

05.23.19 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Расчет аэродинамических характеристик смежных зданий

УДК 628.511:512.053(075.4)

Самсонов В.Т.

Канд. техн. наук, доцент, независимый исследователь (г. Москва); e-mail: vt-sam@bk.ru

Статья получена: 07.02.2020. Рассмотрена: 09.02.2020. Одобрена: 23.03.2020. Опубликовано онлайн: 30.03.2020. ©РИОР

Аннотация. При решении ряда инженерных задач, таких как выбор мест взаимного размещения выбросных и воздухоприемных сооружений с учетом требований санитарных норм, проектирование систем естественной вытяжной вентиляции, расчеты воздушных потоков внутри здания, расчеты инфильтрации, факельных выбросов, воздушных завес и др., необходимо иметь сведения об аэродинамических характеристиках промышленных зданий и их комплексов на промышленной площадке. В настоящее время аэродинамические характеристики зданий определяют преимущественно методами физического и математического моделирования. Но физическое моделирование является тру-

доемким, продолжительным и сравнительно дорогим методом исследований, а для проведения массовых нестационарных трехмерных расчетов с помощью *CFD*-пакетов требуются дорогостоящие высокопроизводительные многопроцессорные системы. В связи с этим стала актуальной проблема создания методики расчетного определения аэродинамических характеристик зданий, предназначенной для инженеров строительных и архитектурных специальностей.

В статье приведен комплекс зависимостей и рекомендаций, позволяющих рассчитывать размеры и границы циркуляционных зон, аэродинамические коэффициенты и профили ско-

CALCULATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF ADJACENT BUILDINGS

Vladimir Samsonov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Independent Researcher, Moscow; e-mail: vt-sam@bk.ru

Manuscript received: 07.02.2020. **Revised:** 09.02.2020. **Accepted:** 23.03.2020. **Published online:** 30.03.2020. ©RIOR

Abstract. When solving several engineering problems such as the choice of locations relative placement of exhaust and air intake structures subject to the requirements of sanitary norms, design of systems for natural ventilation calculations of air flow inside the building, calculations of infiltration, flare emissions, air curtains, etc., it is necessary to have information about the aerodynamic characteristics of the industrial buildings and their complexes in the industrial area. Currently, the aerodynamic characteristics of buildings are determined mainly by methods of physical and mathematical modeling. However, physical modeling is a labor-intensive, long-term and relatively expensive method of research, and for conducting mass non-stationary three-dimensional calculations using *CFD* packages, expensive high-performance multiprocessor systems are required. In this regard, the problem of creating a method for calculating the aerodynamic

characteristics of buildings, intended for engineers of construction and architectural specialties, has become urgent.

The article presents a set of dependencies and recommendations that allow calculating the size and boundaries of circulation zones, aerodynamic coefficients and speed profiles for single and group locations of buildings. The main computational dependencies were developed as a result of analysis and processing of numerous experimental data provided in domestic and foreign publications on the aerodynamics of various objects, and their own results of research of building models in a wind tunnel. The calculated dependencies take into account the influence of all operating parameters, including the relative displacement height of the wind boundary layer.

Calculations performed on the mentioned dependencies are given, and comparison with the results of experiments by foreign and domestic authors is performed.

Application of the method in project practice instead of expensive, time-consuming and low-cost experimental methods will improve the quality and reduce the cost of projects.

Keywords: building aerodynamics, adjacent buildings, circulation zone, aerodynamic coefficient, boundary layer, boundary layer displacement thickness, calculation method.

рости ветра при одиночном и групповом расположении зданий. Основные расчетные зависимости разработаны в результате анализа и обработки многочисленных экспериментальных данных, приведенных в отечественных и зарубежных публикациях по аэродинамике различных объектов, и собственных результатов исследований моделей зданий в аэродинамической трубе. В расчетных зависимостях учтено влияние всех действующих параметров, в том числе относительной толщины вытеснения пограничного слоя ветра.

Даны расчеты, выполненные по упомянутым зависимостям, выполнено сопоставление расчетов с результатами экспериментов зарубежных и отечественных авторов.

Применение методики в проектной практике вместо дорогостоящих, трудоемких и малодоступных экспериментальных методов позволит повысить качество и снизить стоимость проектов.

Ключевые слова: аэродинамика зданий, смежные здания, циркуляционная зона, аэродинамический коэффициент, пограничный слой, толщина вытеснения пограничного слоя, расчетная методика.

Введение. При проектировании различных вентиляционных процессов и устройств необходимо иметь сведения об аэродинамических характеристиках промышленных зданий и их комплексов на промышленных площадках. Эти сведения необходимы, например, при расчетах распределения концентраций вентиляционных выбросов в окрестностях проектируемых зданий, при выборе мест взаимного размещения выбросных и воздухозаборных сооружений, при проектировании систем естественной вытяжной вентиляции, расчетах воздушных потоков внутри здания, инфильтрации, факельных выбросов, воздушных завес и др.

К основным аэродинамическим характеристикам зданий относятся размеры и границы циркуляционных (отрывных) течений, распределение аэродинамических коэффициентов на поверхностях ограждающих конструкций, характеристики (скорость и турбулентность) ветра, изменяющиеся в широких пределах.

Аэродинамические характеристики зданий исследовали многие ведущие специалисты в

области аэродинамики в нашей стране и за рубежом. Существенный вклад внесли Ирмингер (1895), К. Стэнтон (1903), П. Констанци (1912), Н.А. Рынин (1913), Эйфель (1914), Драйден (1925), К.А. Бункин и А.М. Черемухин (1928), Олссон (1934) и др. Более глубокому изучению разных проблем аэродинамики зданий посвящены работы В.В. Батурина и И.А. Шепелева (1938), Н.М. Томпсона (1947), Э.И. Реттера (1936, 1959, 1963, 1968, 1984), Ф.Л. Серебровского (1971), М. Горлина (1970, 1971) и др. В работах этих и других авторов основное внимание уделялось изучению давления ветра на поверхности стен и крыш моделей зданий (преимущественно отдельно стоящих) в аэродинамических трубах, реже — в объемных гидравлических лотках. Определению размеров и границ циркуляционных (отрывных) течений вокруг зданий уделялось существенно меньше внимания. В некоторых работах полученные результаты сопоставлялись с результатами исследования натуральных сооружений.

При обработке экспериментальных данных и создании методик расчета в ряде работ использовались комплексные параметры, составленные из габаритных размеров моделей зданий. Например, Э.И. Реттер [1] предложил комплексный параметр, равный $\sqrt{H \cdot L}$, где H — высота, L — длина наветренной стены здания. В справочниках *ASHRAE* [2] содержится раздел, посвященный определению аэродинамических характеристик зданий. Характеристики воздушных течений здесь поставлены в зависимость от параметра R , равного $R = L_s^{2/3} L_r^{1/3}$ (здесь L_s — наименьший размер наветренной стены здания (длина или высота), L_r — соответственно наибольший размер). Однако эти комплексные параметры не являются критериями подобия и не могут служить в качестве универсальных параметров. В обоих случаях рассматриваются только отдельно стоящие здания. Кроме того, рекомендуемые в этих работах зависимости для расчета аэродинамических характеристик зданий не учитывают влияния ряда факторов, и могут быть применены только в условиях, в которых получены экспериментальные данные.

В некоторых публикациях отмечается влияние на аэродинамические характеристики моделей зданий толщины пограничного слоя

ветра. Например, автор работы [3] на основании экспериментальных исследований моделей зданий башенного типа установил существенное влияние на аэродинамические коэффициенты относительной толщины пограничного слоя ветра. Этот автор установил также, что величина коэффициентов давления не зависит от высоты модели здания. В работе [4] авторы пришли к выводу о влиянии на размеры циркуляционных зон «глубины погружения препятствия в пограничный слой».

Но толщина пограничного слоя определяется по скостному профилю ветра несколько произвольно, поскольку переход скорости пограничного слоя в скорость внешнего течения происходит асимптотически. По мнению проф. Л.Г. Лойцянского [5], в настоящее время избегают пользоваться приближенным понятием «толщина пограничного слоя» и вводят для характеристики толщины слоя интегральные определения: толщину вытеснения, толщину потери импульса.

В статье [6] (1934) определены аэродинамические коэффициенты модели отдельно стоящего здания при трех разных толщинах пограничного слоя воздушного потока. Автор вычислил значения толщины вытеснения и показал влияние этой величины на давление в точках измерений.

Похожие эксперименты выполнил Дженсен [7], дополнив их исследованием специально построенного натурального образца здания высотой 1,6 м. Толщину пограничного слоя ветра в аэродинамической трубе он изменял, меняя шероховатость подстилающей поверхности (толщина вытеснения не вычислялась). В качестве расчетного параметра Дженсен использовал отношение высоты модели к высоте выступа шероховатости z_0 . В некоторых западно-европейских странах этот параметр был назван числом Дженсена $Je = H/z_0$ и применяется в практике моделирования в качестве критерия подобия [8].

Но выступ шероховатости — величина условная, не имеющая физического смысла. Для каждого типа подстилающей поверхности устанавливается некоторый диапазон значений выступа шероховатости z_0 , например, для песка — (0,001÷0,1) см, для высокой травы — (4÷10) см и т.п.

По определению, критерий подобия есть совокупность параметрических, т.е. заданных по условию задачи, значений величин, особым образом сгруппированных в виде комплексов (или отношений). В соответствии с этим определением параметр Je нельзя считать критерием подобия.

Э.И. Реттер в работах [1; 9] привел график, показывающий влияние толщины вытеснения пограничного слоя ветра на величину аэродинамических коэффициентов. Тем не менее ни в одной из своих работ он не указал, при каких значениях толщины вытеснения проводились экспериментальные исследования моделей зданий. Не приводятся такие данные в многочисленных современных публикациях, вследствие чего невозможно выполнить сопоставление и обобщение результатов экспериментов и, главное, невозможно перенести эти результаты на натурные объекты.

В статье [10] (1976) при проведении экспериментов и обработке результатов в качестве одного из параметров использована относительная толщина вытеснения δ/H (— характерный размер препятствия). Толщина вытеснения пограничного слоя δ вычисляется по экспериментальному профилю ветра как отношение площади под кривой к скорости невозмущенного потока. Эта интегральная величина чувствительна ко всем изменениям, появляющимся в пограничном слое под влиянием различных препятствий и неровностей подстилающей поверхности, и наилучшим образом характеризует изменения аэродинамических характеристик зданий. В упомянутой статье сделан важный вывод о необходимости соблюдения относительной толщины вытеснения при осуществлении прямого моделирования в аэродинамических трубах.

В настоящее время активно развивается численное моделирование аэродинамики зданий. Однако проведение исследований методом численного моделирования на современном этапе его развития может лишь сопровождать эксперимент в аэродинамических трубах, поскольку принимаемая расчетная модель в каждом конкретном случае нуждается в верификации с экспериментальными данными.

В связи с тем, что физическое моделирование является трудоемким, продолжительным и срав-

нительно дорогим методом исследований, а для проведения массовых нестационарных трехмерных расчетов с помощью *CFD*-пакетов (пакетов вычислительной гидродинамики) требуются дорогостоящие высокопроизводительные многопроцессорные системы кластерного уровня [11], стала актуальной проблема создания методики расчетного определения аэродинамических характеристик зданий, предназначенной для инженеров строительных и архитектурных специальностей.



Рис. 1. В аэродинамической трубе ВЦНИИОТ ведущие специалисты, внесшие большой вклад в развитие вентиляционной науки: слева — д-р техн. наук профессор Владимир Васильевич Батулин, справа — канд. техн. наук Викторин Владимирович Кучерук

Такая методика предложена автором этой статьи. Основные положения методики разработаны в результате анализа и обработки многочисленных экспериментальных данных, приведенных в отечественных и зарубежных публикациях по аэродинамике различных объектов, и собственных результатов исследований [12]. Эксперименты выполняли в аэродинамической трубе ВЦНИИОТ ВЦСПС (рис. 1). В методике учтено влияние всех действующих параметров, в том числе относительной толщины вытеснения пограничного слоя ветра.

Расчетная методика. Отрыв потока ветра происходит от всех кромок, образуемых ограждающими конструкциями зданий и всеми выступающими и западающими конструктивными элементами, поэтому большая часть здания (а иногда все здание) погружена в циркуляционные зоны. Циркуляционная зона (в других работах эту зону называют рециркуляционной, отрывной, аэродинамической тенью и др.) представляет собой условно ограниченное простран-

ство, примыкающее к ограждающим поверхностям зданий (любых плохообтекаемых препятствий), в котором наблюдается сложное возвратно-поступательное (циркулирующее) движение воздушных масс, вызванное отрывом пограничного слоя ветра.

В зависимости от формы здания и его ориентации относительно ветра могут возникнуть несколько разновидностей отрывных течений. На рис. 2 показаны основные типы отдельно стоящих зданий простой формы и разновидности циркуляционных зон. Типы зданий следующие: длинные узкие, длинные широкие, короткие узкие, короткие широкие. В зависимости от толщины пограничного слоя ветра одно и то же здание может быть узким или широким. Короткими являются здания, длина которых в поперечном ветру направлении не превышает $1,41H$ (H — высота здания). Если длина наветренной стены короткого здания равна $l_k = 1,41H$, набегающий воздушный поток движется к отрывным кромкам поровну в стороны и вверх.

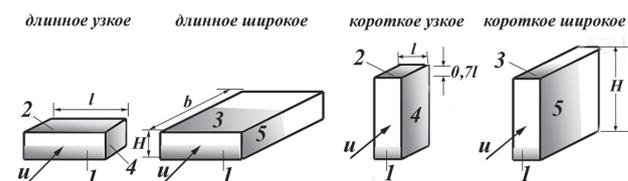


Рис. 2. Циркуляционные зоны, возникающие при действии ветра на здания разных типов

При действии ветра на здания могут возникать следующие циркуляционные зоны (на рис. 2 показаны затенением): 1 — зона подпора перед наветренной стеной в нижней ее части; 2 — единая зона над крышей узкого здания и за ее пределами; 3 — наветренная зона в пределах крыши широкого здания; подветренная зона у подветренной стены широкого здания; торцевые зоны 4 — единая и 5 — наветренная, возникающие при срыве потока с вертикальных кромок торцевых стен. Отрезок $0,7l$ — расчетная высота стены при вычислении размеров зон коротких зданий.

Единые торцевые зоны взаимодействуют с единой верхней зоной. Это взаимодействие проявляется в том, что вентиляционные выбросы, попавшие в одну из зон, загрязняют все соприкасающиеся зоны.

Если два или больше зданий стоят последовательно одно за другим, между ними при определенных условиях могут возникать межкорпусные (сложные) циркуляционные зоны.

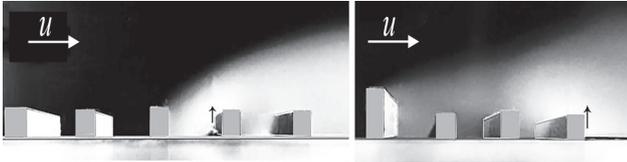


Рис. 3. Визуализация воздушных потоков в межкорпусных циркуляционных зонах

В таких случаях происходит взаимодействие зон первого здания с зонами второго (или следующих за вторым) здания. Во всех перечисленных случаях здания являются смежными. На рис. 3 показано: слева — взаимодействующими являются третье и четвертое (возможно, что и пятое) здания; справа — смежные первое и последнее здания (второе и третье здания погружены в единую зону первого здания).

Размеры циркуляционных зон за различными преградами изменяются в широких пределах в зависимости от относительных размеров преграды (здания, сооружения), ветрозащитенности, строения пограничного слоя ветра, зависящего от характера предлежащей местности

и расположенных вверх по потоку других преград, и др.

Границы невзаимодействующих циркуляционных зон в плане (на уровне земли или поверхности крыши) имеют дугообразную форму.

Аэродинамическая картина, возникающая при обтекании коротких зданий, имеет некоторые особенности: при расчете зоны подпора и верхних зон в качестве расчетной высоты принимается нижняя или верхняя часть здания высотой $0,7l$ (l — длина наветренной стены). На рис. 4, а показаны схематическое изображение циркуляционных течений вокруг высотного здания и фотографии визуализированных течений (рис. 4, б, в). Видно, что превалируют торцевые циркуляционные зоны. На рис. 4, в видны: зона подпора перед первым зданием, отрыв потока над крышей второго здания и межкорпусная зона между зданиями.

Высотные здания могут частично возвышаться над подслоем динамической турбулентности, возникающем над застроенной территорией.

Основные зависимости для расчета размеров циркуляционных зон, возникающих при действии ветра на отдельно стоящие длинные здания простой формы имеют вид:

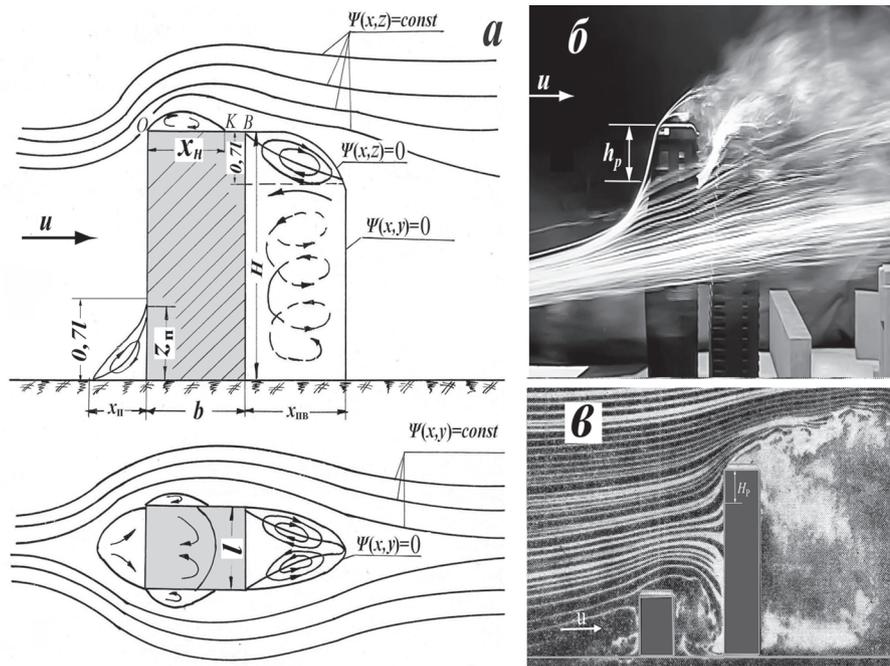


Рис. 4. Схематическое изображение циркуляционных течений вокруг высотного здания (3, а) и фотографии визуализированных течений в аэродинамических трубах (3, б, в)

Единая зона

$$l_e = 16H \left\{ 1 - \exp \left[-0,186(l/H)^{0,68} \right] \right\} \times \exp \left[-0,57(\delta/H)^{0,54} \right] + 1,3H\Phi \left[4,5 \lg(H/b) \right]; \quad (1)$$

наветренная зона

$$l_n = 7,8H \left\{ 1 - \exp \left[-0,31(l/H)^{0,68} \right] \right\} \times \exp \left[-1,3(\delta/H)^{0,54} \right]; \quad (2)$$

подветренная зона

$$l_{пв} = 4,8H \left\{ 1 - \exp \left[-0,4(l/H)^{0,68} \right] \right\}; \quad (3)$$

зона подпора

$$l_{п} = 1,5H \left\{ 1 - \exp \left[-0,5(l/H)^{0,68} \right] \right\} \times \exp \left[-0,36(\delta/H)^{0,54} \right]; \quad (4)$$

В формулах (1)–(4) приняты обозначения: $l_e, l_n, l_{пв}, l_{п}$ — длина циркуляционной зоны единой, наветренной, подветренной, подпора соответственно, м; l, b, H — длина (расстояние между разбивочными осями здания в поперечном ветру направления), ширина (то же вдоль ветра) и высота здания (расстояние от поверхности земли до уровня кровли или до верха сплошного парапета при его наличии) соответственно, м; δ — толщина вытеснения пограничного слоя ветра, набегающего на здание), м;

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \left(-\frac{t^2}{2} \right) dt.$$

Здесь t — обозначение выражения в скобках под знаком интеграла $\Phi(t)$ в формуле (1).

Индексы означают: е, н, пв — единая, наветренная, подветренная зоны; п — зона подпора. Начало координат расположено в центре проекции соответствующей отрывной кромки. Расчетной длиной циркуляционной зоны считается наибольшее расстояние в плане (по оси симметрии здания) вдоль направления ветра от отрывной кромки крыши или стены до точки присоединения потока (конца зоны), лежащей

на поверхности земли, на крыше или стене того же или соседнего здания.

Аэродинамическая картина, возникающая при обтекании коротких зданий, имеет некоторые особенности: при расчете зоны подпора и верхних зон в качестве расчетной высоты принимается нижняя или верхняя часть здания высотой $0,7l$ (l — длина наветренной стены).

При обосновании расчетных зависимостей исходили из того факта, что размеры отрывных течений пропорциональны коэффициентам аэродинамического сопротивления различных моделей, подобных по форме зданиям.

Рассчитанные по формуле (3) размеры подветренной циркуляционной зоны удовлетворительно согласуются с опытными данными, полученными в аэродинамическом канале [13]. Следует иметь в виду, что на размеры единой и наветренной циркуляционных зон оказывает существенное влияние стесненность воздушного потока в каналах, когда высота модели сопоставима с высотой канала: высота зон уменьшается, длина увеличивается. Этот факт экспериментально подтвержден в работе [4]: на размеры циркуляционных зон существенно влияет «коэффициент загромождения — отношение высоты препятствия к высоте канала». Наилучшие условия для аэродинамических исследований можно получить только в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью.

Зависимости (1)–(4) могут быть преобразованы применительно к коротким зданиям, из них могут быть получены формулы для расчета размеров торцевых циркуляционных зон длинных и коротких зданий. В этих зависимостях учтено влияние ширины здания (размера здания вдоль ветра). С увеличением ширины до некоторого предела происходит заполнение объема единой зоны зданием, следовательно, уменьшается масса циркулирующего воздуха, что приводит к снижению коэффициента сопротивления и уменьшению длины единой зоны. При критической ширине здания происходит разрыв единой зоны с образованием наветренной и подветренной зон. При дальнейшем увеличении ширины здания коэффициент сопротивления остается постоянным. Характер влияния ширины здания соответствует опытам Вигхардта [14].

Торцевые зоны возникают вследствие срыва потока с наветренных кромок торцевых стен. В качестве расчетной длины здания в этом случае принимается его высота, а в качестве высоты — половина длины здания. В зависимости от ширины здания торцевая зона может сливаться с циркуляционной зоной, возникающей у подветренной стены, либо существовать самостоятельно.

Толщину вытеснения пограничного слоя (параметр δ) в пределах i -ой зоны и за i -ой циркуляционной зоной (вдоль ветра) можно вычислить по формулам:

$$\delta/l_i = \delta_{\text{н}}/l_i \exp(ax/l_i) \text{ при } 0 \leq x/l_i \leq 1, \quad (5)$$

$$\delta/l_i = \delta_{\text{м}}/l_i \sqrt{l_i/x} \text{ при } x/l_i > 1, \quad (6)$$

где l_i — длина последней циркуляционной зоны, расположенной перед рассматриваемой зоной;

$\delta_{\text{н}}$ — начальное значение толщины вытеснения, м;

$\delta_{\text{м}}$ — наибольшее для данной циркуляционной зоны значение толщины вытеснения, м;

x — текущее расстояние (в плане) вдоль потока ветра от отрывной кромки соответствующей циркуляционной зоны до рассматриваемого сечения, м;

a — коэффициент, значение которого следует принимать равным: для единой зоны $a = 2,54$; для наветренной зоны $a = 2,16$; для подветренной зоны следует вычислять по формуле:

$$a = -[1,427 + \ln(\delta_{\text{н}}/l_{\text{пв}})]. \quad (7)$$

Экспериментальным путем получены начальные значения относительной толщины вытеснения $\delta_{\text{н}}/l_i$: для единой и наветренной циркуляционных зон 0,015, для подветренной зоны и за ней это значение следует вычислять по формуле (6), подставляя в нее исходные данные для наветренной зоны и расстояние от наветренной до подветренной стены здания (ширину b).

Относительная величина $\delta_{\text{м}}/l_i$ равна: для единой зоны 0,19; для наветренной 0,13 и для подветренной 0,24.

Если первое по потоку ветра здание на площадке является отдельно стоящим по отношению к препятствиям (зданиям, сооружениям),

расположенным перед ним, параметр $\delta_{\text{н}}$ следует вычислять по формуле (6), отсчитывая расстояние x от отрывной кромки последней циркуляционной зоны (если x не превышает 30 высот последнего препятствия); при $x > 30$ высот последнего препятствия в случае, когда перед первым зданием находится горизонтальная площадка, поросшая травой или покрытая снегом, следует принимать $\delta_{\text{н}} = 1$ м; местность, поросшая деревьями, $\delta_{\text{н}} = 10$ м; местность, застроенная зданиями высотой 1÷2 этажа, $\delta_{\text{н}} = 15$ м. Если перед рассматриваемым зданием находится сплошной забор, следует рассчитать длину единой зоны, возникающей за этим забором, и на ее основе вычислить $\delta_{\text{н}}$.

Зависимость, описывающая распределение скорости ветра в пространстве над и между зданиями (исключая обратные потоки циркуляционных зон) имеет следующий вид:

$$u_z = 1,75u_{\infty} \lg\{(z+\delta)/\delta + \sqrt{2(f-f^2)} \exp[-(1+\lg(z/\delta))^2]\}, \quad (8)$$

где u_z — продольная составляющая скорости ветра на высоте z от подстилающей поверхности, м/с;

u_{∞} — то же, невозмущенного потока ветра, м/с;

δ — толщина вытеснения пограничного слоя ветра, м.

Параметр f перед первым по потоку зданием равен нулю, над подветренной или единой зонами этого здания он равен единице, над вторым и последующими зданиями $0 < f < 1$. Формула (8) справедлива в пределах $0 \leq (z+\delta)/\delta \leq 5$.

В специальных справочниках обычно приводятся значения расчетной скорости ветра для конкретной местности на некотором стандартном уровне. Как правило, это высота флюгера, равная 10 м. Вводя в формулу (8) это значение скорости ветра, получим:

$$u_z = u_{10} \lg[F(z)]/\lg[F(z_{10})], \quad (9)$$

где u_{10} — скорость ветра на высоте $z = 10$ м, м/с;

$F(z)$ — выражение в фигурных скобках формулы (8);

$F(z_{10})$ — то же, при $z = 10$ м.

Если известны размеры циркуляционных зон (из опыта или по расчетам) у конкретного

здания, можно вычислить средние значения аэродинамических коэффициентов (таблица).

На крыше короткого широкого здания давление распределено неравномерно: максимальное значение находится вблизи отрывной кромки и плавно уменьшается вдоль ветра.

Таблица

Зависимости для вычисления значений аэродинамических коэффициентов

Наружное ограждение здания	Расчетные формулы для длинных зданий $l > 1,41H$	
	широкие здания	узкие здания
Наветренная стена	$k = 0,9ln/Hp$	$k = 0,9ln/Hp$
Крыша	$k = -0,35ln/Hp$	$k = -0,12le/Hp$
Подветренная стена	$k = -0,17l_{пв}/Hp$	$k = -0,06le/Hp$
Наружное ограждение	Расчетные формулы для коротких зданий $l < 1,41H$	
Наветренная стена	$k = 1,8l_n^k/l$	$k = 1,8l_n^k/l$
Крыша	$k = -0,95l_n^k/l$	$k = -0,38l_c^k/l$
Подветр. — $z < 0,71l$ сверху	$k = -0,25l_{пв}^k/l$	$k = -0,17l_c^k/l$
То же — остальная часть	$k = -0,17l_{пв}^r/l$	$k = -0,1l_c^r/l$

Аэродинамика отдельно стоящих зданий.

Рассмотрим возможности методики расчета аэродинамических характеристик отдельно стоящих зданий на нескольких примерах, сопоставив расчеты с результатами экспериментов отечественных и зарубежных авторов.

Среди публикаций по аэродинамике зданий встречается довольно много работ, посвященных исследованию моделей кубической формы. Например, в аэродинамической лаборатории Л. Прандтля исследована модель с длиной ребра куба 100 мм при двух толщинах пограничного слоя ветра при двух [15]. Толщину пограничного слоя меняли путем изменения шероховатости поверхности рабочего стола. На рис. 5 (верхняя часть) приведены профили скорости и распределение аэродинамических коэффициентов в среднем сечении модели при малой (а) и значительной (б) шероховатости экрана. Видно, что распределение давления ветра по граням модели в вариантах (а) и (б) различны. В работе [15] объяснения этому факту нет. Автор работы [1] так комментирует изменение распределения аэродинамических коэффициентов в этих экспериментах: «Причину такого явления нужно искать, по-видимому, в увеличении начальной турбулентности потока при повышенной шероховатости экрана».

Но если построить границы циркуляционных зон, можно видеть, что с увеличением толщины вытеснения пограничного слоя аэродинамическая картина в окрестностях модели существенно изменяется. На рис. 5, а (внизу) видно, что вся модель окружена отрывными течениями: торцевые зоны смыкаются за подветренной стеной, и взаимодействуют с единой зоной, приподнимая ее на некоторую высоту. С уве-

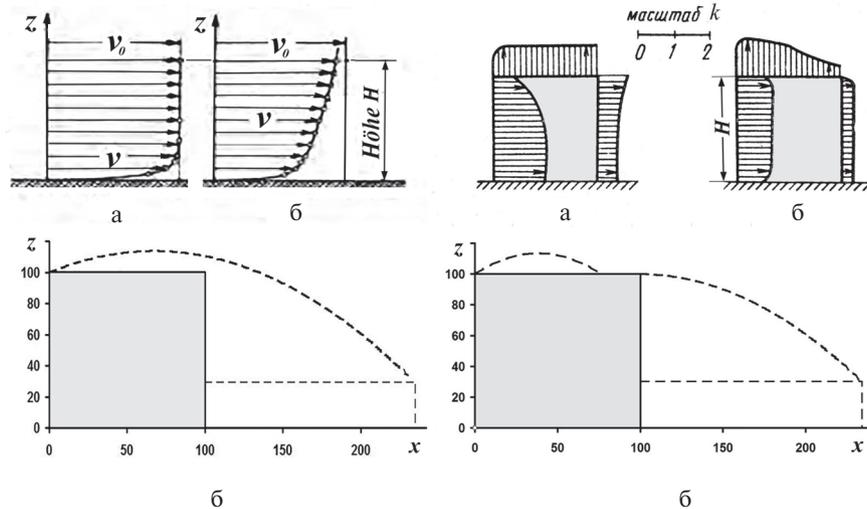


Рис. 5. Скоростные и аэродинамические характеристики модели здания кубической формы при разной шероховатости экрана (вверху) и границы циркуляционных зон, построенные автором по разработанной методике (внизу)

личением толщины вытеснения уменьшаются количество воздуха и средняя скорость потока, наталкивающегося на наветренную стену модели.

Вследствие этого снижается давление на наветренную стену и уменьшается кинетическая энергия потока, отклоненного препятствием вверх. Единая циркуляционная зона разрывается, образуются наветренная и подветренная зоны (рис. 5, б — внизу). Пониженное давление на верхней грани куба возникает в пределах наветренной зоны. За ее пределами на крыше образуется проветриваемая область, давление в которой близко к нулю.

Давление у подветренной грани также несколько повышается, поскольку подветренная зона существенно короче единой зоны, меньше объем возвратного (циркулирующего) течения, на создание которого расходуется основная доля энергии, затрачиваемой потоком на преодоление сопротивления препятствия.

В публикациях по аэродинамике зданий, как правило, не приводятся сведения о толщине вытеснения пограничного слоя, нет их и в статье [15]. Но если вычислить площади под профилями скорости, можно оценить значения толщины вытеснения: в варианте (а) $\delta \approx 5$ мм, в варианте (б) $\delta \approx 25$ мм.

Результаты расчетов:

вариант (а): $\delta = 5$ мм; $l_H = 46,54$ мм; $l_B = 235$ мм; аэродинамические коэффициенты равны: на наветренной стене $k = 0,4654 \cdot 1,8 = 0,84$; на крыше $k = -2,35 \cdot 0,38 = -0,89$; на подветренной стене $k = -2,35 \cdot 0,17 = -0,4$;

вариант (б): $\delta = 5$ мм; $l_H = 42,15$ мм; $l_H^K = 96,2$ мм; $l_{ПВ}^K = 134$ мм; аэродинамические коэффициенты

равны: на наветренной стене $k = 0,4215 \cdot 1,8 = 0,99$; на крыше $k = -0,962 \cdot 0,4 = -0,327$; на подветренной стене $k = -1,34 \cdot 0,25 = -0,335$.

Максимальное значение равно: $k = -0,962 \cdot 0,9 = -0,87$.

Аналогичные выводы следуют из экспериментальных исследований Кастро и Робинса (рис. 6) [16]. В этой работе исследовалась модель здания кубической формы с длиной ребра 200 мм. В случае А (рис. 6, а) высота пограничного слоя ветра была около нуля, в случае В — 2 м. Значение толщины вытеснения пограничного слоя не приведена, по нашим вычислениям она равна 85 мм.

На графиках рис. 6 видна разница: в случае А — модель погружена в единую циркуляционную зону. В случае В — единая зона разделена на наветренную и подветренную зоны; на наветренной грани график давления имеет характерный прогиб, вызванный влиянием зоны подпора. На крыше наблюдается пониженное давление в пределах наветренной зоны, за пределами которой давление резко повышается.

Результаты расчетов: вариант А — длина зоны подпора $l_H/H = 0,59$; аэродинамический коэффициент на наветренной грани $k = 1,06$; длина единой зоны $l/l = 2,6$; аэродинамический коэффициент на верхней грани равен $k = -0,98$; вариант В — $k = 0,47$; $k = 0,85$; $l_H/l = 0,78$; $k = -0,74$.

График на рис. 6, а получен при равномерном профиле скорости воздушного потока; на рис. 6, б — в пограничном слое высотой 2 м ($\delta \approx 85$ мм). На верхней грани стрелкой показан конец наветренной циркуляционной зоны

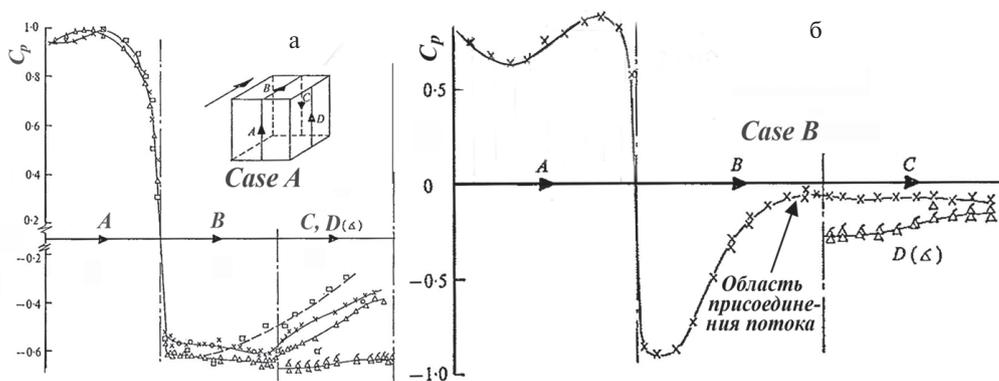


Рис. 6. Распределение аэродинамических коэффициентов на гранях модели кубической формы

Аэродинамика смежных зданий. В общем случае отрыв пограничного слоя ветрового потока от ограничивающей поверхности и возникновение циркуляционных зон происходит под действием продольного положительного градиента давления и влиянием турбулентных вязких явлений. При действии ветра на отдельно стоящее здание (любое плохообтекаемое препятствие) возникают условия, приводящие к возникновению отрыва потока и образованию зоны подпора. Положительное давление ощущается вверх по течению на расстоянии около трех характерных размеров здания.

Если в окрестностях точки присоединения оторвавшегося воздушного потока (в конце циркуляционной зоны) создать положительный градиент давления, присоединения потока к поверхности не произойдет. Именно такой эффект создает второе по потоку ветра здание, расположенное параллельно первому. В этом случае при определенных условиях произойдет взаимодействие циркуляционной зоны первого здания с зоной подпора второго здания. В результате такого взаимодействия образуется сложная межкорпусная зона с общей для соприкасающихся зон циркуляцией воздушных масс.

Для построения границы такой зоны необходимо: определить длину циркуляционной зоны за первым по потоку ветра зданием и длину зоны подпора перед вторым зданием. Затем надо сложить длину зоны первого здания с утроенной длиной зоны подпора второго здания. Если сумма вычисленных значений больше или равна расстоянию между зданиями, эти здания являются смежными.

Затем надо вычислить координаты точки пересечения границ упомянутых циркуляционных зон. Часть наветренной стены второго здания, находящаяся ниже ординаты точки пересечения границ, является затененной и не подвержена воздействию ветра, верхняя часть стены будет находиться под действием прямого потока.

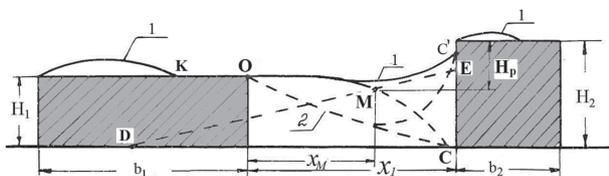


Рис. 7. Межкорпусная циркуляционная зона

На рис. 7 обозначено: *OC* — границы подветренной циркуляционной зоны; *DE* — граница утроенной зоны подпора; *1* — граница межкорпусной зоны; *2* — линия нулевых скоростей.

Координаты точки *M* пересечения границ циркуляционных зон в межкорпусном пространстве (см. рис. 7) могут быть вычислены по следующим формулам:

$$x_M = (a_1 + a_2)k, \text{ м}; \quad (10)$$

$$z_M = f(x_M), \text{ м}; \quad (11)$$

где x_M, z_M — координаты точки *M* пересечения границ циркуляционных зон, м;

$f(x_M)$ — функция координат границы одной из пар рассматриваемых циркуляционных зон, в которой координата x заменена значением x_M ;

a_1, a_2, a_3, k — комплексные параметры, значения которых следует вычислять по формулам:

а) при пересечении границ единой циркуляционной зоны первого здания и зоны подпора второго здания

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 7l_{\text{пм}}l_{\text{е}} - 10l_{\text{пм}}H_1 - 4l_{\text{е}}x_0 \\ a_2 &= \left[-l_{\text{пм}}(56l_{\text{е}}^2x_0 - 80l_{\text{е}}x_0H_1 - 65l_{\text{е}}^2l_{\text{пм}} - \right. \\ &\quad \left. - 140l_{\text{пм}}H_1l_{\text{е}} + a_3) \right]^{0,5} \\ a_3 &= 56l_{\text{е}}l_{\text{пм}}^2 - 56l_{\text{е}}x_0^2 + 80H_1l_{\text{е}}^2 - 100l_{\text{пм}}H_1^2 \end{aligned} \right\}; \quad (12)$$

$$k = 1 / (14l_{\text{пм}} - 4l_{\text{е}}), \quad (13)$$

где x_0 — расстояние от наветренной стены первого здания до наветренной стены второго здания, равное $x_0 = x_1 + b_1$;

$$l_{\text{пм}} = 3l_{\text{п}};$$

H_1, b_1 — высота и ширина (вдоль ветра) первого здания, м.

Индекс пм указывает на межкорпусную зону. Координаты границы зоны подпора в этом случае вычисляют по формуле

$$z_{\text{пм}} = (0,6/3l_{\text{пм}}) [l_{\text{пм}}^2 - (x_0 - x)^2];$$

б) то же подветренной зоны первого здания и зоны подпора второго здания

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= -x_1l_{\text{пв}} \\ a_2 &= \left[l_{\text{пм}}(25H_1^2l_{\text{пм}} - 5H_1l_{\text{пм}}^2 + 5H_1x_1^2 - \right. \\ &\quad \left. - 5l_{\text{пв}}^2H_1 + l_{\text{пв}}^2l_{\text{пм}}) \right]^{0,5} \end{aligned} \right\}; \quad (14)$$

$$k = l_{пв} / (5H_1 l_{пм} - l_{пв}^2), \quad (15)$$

где x_1 — расстояние между рассматриваемыми зданиями, м. Координаты границы зоны подпора в этом случае вычисляются по формуле

$$z_{пм} = (0,6/3l_{пм}) [l_{пм}^2 - (x_1 - x)^2].$$

Координата точки C' конца межкорпусной циркуляционной зоны вычисляется по формуле:

$$z_{c'} = z_M + 0,2(x_1 - x_M) = 12,42 \text{ м.}$$

Вычисление координат точки M является необходимым условием для определения ветрозащищенности наветренной стены второго здания.

Рассмотрим обтекание ветром двух последовательно стоящих зданий, первое из которых длинное и низкое, второе — короткое и высокое. Такое сочетание зданий рассматривается во многих публикациях отечественных и зарубежных авторов. Например, в статье [17] авторы исследовали комплекс трехмерных конструкций, представляющий собой высотное и рядом стоящее средневысотное здания, и пришли к выводу, что графики безразмерных коэффициентов давления имеют более сложный вид, чем в двумерной задаче.

Движение визуализированных дымом воздушных потоков вокруг этих зданий показано на фотографиях рис. 8, полученных в аэродинамических трубах (рис. 8, в заимствован из книги: Поддаева О.И. и др. Архитектурно-строительная аэродинамика: учеб. пособие. — М.: НИУ МГСУ, 2015. — 88 с.).

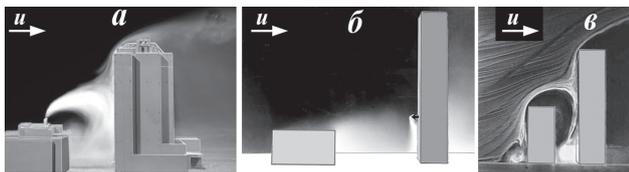


Рис. 8. Фотографии визуализированных течений в межкорпусных пространствах смежных зданий, полученные в аэродинамических трубах

На фотографиях рис. 8, а, в видно, как воздушный поток, отесненный сверху первым зданием, наталкивается на наветренную стену второго здания и разделяется на два потока, движущихся вверх и вниз. На рис. 8, б источник

дыма находится в пределах обратного потока межкорпусной циркуляционной зоны: дымовой факел направлен вниз; на рис. 8, в видна зона подпора перед первым зданием.

Условия примера: два смежных здания расположены на застроенной одноэтажными зданиями территории ($\delta = 15$ м); размеры зданий следующие: $H_1 = 22$ м, $b_1 = 44$ м, $l_1 = 88$ м; $H_2 = 44$ м, $b_2 = 22$ м, $l_2 = 44$ м; расстояние между зданиями равно $x_1 = 66$ м (рис. 9, а).

Решение. Определяем размеры зоны подпора, возникающей при действии ветра на первое здание: при $l_1/H_1 = 4$ и $\delta/H_1 = 0,682$ находим $l_{п1} = 0,85H_1 = 18,7$ м, высота зоны подпора равна: $z_{п1} = 11,2$ м. Определим длины циркуляционных зон за первым и перед вторым зданиями, условно допустив, что они отдельно стоящие. При $l_1/H_1 = 4$, $\delta/H_1 = 0,682$ получаем $l_{п1} = 1,49H_1 = 32,78$ м. Длина зоны меньше ширины здания, следовательно, здание в аэродинамическом смысле широкое и за ним возникает подветренная циркуляционная зона (рис. 9, а). Длину подветренной зоны определяем при $l_1/H_1 = 4$; $l_{пв} = 3,1H_1 = 67,8$ м.

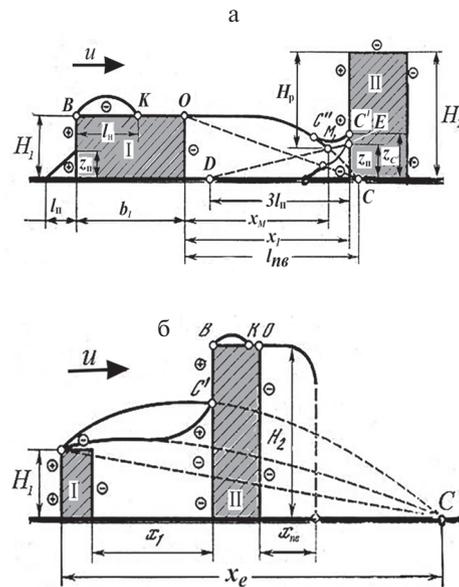


Рис. 9. Схематический рисунок к примеру построения границ межкорпусной циркуляционной зоны

Рассчитаем длину зоны подпора перед вторым зданием: $l_{п2} = 18,47$ м. Это здание является коротким, так как $l_2/H_2 < 1,41$. Критическое расстояние между зданиями равно $x_{1кр} = 67,8 + 3 \cdot 18,47 = 123,2$ м. Поскольку $x_1 < x_{1кр}$, здания

являются смежными и между ними образуется межкорпусная циркуляционная зона.

На рис. 9, а границей подветренной зоны является кривая OMC , а пунктирная линия OC характеризует нулевые значения горизонтальной скорости потока. Граница зоны подпора в условиях межкорпусного пространства имеет небольшую кривизну, поэтому без большой погрешности ее можно заменить прямой линией DE , причем длина этой зоны в плане равна утроенной длине зоны подпора, соответствующей отдельно стоящему зданию. Координаты точки M следующие: $x_M = 59,4$ м, $z_M = 8,8$ м. Расчетная высота незатененной части наветренной стены второго здания равна $H_p = 35,2$ м.

На рис. 9, а — первое здание широкое, границы циркуляционных зон пересекаются в межкорпусном пространстве; на рис. 9, б — первое здание узкое, границы зон в межкорпусном пространстве не пересекаются

Определяем ординату точки C' присоединения межкорпусной зоны на поверхности наветренной стены второго здания:

$$z_{C'} = z_M + 0,2(x_1 - x_M) = 12,42 \text{ м.}$$

Граница межкорпусной циркуляционной зоны от точки O до точки C' совпадает с границей подветренной зоны, затем вблизи точки M плавно отклоняется кверху и заканчивается в точке C' . Рассчитаем размеры циркуляционных зон у второго здания по значению расчетной высоты H_p , измеряемой вверх от уровня точки M , и величины параметра δ в сечении, проходящем через плоскость наветренной стены второго здания. При $x_1/l_{\text{нв}} = 66/67,5 = 0,978$ находим $\delta = 16,2$ м или $\delta = 0,46H_p$.

Длина второго здания, отнесенная к H_p , равна: $l_2/H_p = 44/35,2 = 1,25$. Это здание является узким и при действии ветра около него возникает единая циркуляционная зона. Определяем длину l_c единой зоны второго здания: $l_c = 88,4$ м. Эта зона простирается от уровня крыши до уровня $H_2 - 0,7l_2 = 30,8$ м от земли. Ниже этого уровня циркуляционная зона состоит из потоков, срывающихся с торцевых стен здания, и имеет вертикальную границу, изображающуюся на чертеже вертикальной линией.

Построение границ циркуляционных зон, возникающих при обтекании зданий, расположенных за вторым, выполняется аналогично.

Если границы циркуляционных зон в пространстве между зданиями не пересекаются, но $x_1 < x_{\text{кр}}$, граница межкорпусной зоны совпадает с границей циркуляционной зоны за первым зданием вплоть до точки присоединения потока на наветренной стене или крыше второго здания. На рис. 9, б показаны границы циркуляционных зон, возникающих при обтекании ветром двух смежных зданий, из которых первое узкое и длинное, а второе короткое и высокое. В этом случае граница межкорпусной зоны совпадает с границей единой зоны первого здания.

На фотографии рис. 8, б показано расположение зданий, аналогичное расположению в примере рис. 9, б.

Области пониженного и повышенного давления, возникающие при воздействии ветра на здания, обозначены на рис. 9 знаками «плюс» и «минус». В рассмотренном примере область пониженного давления на наветренной стене второго здания во втором случае (рис. 9, б) является более обширной, чем в первом случае (рис. 9, а).

Определим коэффициент давления ветра на наветренной стене первого здания (рис. 9, а). При $l_{\text{н}} = 0,85H_1$ находим аэродинамический коэффициент: $k = 0,765$.

Вычисляем коэффициент давления на наветренной стене второго здания. Относительная длина зоны подпора перед вторым зданием равна $l_{\text{н2}}/l_2 = 0,42$. Аэродинамический коэффициент равен: $k = 0,6$.

Следует учитывать, что ближе к отрывным кромкам наветренной стены положительное давление плавно переходит в отрицательное, то есть не существует резкого, скачкообразного перехода от положительного давления к отрицательному, наблюдающемуся на крыше или на торцевых стенах здания. Это обусловлено превышением скорости течения вдоль стены вблизи отрывных кромок над скоростью набегающего потока.

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований, представленных в статье [18]. Исследования выполнялись в аэродинамической трубе А-6 Института механики МГУ. Получены распределения давления по поверхности двух моделей призматической формы, устанавливавшиеся последовательно вдоль потока ветра на разном расстоянии одно от другого.

Модели представляли собой параллелепипеды с размерами ($H \times l \times b$): 595 × 215 × 187 мм (№ 1) и 665 × 212 × 185 мм (№ 2). Модель № 2 была закреплена в центре аэродинамического стола постоянно, модель № 1 устанавливалась на разном расстоянии от модели № 2 вверх по потоку: $L = (200, 400, 600, 800, 1000)$ мм. Датчики давления расположены на вертикальной средней линии граней модели (по четыре датчика на грань), измерения выполнялись при скорости воздушного потока 30 м/с.

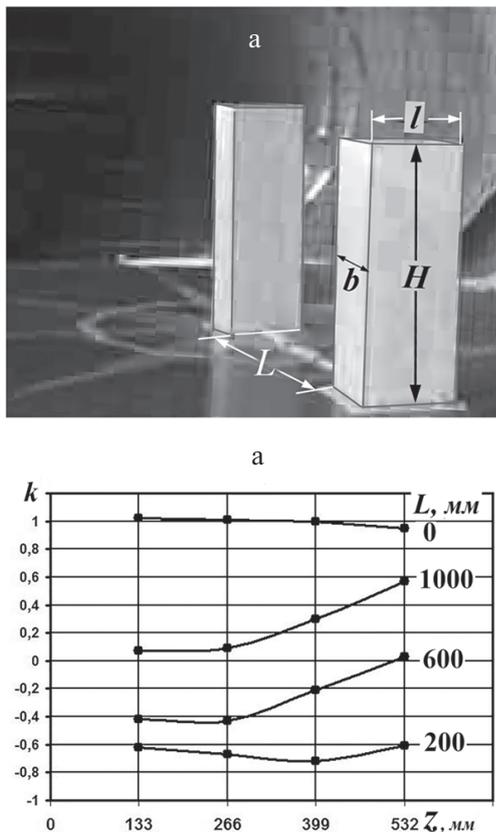


Рис. 10. Фотография моделей в аэродинамической трубе (а) и распределение осредненного коэффициента давления на наветренной грани модели № 2 (б)

На рис. 10 приведены общий вид моделей на столе аэродинамической трубы и аэродинамические коэффициенты на наветренной грани модели № 2 ($L = 0$ — без модели № 1).

Авторы статьи [18] предположили, что на характер изменения аэродинамических коэффициентов на гранях второй модели в зависимости от расстояния между моделями оказывает влияние отрывная (циркуляционная) зона, возникающая за первой по потоку моделью. Если построить границы циркуляционных зон

на каждом этапе экспериментов, можно увидеть, как происходит обтекание потоком второй модели (рис. 11). Вычисленная длина единой торцевой циркуляционной зоны равна 786 мм. (формула (1): $l = H$, $H = 0,5l$). При расстояниях 200 мм и 400 мм вторая модель полностью погружена в циркуляционную зону первой здания, на всех гранях наблюдается пониженное давление примерно одной величины. При расстоянии 600 мм верхняя часть модели подвержена действию ослабленного прямого потока, давление здесь около нуля. При расстояниях 800 мм и 1000 мм вторая модель подвержена действию резко деформированного и ослабленного прямого потока.

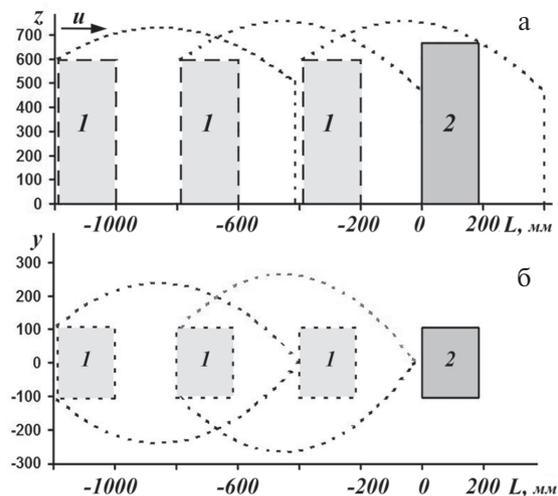


Рис. 11. Границы циркуляционных зон, возникающих при разных расстояниях между моделями смежных зданий

Как отмечалось выше, в циркуляционной зоне возникают два горизонтальных циркулирующих потока, образующихся при срыве ветра от торцевых граней, и аналогичный вертикальный поток, образующийся при отрыве ветра от крыши. Внизу подветренной грани может происходить отрыв обратного потока и возникать вторичная циркуляционная зона подпора.

В объеме циркуляционной зоны создается интенсивная турбулентность, за пределами зоны вниз по течению простирается турбулентный шлейф (след), исчезающий на значительном расстоянии от препятствия. В области подобного шлейфа находится вторая модель (при расстоянии между моделями больше 600 мм). При этом коэффициенты давления на на-

тренной грани снижаются более чем в два раза по сравнению с отдельно стоящей моделью.

Таким образом, расчет и построение границ циркуляционных зон позволяет установить аэродинамические связи между соседними зданиями.

В статье [19] выполнено математическое моделирование аэродинамики группы последовательно стоящих высотных зданий. Исследовалось наиболее высокое здание, перед которым вдоль ветра устанавливались два здания несколько меньшей высоты. Полученные результаты согласуются с рассмотренной выше картиной течений.

Можно заключить, что при выполнении экспериментальных исследований аэродинамиче-

ских характеристик зданий целесообразно предварительно рассчитывать размеры и определять границы циркуляционных течений, а при работе экспериментов — учитывать влияние относительной толщины вытеснения пограничного слоя воздушного потока.

Заключение. Изложенная в статье методика расчетного определения аэродинамических характеристик отдельно стоящих и смежных зданий учитывает влияние всех действующих факторов, в том числе относительной толщины вытеснения пограничного слоя ветра. Применение методики в проектной практике вместо дорогостоящих и трудоемких экспериментальных методов позволит повысить качество и снизить стоимость проектирования промышленных объектов.

Литература

1. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика [Текст] / Э.И. Реттер. — М.: Стройиздат, 1984.
2. ASHRAE Fundamentals Handbook (SI Edition). 1997, ch. 15.
3. Кошин А.А. Анализ динамического воздействия воздушного потока на тандем моделей высотных зданий [Текст] / А.А. Кошин // Вестник ТГАСУ. — 2014. — № 2.
4. Ларичкин В.В. Влияние толщины пограничного слоя на структуру пристенного течения с двумерным выступом [Текст] / В.В. Ларичкин, С.Н. Яковенко // Прикладная механика и техническая физика. — 2003. — Т. 44. — № 3.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. — М.: Гостехиздат, 1950. — 676 с.
6. Olsson R.G. Versuche über Winddruck auf Bauwerke // Bauingenieur, 15 (1934), H. 49/50.
7. Jensen M. The model law for phenomena in the natural wind // Ingenioren, 1958, 2: 121–128.
8. Holmes J.D. Wind Loading of Structures. London, Spon Press, 2001. 364 p.
9. Реттер Э.И. Аэродинамическая характеристика жилых зданий [Текст] / Э.И. Реттер, Ф.Л. Серебровский // АВОК. — 2008. — № 5.
10. Самсонов В.Т. Определение границ циркуляционных зон, возникающих при обтекании производственных зданий ветром [Текст] / В.Т. Самсонов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. — Вып. 101. — М.: Профиздат 1976.
11. Гувернюк С.В. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий [Текст] / С.В. Гувернюк // АВОК. — 2006. — № 8. — С. 18–24.
12. Самсонов В.Т. Аэродинамика промышленных зданий: аэродинамические расчёты при проектировании вентиляционных выбросов [Текст] / В.Т. Самсонов. — М.: ИНФРА-М, 2019. — 230 с.
13. Терехов В.И. Особенности течения и теплообмена при отрыве турбулентного потока за уступом и ребром [Текст] / В.И. Терехов, Н.И. Ярыгина, Р.Ф. Жданов // Прикладная механика и техническая физика. — 2002. — Т. 43. — № 6. — С. 126–133.
14. Wieghardt K. Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen. // Techn. Berichte, 10, Heft 9, (1943). P. 65–81.
15. Prandtl L., Betz A. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Göttingen, IV. Lieferung. München — Berlin, 1932. S. 128–134.
16. Castro I.P., Robins A.G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams // J. Fluid Mech. 1977. V. 79. Pt. 2, pp. 307–335.
17. Дорошенко С.А. Определение ветровой нагрузки на трехмерные конструкции с помощью моделирования в аэродинамической трубе [Текст] / С.А. Дорошенко, А.В. Дорошенко, Г.В. Орехов // Вестник МГСУ. — 2012. — № 7. — С. 69–74.
18. Леденев П.В. Экспериментальное исследование ветрового давления при обтекании тандема двух зданий [Текст] / П.В. Леденев, А.А. Сиявин // Вестник МГСУ. — 2011.
19. Varsha Y., Amin J.A. CFD Simulation on a Group of Tall Buildings // Global Research and Development Journal for Engineering, march, 2016, pp. 309–314.

References

1. Retter E.I. *Arhitekturno-stroitel'naiia aerodinamika* [Architectural and construction aerodynamics]. Moscow: Stroi'izdat Publ., 1984.
2. ASHRAE Fundamentals Handbook (SI Edition). 1997, ch. 15.
3. Koshin A.A. Analiz dinamicheskogo vozdeist'viia vozdušnogo potoka na tandem modelei' vy'sotny'kh zdaniï [Analysis of the dynamic effects of air flow on the tandem of models of high-rise buildings]. *Vestnyk TGASU* [Bulletin of TGASU]. I. 2, 2014.
4. Larichkin V.V., Iakovenko S.N. Vliianie tolshchiny' pograničnogo sloia na strukturu pristennogo techeniia s dvumerny'm vy'stopom [The influence of the thickness of the boundary layer on the structure of the near-wall flow with a two-dimensional protrusion]. *Prikladnaia mehanika i tekhnicheskaiia fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2003, V. 44, I. 3.
5. Loitcianskii' L.G. *Mehanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of fluid and gas]. Moscow: Gostehizdat Publ., 1950. 676 p.

6. Olsson R.G. Versuche über Winddruck auf Bauwerke // Bauingenieur, 15 (1934), H. 49/50.
7. Holmes J.D. Wind Loading of Structures. – London, Spon Press, 2001. – 364 p.
8. Retter E.I., Serebrovskii F.L.. *Ae'rodinamicheskaia harakteristika zhilykh zdaniï* [Aerodynamic characteristics of residential buildings]. AVOK [ABOK]. 2008, I. 5.
9. Samsonov V.T. Opređenje granic tsirkuliatcionny'kh zon, voznikaushchikh pri obtekanii proizvodstvenny'kh zdaniï v etrom [Determination of the boundaries of the circulation zones that occur when wind flows around industrial buildings]. *Nauchny'e raboty' institutov okhrany' truda VTCSPS* [Scientific work of labor protection institutes of the All-Union Central Council of Trade Unions]. I. 101. Moscow, Profizdat Publ., 1976.
10. Guverniuk S.V. Komp'uternoe modelirovanie ae'rodinamicheskikh vozdeïstviï na e'lementy' ograzhdenii' vy'sotny'kh zdaniï [Computer modeling of aerodynamic effects on the elements of the fences of high-rise buildings]. AVOK ["ABOK"]. 2006, I. 8, pp. 18–24.
11. Samsonov V.T. *Ae'rodinamika promy'shlenny'kh zdaniï: ae'rodinamicheskie raschyoty' pri proektirovanii ventiliatcionny'kh vybrosov* [Aerodynamics of industrial buildings: aerodynamic calculations in the design of ventilation emissions]. Moscow, INFRA-M Publ., 2019. 230 p.
12. Terehov V.I., Iary'gina N.I., Zhdanov R.F. Osobennosti techeniia i teploobmena pri otry've turbulentnogo potoka za ustupom i rebrom [Features of the flow and heat transfer during separation of the turbulent flow behind the ledge and rib]. *Priladnaia mehanika i tekhnicheskaia fizika* [Applied mechanics and technical physics]. 2002, V. 43, I. 6, pp. 126–133.
13. Wiegardt K. Erhöhung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen. // *Techn. Berichte*, 10, Heft 9, (1943). P. 65–81.
14. Prandtl L., Betz A. Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt zu Gottingen, IV. Lieferung. Munchen - Berlin, 1932. S. 128–134.
15. Castro I.P., Robins A.G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams // *J. Fluid Mech.* 1977. V. 79. Pt. 2, pp. 307–335.
16. Doroshenko S.A., Doroshenko A.V., Orehov G.V. Opređenje vetrovoi' nagruzki na trekhmernye konstrukcii s pomoshchiu modelirovaniia v ae'rodinamicheskoi' trube [Determination of the wind load on three-dimensional structures using simulation in a wind tunnel]. *Vestnyk MGSU* [Bulletin MGSU]. 2012, I. 7, pp. 69–74.
17. Ledenev P.V., Siniavin A.A.. E'ksperimental'noe issledovanie vetrovogo davleniia pri obtekanii tandema dvukh zdaniï [An experimental study of wind pressure during flow around tandem of two buildings]. *Vestnyk MGSU* [Bulletin MGSU]. 2011.
18. Varsha Y., Amin J.A. CFD Simulation on a Group of Tall Buildings // *Global Research and Development Journal for Engineering*, march, 2016, pp. 309–314.