

УДК 51-74

Численное исследование интерференционных эффектов, возникающих в воздушном потоке при обтекании комплекса зданий сложной формы*

С.А. Вальгер¹, Н.Н. Федорова^{1,2}, А.В. Федоров^{1,2}

¹*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

²*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: svetlanavalger@gmail.com

Проведено численное исследование аэродинамики здания сложной формы с учетом расположения окружающих строений. По результатам численного моделирования, основанного на полных физико-математических моделях механики сплошной среды, получена и описана пространственная структура турбулентного отрывного течения воздуха в окрестности здания и дана оценка ветровой нагрузки, приходящейся на него. Проведено сравнение результатов расчетов течения воздуха при расположении здания в комплексной застройке и при его изолированном расположении, на основе полученных данных приведена оценка влияния интерференционных эффектов в потоке на аэродинамику зданий в условиях городской застройки. Выполнено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, получено их удовлетворительное соответствие.

Ключевые слова: ветровые воздействия, интерференционные эффекты, отрывные течения, турбулентность, численные методы.

Введение

Экономическое развитие обуславливает рост современных городов, высокие темпы строительства новых зданий и сооружений и реконструкцию уже имеющихся объектов. В связи с реализацией сложных проектов зданий повышенной этажности и уникальной архитектуры возникают задачи по обеспечению надежности, безопасности и пригодности к эксплуатации таких сооружений, при этом учет динамических воздействий природного характера на конструкции строительных объектов через оценку ветровых нагрузок становится обязательным.

Ветровые нагрузки оказывают существенное воздействие на конструктивную прочность и устойчивость зданий и сооружений. В случае высотных строительных объектов, имеющих большое лобовое сопротивление, они вносят значительный вклад в увеличение динамической нагрузки, что может привести к потере устойчивости и разрушению. Проектирование и возведение строительных объектов сложной архитектурной формы, для которых аэродинамические коэффициенты неизвестны, требует тщательной оценки

* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 211, задание № 2014/140 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания).

ветровой нагрузки. Для определения ветрового давления на стенки здания необходимо уметь предсказывать расположение и масштабы рециркуляционных, отрывных и застойных зон, которые обуславливают существенное ускорение ветра, образование зон с отрицательным коэффициентом давления и другие особенности течения.

Исследование структуры течения воздуха в окрестности зданий и сооружений необходимо проводить при возведении дополнительных конструктивных элементов (рекламных конструкций, антенн) и применении новых технологий облицовки фасадов, таких как навесные вентилируемые фасады. Так, в последние годы в России и за рубежом участились случаи обрушения элементов фасадов под действием сильных порывов ветра, что обуславливается отсутствием методик расчета, которые бы учитывали неравномерность распределения ветровой нагрузки на стенки зданий, возникновение локальных зон низких отрицательных и высоких положительных давлений на стенках.

Еще одной немаловажной задачей в проектировании является создание благоприятной для проживания человека среды, что не может быть достигнуто без оценки влияния городской застройки на пешеходную комфортность. В последние годы наблюдается тенденция к увеличению плотности городских застроек. В уже имеющуюся архитектурную среду добавляются новые здания и малые архитектурные формы, которые в ряде случаев приводят к существенному изменению аэродинамики окружающих строений. В условиях северного климата актуальной является задача прогнозирования расположения снеговых заносов в микрорайонах и особенно вблизи проезжих частей, что также требует исследования структуры ветрового течения в их окрестности.

Структура течения в окрестности исследуемого здания обуславливается не только формой и размерами самого здания и параметрами набегающего потока, но и интерференционными эффектами, возникающими при обтекании совокупности зданий в системе городской застройки. Интерференционная картина осложняется и тем, что структура течения в городских застройках будет существенно изменяться в зависимости от конфигурации застройки и от направления ветра. Современные строительные нормы [1] не позволяют учитывать взаимное влияние зданий друг на друга и ограничиваются введением дополнительных коэффициентов запаса при расчете динамических нагрузок, что зачастую приводит к перерасходу дорогостоящих материалов. В связи с этим необходимо разрабатывать новые современные подходы, позволяющие рассматривать влияние интерференционных эффектов на интенсивность и частотные характеристики ветровых нагрузок. Так, при обтекании зданий в условиях плотной застройки существенную роль играют взаимодействие вихрей, срывающихся с кромок зданий, наличие отрывных и рециркуляционных зон вблизи зданий, увеличивающих эффективную площадь обтекаемой поверхности и приводящих к изменению структуры течения и скорости ветрового потока.

В экспериментальных работах [2, 3] было проведено исследование интерференционного влияния расположенных в тандеме призм квадратного сечения и дана оценка ветровой нагрузки для ряда их конфигураций. Полученные данные свидетельствовали о существенном перестроении структуры течения в окрестности тел при их расположении в комплексе и об изменении характера ветровой нагрузки на стенки отдельных тел. Это подтвердило необходимость учета интерференционных эффектов при расчете ветровой нагрузки на здания в условиях плотных городских застроек. В работах [4, 5] авторами было проведено численное моделирование течений несжимаемого турбулентного воздуха в окрестности плохообтекаемых тел простой формы и их комплексов, описана структура течений в их окрестности, проведено сравнение с имеющимися в литературе экспериментальными данными, даны рекомендации о выборе модели турбулентности. На основании этих работ может быть выполнено численное исследование интерференционных эффектов в отрывных течениях в окрестности комплексов зданий сложной формы.

В настоящей работе на основе полных физико-математических моделей механики сплошной среды проведено моделирование пространственного турбулентного отрывного течения в окрестности здания сложной формы с учетом окружающей застройки, исследована трехмерная структура течения в окрестности застройки, получены поля параметров течения и приведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по распределению коэффициента давления на стенках здания. Также в работе проведено сравнение структуры течения воздуха в окрестности здания и распределения коэффициента давления на его стенках для случаев расположения данного строения в застройке и изолированно, дана количественная оценка влияния интерференционных эффектов в потоке на ветровую нагрузку на здание.

1. Физико-математическая постановка задачи и методы решения

Постановка задачи. Рассмотрим турбулентное течение воздуха в окрестности реального здания, расположенного в Бiotехнопарке р.п. Кольцово Новосибирской области (рис. 1а). Здание имеет сложную форму и стеклянный фасад (рис. 1б), что обуславливает необходимость детальной оценки его аэродинамики на стадии проектирования. Численное моделирование выполнено в ПК ANSYS Fluent на основе масштабной модели 1:150 в условиях геометрического подобия и в соответствии с экспериментальными данными [6]. Рассматриваются две расчетные конфигурации: 1 — при расположении исследуемого здания в комплексе окружающих строений (здание А, рис. 1с) и 2 — при его изолированном расположении, без учета влияния окружающей застройки. Длина здания А в масштабе составляет $d \approx 0,6$ м, максимальная высота здания $h_{A,max} \approx 0,115$ м. Характерная скорость в ядре потока составляет $U_\infty = 16,6$ м/с, толщина пограничного слоя $\delta = 0,92$ м. Число Рейнольдса набегающего потока, вычисленное по характерному линейному масштабу $L = \delta$ и скорости потока U_∞ , составляет $Re \approx 1,05 \cdot 10^6$.

Для моделирования течения в окрестности здания А для обеих конфигураций рассматривается расчетная область высотой $\approx 2,5\delta$ и диаметром $\approx 3,5\delta$ (рис. 2а). Размеры расчетной области выбраны таким образом, чтобы внешние границы области не оказывали влияния на структуру течения в окрестности зданий.

Физико-математическая модель и методы решения. Для описания течения воздуха в окрестности зданий в условиях нейтральной стратификации атмосферы использованы осредненные по Рейнольдсу трехмерные уравнения Навье–Стокса, записанные в физических переменных при постоянных плотности и температуре [7]. Компоненты

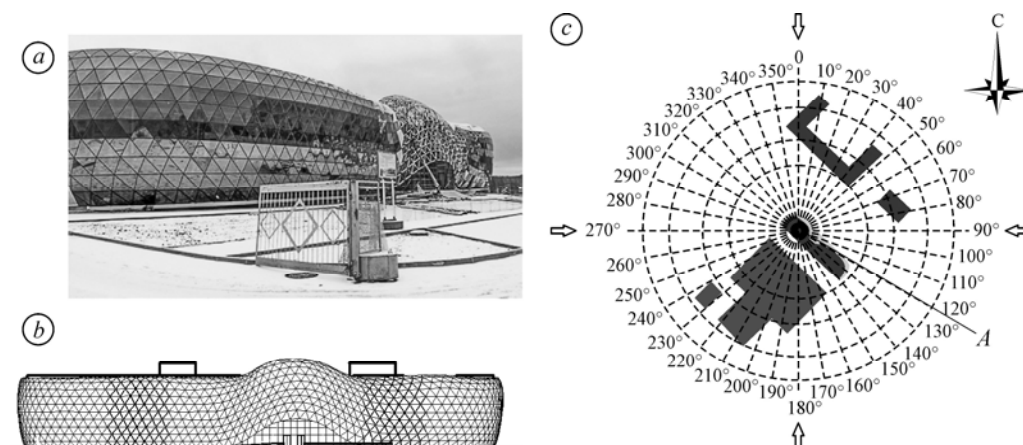


Рис. 1. Здание Бiotехнопарка в р.п. Кольцово (а), его геометрическая модель (вид со стороны фасада) (б) и расположение относительно окружающих строений (здание А) (с).

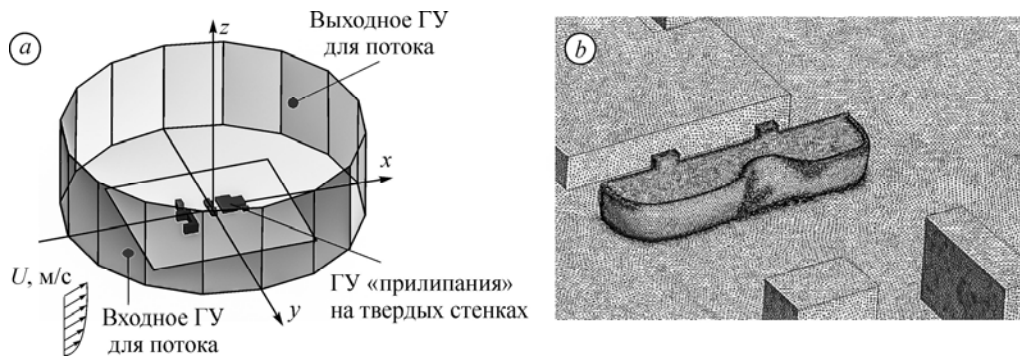


Рис. 2. Схема расчетной области (а) и фрагмент расчетной сетки на здании А (b).
ГУ — граничные условия.

тензора турбулентных напряжений, необходимые для замыкания исходной системы уравнений, вычисляются через параметры осредненного потока в соответствии с гипотезой Буссинеска. Для вычисления турбулентной вязкости используется $k-\omega$ SST модель турбулентности [8] с коррекцией Като–Лаундера для члена порождения турбулентной кинетической энергии (ТКЕ) [9]. Для приближенного решения начально-краевой задачи использованы методы конечных объемов и расщепления по физическим процессам [10]. Получение монотонного решения обеспечивается за счет применения MUSCL-схемы третьего порядка точности для расчета конвективных членов и центрально-разностной схемы второго порядка точности для расчета вязких членов. Для аппроксимации уравнений по временной переменной использована неявная схема второго порядка точности. Во всех расчетных случаях, описанных ниже, было получено квазистационарное решение с уменьшением невязок всех уравнений до уровня $3 \cdot 10^{-4}$.

Граничные условия. В качестве характерного направления ветра выбрано северное направление, что соответствует углу $\alpha = 0^\circ$ на рис. 1с. На входе в расчетную область задавались стационарные профили скорости, ТКЕ и удельной скорости диссипации турбулентности, полученные на основе аппроксимации экспериментальных данных [6]. Для точек экспериментальных данных, описывающих среднюю скорость ветра (рис. 3а), получена аппроксимирующая функция $U(z) = U_\infty \cdot (z/\delta)^{0,185}$.

Профиль ТКЕ (рис. 3b) на входе в расчетную область задан на основе аппроксимации кубическим сплайном данных эксперимента [6]. Удельная скорость диссипации турбулентности получена из соотношения [11], характерный масштаб турбулентных пульсаций выбран равным расстоянию до плоской подложки.

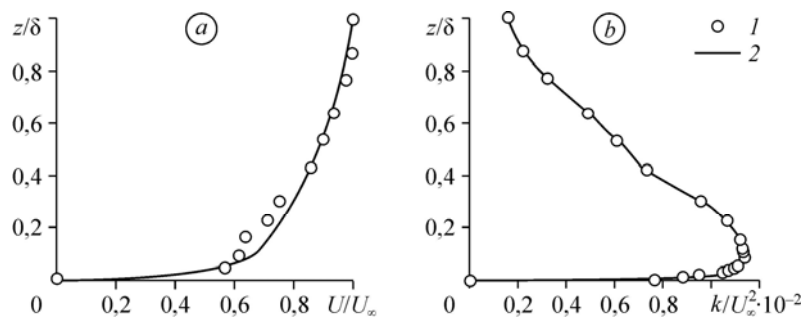


Рис. 3. Безразмерные профили средней (а) и флуктуационной (b) компонент скорости на входе в расчетную область.
1 — экспериментальные значения, 2 — аппроксимирующая функция.

На выходе из расчетной области использовано условие постоянства статического давления: $\Delta P = P_{\text{ст}} - P_0 = 0$ атм. На верхней границе расчетной области задано условие симметрии, обеспечивающее отсутствие потока через эту границу. На стенках плоской подложки и зданий использовано граничное условие вязкого прилипания для абсолютно гладкой стенки.

Пространственная дискретизация расчетной области. Фрагмент неструктурированной расчетной сетки на поверхности зданий показан на рис. 2b. Расчетная сетка конечных объемов включает тетраэдры во внешней области и слои вытянутых призматических элементов вблизи твердых стенок. Для всех расчетных случаев безразмерное расстояние до стенки в первом расчетном узле составляет $y^+ \approx 1$, что обеспечивает разрешение вязкого пограничного подслоя. С целью получения сеточно-независимого решения для конфигурации 1 проведена серия расчетов на сгущающихся сетках, параметры которых представлены в таблице. Наиболее подробная сетка включает около 59 млн. расчетных элементов, характерный размер сеточных ячеек на поверхности здания A для этого случая составляет 0,0053 м.

На рис. 4 представлены безразмерные профили компонент скорости U_x и U_y в характерном сечении вблизи здания A ($x = -0,065$ м, $y = 0,37$ м, $0 \leq z \leq 0,1$), полученные в расчетах на различных сетках. Решения на последних двух сетках отличаются на $\approx 10\%$, что позволяет сделать выводы о сеточной сходимости. Все дальнейшие расчеты проведены на сетке 4.

2. Обсуждение результатов

Рассмотрим структуру течения в окрестности здания A при его расположении в застройке (конфигурация 1). Течение имеет пространственный характер, зависит от направления набегающего потока и осложнено многочисленными интерференционными эффектами, возникающими из-за наличия зданий окружающей застройки (рис. 5a–5d).

Таблица

Количественные показатели сеток, используемых в расчетах

№	Общее кол-во элементов	Размер элементов вблизи здания A , м	Размер элементов на здании A , м	y^+
1	≈ 9 млн.	$\approx 0,013$	$\approx 0,0066$	≤ 1
2	$\approx 16,6$ млн.	$\approx 0,012$		
3	≈ 26 млн.	$\approx 0,01$		
4	≈ 46 млн.	$\approx 0,008$		
5	≈ 59 млн.	$\approx 0,0066$	$\approx 0,0053$	

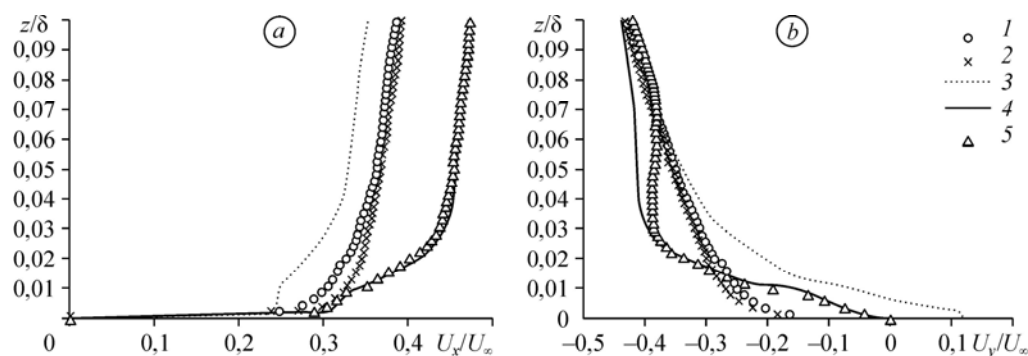


Рис. 4. Безразмерные профили компонент скорости U_x и U_y в характерном сечении вблизи здания A ($x = -0,065$ м, $y = 0,37$ м, $0 \leq z \leq 0,1\delta$), полученные в расчетах на различных сетках.

Цифры 1–5 соответствуют номерам 1–5 в таблице.

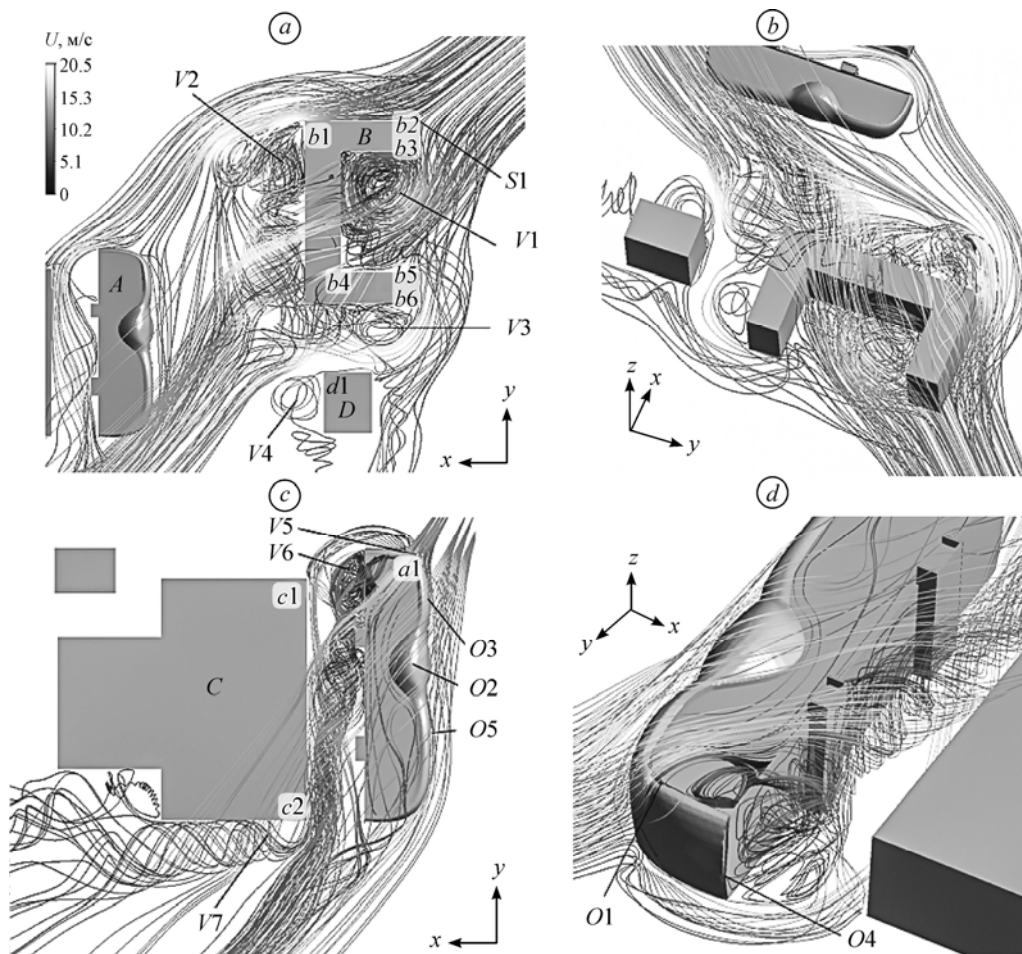


Рис. 5. Структура течения в окрестности здания B в плане (a) и в трехмерном представлении (b), в окрестности зданий A и C в плане (c) и в трехмерном представлении (d).

При северном направлении ветра существенную роль в формировании вихревого течения вблизи здания A играет неравномерность потока, возникающая вследствие обтекания здания B с высотой $\approx 2h_{A,\max}$, расположенного перед зданием A, и здания C высотой $\approx h_{A,\max}$, расположенного за зданием A на расстоянии $d \approx 1,15 h_{A,\max}$ от него. Набегающий поток при северном направлении ветра приходит на стенки здания B под углом 45° . На ребре b_2 происходит разделение потока (рис. 5a, 5b, зона S1). Часть потока движется вдоль фронтальной поверхности (b_2-b_1) и отрывается с ребра b_1 , образуя на подветренной стороне здания B вихревую структуру V2 с характерным масштабом, сопоставимым с длиной здания. Кроме того, часть внешнего потока обтекает здание сверху с образованием отрывной зоны на крыше, после чего некоторые линии тока попадают в рециркуляционную зону V2, «подпитывают» и увеличивают ее масштаб. Вторая часть потока при разделении на ребре b_2 устремляется вдоль боковой стенки b_2-b_3 и срывается с ребра b_3 . В результате этого формируется интенсивная рециркуляционная вихревая зона V1 высотой $\approx 2h_B$, которая занимает значительную часть области, ограниченной внутренним периметром П-образного здания B. Внешний поток, обтекая зону V1, падает на стенку b_4-b_5 внутреннего периметра здания и вновь разделяется. В результате вторичного разделения часть внешнего потока поднимается вверх вдоль стенки b_4-b_5 и срывается с верхних кромок, что сопровождается возникновением отрывной зоны на крыше здания. Вторая часть потока огибает здание B, что сопровождается срывом вихря с ребра b_5 .

Обтекание внешним потоком структуры $V2$ и здания B как единого целого приводит к сужению области течения между зданиями A и B . Следствием этого становится снижение статического давления и увеличение скорости ветра в «горле» до 20,5 м/с, что приводит к существенному росту давления, вызванного скоростным напором на фасад здания A в зоне $a1$ (рис. 5с). В зоне $a1$ на высоте $\approx 1/2h_b$ возникает растекание потока (рис. 5с–5d), в результате чего одна часть потока образует несимметричный подковообразный вихрь $V5$, а вторая часть уходит вверх, срывается с верхней кромки фасада, образуя отрывную зону $O1$ на верхней кромке здания A . Линии тока из отрывной зоны $O1$ стекают вдоль задней стенки здания A и попадают в рециркуляционную зону $V6$. Одна часть вихря $V5$ попадает в область между зданиями A и C , а вторая часть вследствие воздействия скоростного потока между зданиями A и B оказывается «прижата» к фасадной части здания A . При обтекании потоком фасада сложной формы возникают локальные отрывы $O2$, $O3$. Кроме этого, срыв потока происходит в зоне $O4$, в результате чего вся подветренная часть фасада здания находится в зоне отрицательных давлений.

Стоит отметить, что наличие здания C в непосредственной близости от задней стенки здания A приводит к возникновению эффекта сужения потока, аналогичного описанному выше для зоны между зданиями A и B . Наличие узкой области между зданиями A и C в совокупности с обширной рециркуляционной зоной $V6$ вдоль задней стенки здания A приводит к усилению скорости ветра до 19 м/с. В качестве дополнительных эффектов, не влияющих непосредственно на структуру течения в окрестности здания A , можно указать вихрь $V7$, который формируется при срыве потока с ребра $c2$.

Для получения качественной и количественной оценки давлений на стенах здания A от ветровой нагрузки рассмотрим развертку по поверхности здания безразмерного коэффициента давления C_p (рис. 6а): $C_p = (P_{\text{стат}} - P_0) / (\rho \cdot U_{h_{A,\text{max}}}^2 / 2)$, где $P_0 = 1$ атм, $U_{h_{A,\text{max}}} = 11,3$ м/с — скорость набегающего потока на высоте $h_{A,\text{max}}$.

Как видно из рис. 6а, максимальные положительные коэффициенты давления ($C_p \approx 1,4$) возникают в зоне $a1$ в месте прихода внешнего потока на стенку. Крыша здания имеет особенность — ее плоская поверхность заглублена по отношению к верхнему уровню фасадной части, что приводит к образованию структуры течения, характерной для обратного уступа (холма). Вследствие этого плоская часть крыши здания полностью находится в отрывной зоне, что приводит к возникновению отрицательных давлений. При этом на верхней части фасада над областью $a1$ в зоне отрыва потока $O1$, описанной выше, возникают максимальные по модулю отрицательные коэффициенты давления $C_p \approx -2,3$. Низкие отрицательные коэффициенты давления $C_p \approx -1,3$ также возникают в отрывной зоне $O2$ на купольной части фасада (рис. 6а).

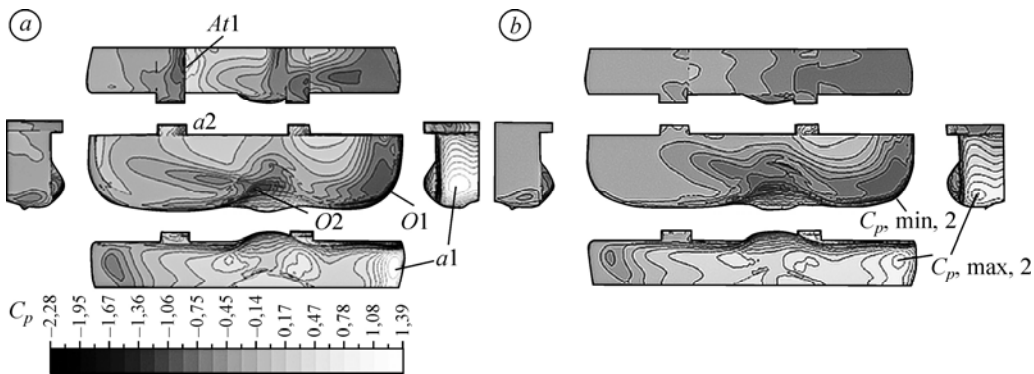


Рис. 6. Развертка коэффициента давления C_p по поверхности здания A , полученная в расчете с учетом аэродинамики окружающих строений (а) и в случае изолированного расположения здания A (б).

$C_{p, \text{max}, 1(2)}$ соответствует максимальным положительным значениям коэффициента давления для конфигураций 1 и 2 соответственно, $C_{p, \text{min}, 1(2)}$ — максимальным по модулю отрицательным коэффициентам давления для этих конфигураций.

Параллельно с расчетами описанной выше конфигурации 1, включающей здания $A-D$, выполнялись расчеты для конфигурации 2, для которой характерные размеры расчетной области, граничные условия на искусственных границах, а также пространственная дискретизация расчетной области вблизи здания A были выбраны идентичными, однако окружающие строения $B-D$ не учитывались. Структура течения вблизи здания A для конфигураций 1 и 2 представлена на рис. 7. Максимальные значения коэффициента давления на здании A возникают в зоне прихода набегающего потока на фасадную часть (рис. 6b, $C_{p,min,2}$). Однако для конфигурации 2 наблюдается смещение области прихода потока к фронтальной части фасада (рис. 7b), что связано с отсутствием препятствия для внешнего потока в виде здания B и отрывной зоны $V2$, описанной выше. Максимальные положительные значения коэффициента давления в этой области для конфигурации 2 существенно ниже по сравнению со значениями C_p для конфигурации 1 и составляют $C_{p,min,2} \approx 0,83$ ($\approx 0,6 C_{p,min,1}$). Максимальные по модулю отрицательные коэффициенты давления для конфигурации 2, наблюдаемые на верхней части фасада (рис. 6b, $C_{p,min,2}$) в зоне отрыва потока, составляют $C_{p,min,2} \approx -1,68$ ($\approx 0,73 C_{p,min,1}$). Кроме того, вся правая половина фасада здания A для конфигурации 2 находится в зоне положительных давлений, в то время как учет интерференционных эффектов между зданиями A и B для конфигурации 1 (рис. 7a) предсказывает наличие отрывной зоны и отрицательных давлений в этой области. На подветренной стороне здания A для второй конфигурации, напротив, наблюдаются только отрицательные давления и отсутствует зона присоединения потока, наблюдаемая для конфигурации 1. В отсутствие здания C отрывная зона охватывает всю подветренную зону (рис. 6b, 7b). При наличии здания C возникает описанный выше эффект сужения потока, что вынуждает поток присоединяться в области $A1$ (рис. 6a) и затем опять отрываться на кромке $a2$ (рис. 6a, 7a).

Сравним полученные численные результаты для конфигураций 1 и 2 с экспериментальными данными [6] по коэффициенту давления C_p . На рис. 8c показана развертка значений C_p , полученных в характерных точках замеров (рис. 8b) в сечении $h_3 = 0,760 h_b$ (рис. 8a) по результатам численных расчетов для конфигурации 2 на сетке 4 (см. таблицу), для конфигурации 1 на различных сетках и из экспериментальных данных. Как видно из рис. 8c, для всех рассматриваемых точек в сечении h_3 наблюдаются отрицательные значения коэффициента давления, что связано с расположением сечения h_3 в отрывной зоне, формирующейся в результате срыва потока при обтекании пологой верхней части фасада.

Для конфигурации 1 получено хорошее количественное согласование с экспериментальными данными [6] для сеток 4 и 5, на более грубых сетках получено хорошее качественное соответствие по C_p с этими же данными. Для конфигурации 2, соответствующей изолированному расположению здания, численное решение на подробной сетке 4 существенно отличается от экспериментальных данных [6]. На рис. 8c видно, что наблюдается описанная выше тенденция к смещению отрывной зоны потока на фасаде к его

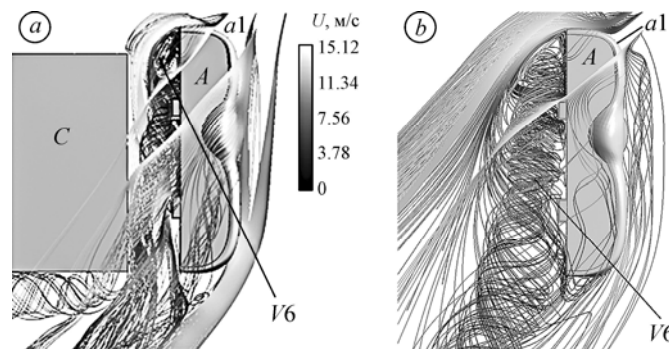


Рис. 7. Структура течения в окрестности здания A в плане, полученная в расчетах для конфигурации 1 (a) и для конфигурации 2 (b).

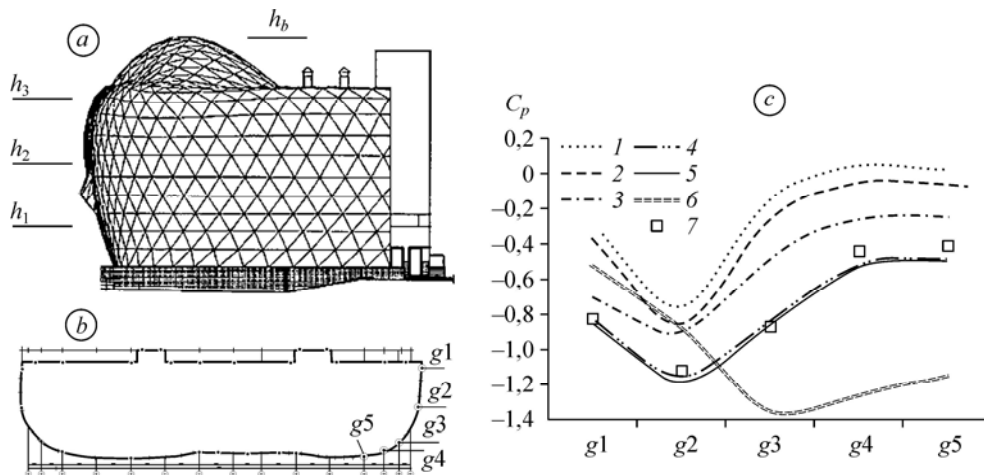


Рис. 8. Схемы расположения по высоте горизонтальных сечений, для которых имеются экспериментальные данные в работе [6] (а), и расположения точек замеров в сечении h_3 , для которых производится сравнение численных и экспериментальных данных по C_p (b); значения коэффициента давления C_p в точках g_1 – g_5 для сечения h_3 , полученные из эксперимента (7) и по результатам численного моделирования для конфигурации 1 (1–5) на сетках 1–5 и для конфигурации 2 (б) на сетке 4 соответственно (см. табл.).

фронтальной части, обусловленному углом прихода потока на фасад. Это позволяет сделать вывод о необходимости учета интерференционных эффектов и взаимодействия с окружающими строениями при моделировании внешней аэродинамики зданий и сооружений.

Кроме того, расчеты для конфигурации 1 показали, что минимальные значения коэффициента давления C_p возникают выше сечения h_3 на острой верхней кромке фасада ($C_{p,\min,1} \approx -2,28$). Таким образом, численное моделирование позволяет существенно дополнить данные эксперимента [6], ограниченного техническими характеристиками аэродинамической трубы и расположением датчиков.

На рис. 9b показаны значения коэффициента давления в характерных точках на купольной части фасада здания А (рис. 9a), полученные на основе экспериментов и по результатам численных расчетов с различной степенью сеточного разрешения для конфигурации 1. Зона купола практически полностью находится в зоне отрицательных давлений, что согласуется с данными эксперимента [6]. Решения, полученные для сеток 4 и 5, являются сеточно независимыми и количественно согласуются с экспериментальными данными.

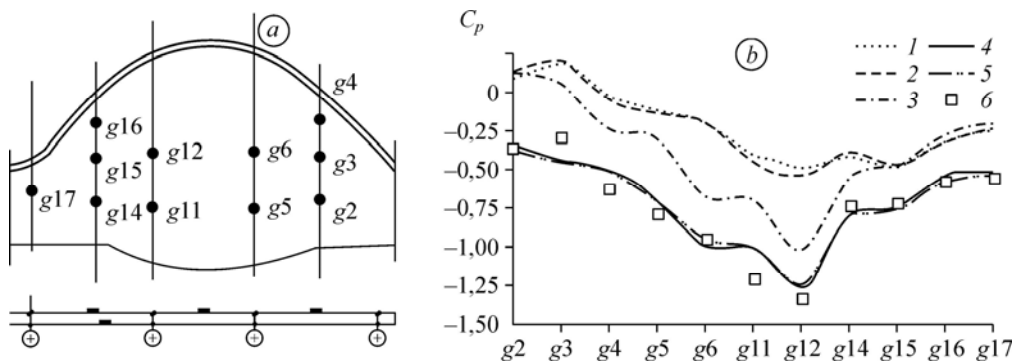


Рис. 9. Расположение точек замеров на купольной части здания А (а) и значения C_p , полученные по экспериментальным данным и расчетам на различных сетках для конфигурации 1 (b).

Конфигурация 1: 1–5 соответствуют сеткам 1–5 (см. табл.), 6 — эксперимент.

Наличие зоны существенных отрицательных давлений на купольной части ($C_p \approx -1,35$) является негативным следствием отрыва потока с купола сложной формы (зона О2, рис. 6а) и в ряде случаев может привести к «выталкиванию» и отрыву стеклянных элементов фасада.

Заключение

В настоящей работе на основе полных физико-математических моделей механики сплошной среды проведено моделирование пространственного турбулентного отрывного течения в окрестности здания сложной формы с учетом окружающей застройки и разрешением вязкого ламинарного подслоя. Исследована трехмерная структура течения в окрестности здания, получены поля параметров течения и распределение коэффициента ветрового давления на его стенках. Дана оценка влияния интерференционных эффектов в течении на характер распределения ветровой нагрузки на здание. Показано, что из-за неравномерности набегающего потока и существования локальных отрывных зон коэффициент давления на поверхностях зданий может быть знакопеременным, что необходимо учитывать при проектировании конструкций фасадов. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по распределению коэффициента давления на стенках здания для двух конфигураций: при расположении здания в застройке и изолированном его расположении. Получено удовлетворительное качественное и количественное согласование с экспериментальными данными для случая расположения здания в застройке. Показано, что влияние интерференционных эффектов в потоке приводит к существенному (более 50 %) увеличению ветровой нагрузки на здание. Результаты расчетов, полученные для случая изолированно расположенного здания, существенно недооценивают максимальные положительные и отрицательные значения коэффициентов ветрового давления, что свидетельствует о необходимости учета аэродинамики окружающей застройки при проектировании.

Авторы выражают благодарность д.т.н. профессору Митасову В. М. за предоставление данных экспериментального исследования [6], а также за ценные консультации в области строительной аэродинамики.

Список литературы

1. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М.: ФГУП ЦПП, 2011. 81 с.
2. Саленко С.Д., Обуховский А.Д., Гостеев Ю.А., Телкова Ю.В. Исследование структуры течения в окрестности двух балок квадратного поперечного сечения в условиях интерференции // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. № 2. С. 313–323.
3. Кошин А.А., Коробков С.В., Гныря А.И., Терехов В.И. Моделирование вихревой структуры и ветровых нагрузок при нелинейном расположении двух квадратных призм // Сб. докл.: Всеросс. конф. «XXXI Сибирский теплофизический семинар», посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2014. С. 78–84.
4. Вальгер С.А., Федоров А.В., Федорова Н.Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18, № 5. С. 27–40.
5. Вальгер С.А., Федоров А.В., Федорова Н.Н. Структура турбулентного отрывного течения в окрестности установленной на пластине призмы с квадратным сечением // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 1. С. 29–42.
6. Научно-технический отчет о проведении физического эксперимента на модели здания «Центр коллективного пользования УК Биотехнопарк, ООО». Новосибирск, 2013. 78 с.
7. Blazek J. Computational fluid dynamics: principles and applications. Elsevier, 2005. 465 p.
8. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. Vol. 32, No. 8. P. 1598–1605.
9. Kato M., Launder B.E. The modelling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders // Ninth Symp. on «Turbulent Shear Flows», Kyoto, Japan, August 16–18, 1993. P. 10–14.
10. Chorin A.J. Numerical solution of Navier-Stokes equations // Mathematics of Computation. 1968. P. 745–762.
11. Mochida A., Tominagaa Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R. Comparison of various $k-\epsilon$ models and DSM applied to flow around a high-rise building — report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment // Wind and Structures. 2002. Vol. 5, No. 2–4. P. 227–244.

Статья поступила в редакцию 28 января 2016 г.