенных элементах фасадной системы задача по локализации экстремальных локальных нагрузок не рассматривалась.

В качестве практических показателей для проектирования фасадных систем могут быть назначены предельные – максимальные и минимальные – значения указанных характеристик распределения давления по множеству всех внешних параметров испытаний – углам и точкам на поверхности зданий, которые приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Сравнение интегральных характеристик

	$C_p \text{ max}$	$C_p \text{ min}$	$\sqrt{p_{\text{max}}^2}/q$	$\frac{p_{\text{max}} - p_{\infty}}{q}$	$\frac{p_{\text{min}} - p_{\infty}}{q}$
Основные участки поверхности здания	1,0	-0,6	0,09	1,15	-0,85
Области острых углов	—	-3,5	0,22	—	-0,7

5. Заключение

- 1) Аэродинамические коэффициенты сил и моментов, характеристики среднего и пульсационного давления, полученные в работе, соответствуют натурным и могут быть использованы при проектных расчетах зданий на ветровые нагрузки.
- 2) При учёте ветрового нагружения по СНиП 2.01.07-85 нормативные значения средней составляющей ветровой нагрузки по высоте здания в терминах СНиП 2.01.07-85 определяются по формуле главы 6 с использованием аэродинамического коэффициента C (максимальное значение C_r для исследуемого объекта) для здания $s = 1,15$. Т.е. нормативное значение средней составляющей интегральной ветровой нагрузки w_m определяется как $w_m = 1,15 w_0 k$, где w_0 – нормативное значение ветрового давления; k – коэффициент, берущийся из таблицы 6.2 СНиП 2.01.07-85.
- 3) Уровень средних нагрузок разрежения в небольших областях, примыкающих к острым углам здания, существенно превосходит средний уровень на остальной поверхности, что целесообразно учесть при расчете элементов фасадной системы в непосредственной близости от углов зданий.

Литература

1. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07-85. М., 2003.
2. Айрапетов А.Б. Методические принципы моделирования аэродинамики высотных зданий в аэродинамических трубах. Современное высотное строительство. М., 2007. С. 292–294.
3. Айрапетов А.Б. Новые аспекты аэродинамики ветрового нагружения высотных зданий в мегаполисе, новые подходы и методические принципы исследований // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 582–584.
4. Вышинский В.В., Судаков Г.Г. Применение численных методов в задачах аэродинамического проектирования. М.: ЦАГИ, 2007.

5. *Вышинский В.В., Кудров М.А.* Моделирование атмосферных течений над горным рельефом // Труды МФТИ. 2015. Т. 7, № 3. С. 11–17.

References

1. Building regulations. Loads and impacts. BR 2.01.07-85. М., 2003.
2. *Airapetov A.B.* Methodical principles of high-rise buildings aerodynamics simulation in the wind tunnel. Modern high-rise building. М., 2007. P. 292–294.
3. *Airapetov A.B.* New aspects of wind loaded aerodynamics of high-rise buildings in metropolis, new approaches and methodical investigation principals. Academia. 2010, № 3. P 582–584.
4. *Vyshinsky V.V., Sudakov G.G.* Application of computational methods in aerodynamic design problems. М.:TsAGI 2007.
5. *Vyshinsky V.V., Kudrov M.A* Simulation of atmospheric flows over mountain relief. Proceedings of MIPT. 2015. V. 7, N 3. P 11–17.

Поступила в редакцию 09.03.2017