

# Экспериментальное определение ветровой нагрузки, напряженно-деформированного состояния и колебаний рекламного сооружения

Г. Н. ШМЕЛЕВ, канд. техн. наук, доцент

М. В. КОЗЛОВ, инж.

В. П. КРУПИН, аспирант

(Казанский гос. архит.-строит. ун-т)

Развитие компьютерных технологий и прикладных программных комплексов (SFX, Fluent, Star SD, Aer-EcoPlate, AnSys, Лира, Scad, MicroFe и др.) в области расчета строительных конструкций и CFD (Computer Fluid Dynamic) позволяют более подробно (относительно нормативных требований [1, 2]) смоделировать ветровое воздействие и определить реакцию сооружения. Однако возникает вопрос о достоверности результатов моделирования и соответствия их действительной работе.

Для определения действительной работы сооружений на ветровую нагрузку авторами статьи был проведен комплексный эксперимент на примере рекламного сооружения (РС) высотой  $H = 8$  м с размером рекламной поверхности (РП)  $b \times h = 3 \times 6$  м ( $b$  — ширина,  $h$  — высота), включавший в себя три этапа:

- первый — численное моделирование ветровой нагрузки в реальной городской застройке;
- второй — определение распределенных и интегральных параметров ветровой нагрузки на модели в аэродинамической трубе;
- третий — нахождение распределенных параметров ветровой нагрузки, напряженно-деформированного состояния (НДС) основных несущих элементов и параметров колебаний для эксплуатируемого в городской застройке РС (параметры местности по [1]: тип — А, ветровой район — II).

Первый этап эксперимента выполнялся на созданном в ВВИА им. Н. Е. Жуковского ПК «AerEcoPlate», в котором реализуется метод дискретных вихрей (МДВ) с решением пространственной задачи в нестационарной нелинейной постановке. В качестве результатов численного моделирования рассматривалось изменение

показателей:  $c_e$  — коэффициента аэродинамического сопротивления;  $e_a$  — относительного эксцентриситета приложения вектора полной аэrodинамической силы (ПАС),  $e_a = e/b$ , где  $e$  — эксцентриситет приложения

вектора ПАС относительно центра РП); характера распределения давления по поверхности РС и схемы обтекания РС. Ветровую нагрузку моделировали для РС: отдельно стоящих (рис. 1a); расположенных группой (рис. 1b); расположенных рядом со зданием (рис. 1b).

Результаты численного эксперимента для отдельно стоящего РС и РС, расположенных группой (РС1, РС2), приведены на рис. 2. Из графиков следует, что максимальные значения аэродинамических характеристик для отдельно стоящего РС зафиксированы:  $c_e$  при  $\alpha = 45^\circ$  и  $e_a$  при  $\alpha = 15^\circ$ , что обусловлено нестационарным отрывным обтеканием.

Рис. 1. Рассматриваемые схемы РС

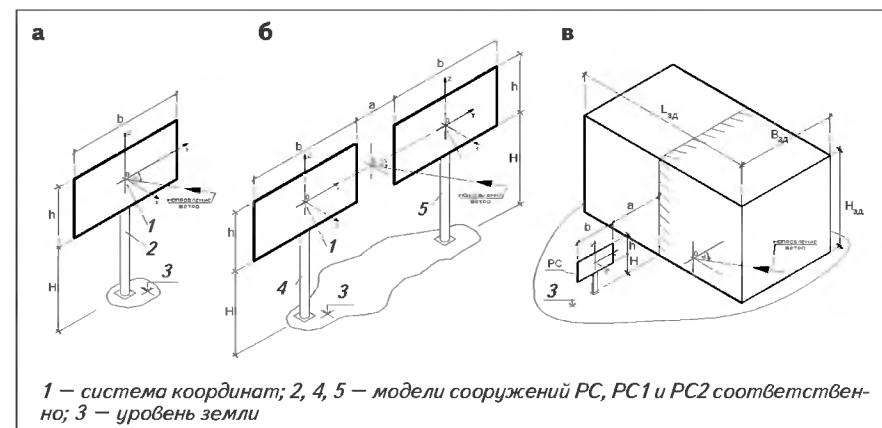
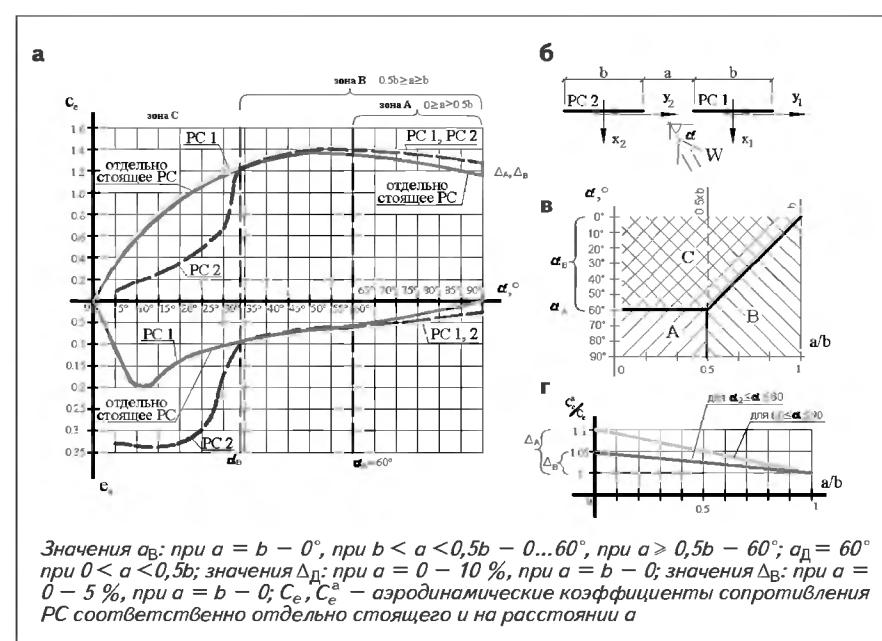
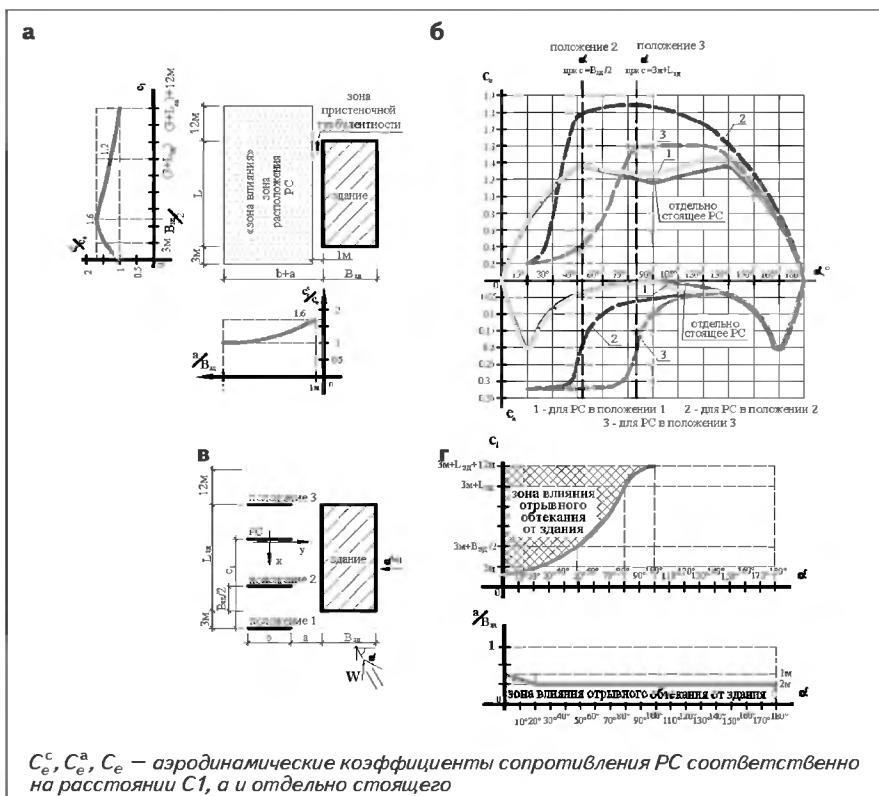


Рис. 2. Изменение  $c_e$  и  $e_a$  для отдельно стоящего РС В зависимости от  $\alpha$  и для РС, расположенных группой, в зависимости от  $\alpha$  и  $a$





$C_d^c$ ,  $C_a^c$ ,  $C_e$  – аэродинамические коэффициенты сопротивления РС соответственно на расстоянии  $C1$ ,  $a$  и отдельно стоящего

Сравнение результатов моделирования ветровой нагрузки на РС, расположенных группой, и на отдельно стоящее РС (см. рис. 2а) позволяют выделить характерные зоны изменения  $c_e$  и  $e_a$  для РС1 и РС2 в зависимости от расстояния  $a$  между ними и направления ветра  $\alpha$  (см. рис. 2б).

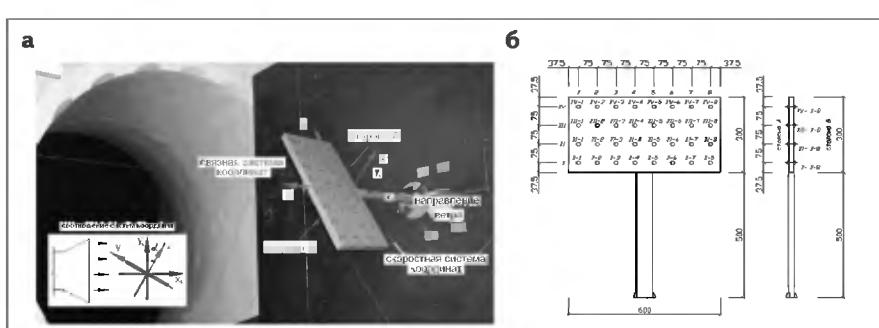
**Зона А:**  $(0 < \alpha < 0,5b$  и  $90^\circ \geq \alpha \geq \alpha_A = 60^\circ$ , где  $\alpha_A$  – критическое направление ветра действия зоны А) – увеличение  $c_e$  до 10 % и  $e_a$  до 0,1 относительно значений отдельно стоящего РС. Изменение  $c_e$  в зависимости от расстояния  $a$  имеет линейный характер (см. рис. 2г). Режим обтекания носит нестационарный турбулентный характер с периодическим отрывом ветра от внутренних смежных и наружных граней РС1 и РС2.

**Зона В** ( $0,5b \leq \alpha \leq b$  и  $90^\circ \geq \alpha \geq \alpha_B$ , где  $\alpha_B$  – критическое направление ветра действия зоны В имеет переменное значение в интервале  $90^\circ \geq \alpha_B \geq 60^\circ$ ) – увеличение  $c_e$  до 5 % без изменения  $e_a$  относительно значений отдельно стоящего РС. Изменение  $c_e$  в зависимости от расстояния между РС  $a$  имеет линейный характер (см. рис. 2г). Режим обтекания соответствует зоне А.

**Зона С** – значения  $c_e$  и  $e_a$  для первого по направлению потока РС1 соответствуют аэродинамическим характеристикам отдельно стоящего РС, а для второго РС2 наблюдается резкое падение  $c_e$  до нулевого значения и рост  $e_a$  до значения  $e_a \approx 0,35$ . Режим обтекания носит нестационарный турбулентный характер, при этом для РС1 он соответствует отдельно стоящему РС, а РС2 находится в зоне отрывного обтекания РС1.

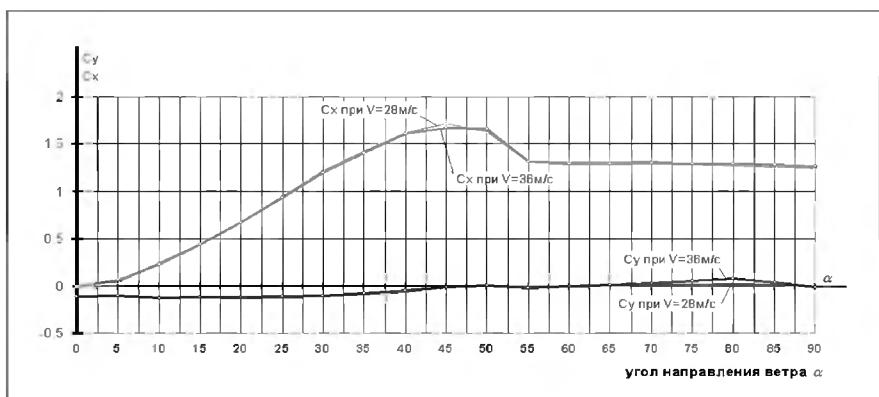
Из приведенных зависимостей следует, что аэродинамические характеристики РС, расположенных группой, зависят от расстояния  $a$  и направления ветра  $\alpha$ . Максимальные значения  $c_e$  наблюдаются для  $0 < a \leq 0,5b$  при направлении ветра  $\alpha = 60^\circ$  (с коэффициентом 1,1 относительно отдельно стоящих РС); для  $0,5b < a \leq b$  – при  $\alpha = 45^\circ$  (с коэффициентом 1,05 относительно отдельно стоящих РС).

На рис. 3 приведены зависимости  $c_e$  и  $e_a$  для отдельно стоящего РС и РС, расположенного в зоне влияния рядом стоящего здания, при  $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ .



**Рис. 4.** Второй этап эксперимента в аэродинамической трубе

**Рис. 5.** Результаты эксперимента в аэродинамической трубе (интегральные характеристики)



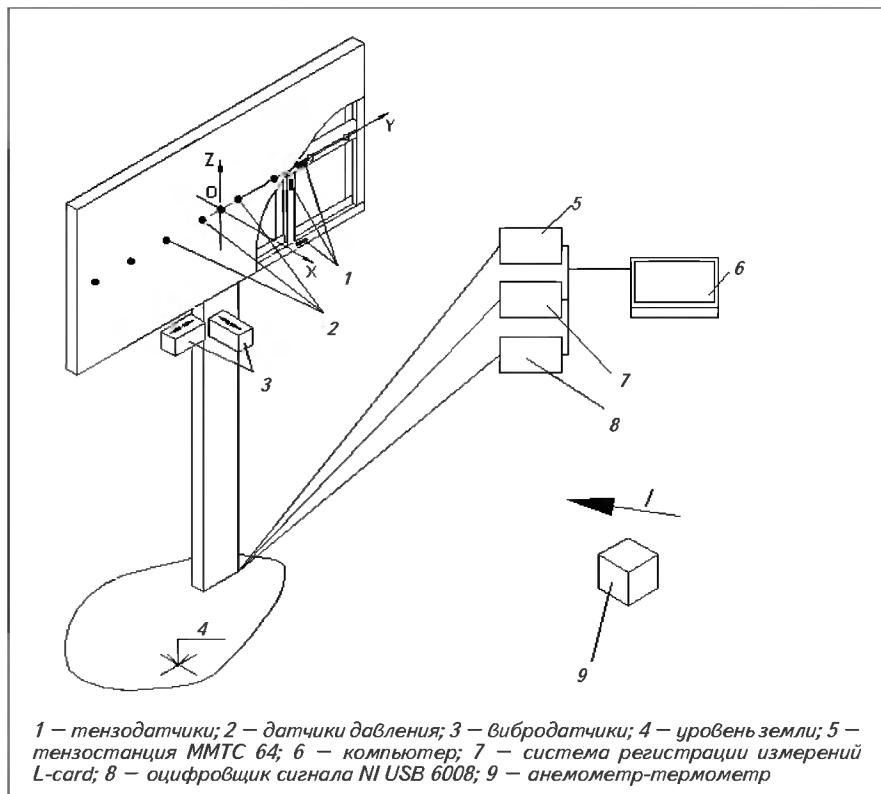
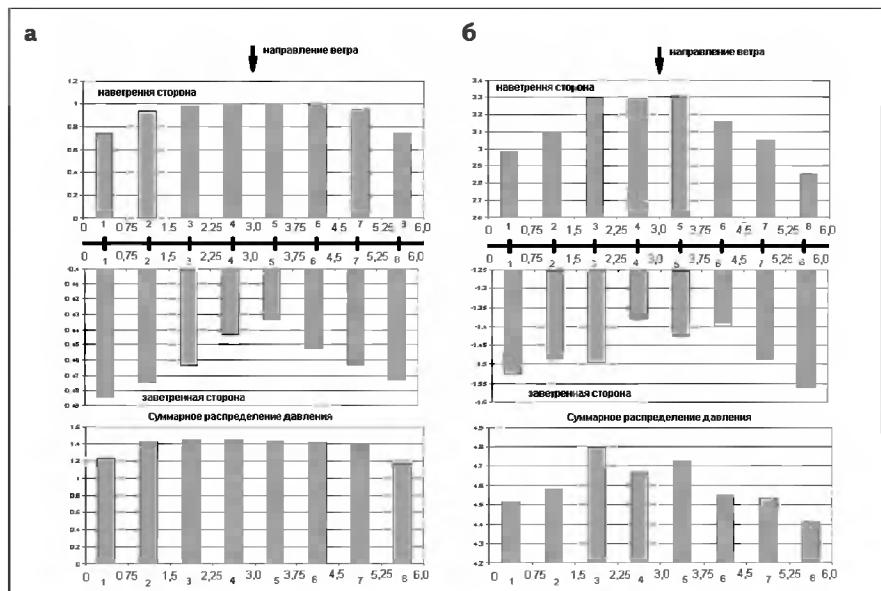


Рис. 6. Принципиальная схема третьего этапа эксперимента

180°. В результате численного моделирования определен размер зоны влияния, а также выявлена зона пристеночной турбулентности потока ветра вдоль здания шириной 1 м, в которой  $c_e$  и  $e_a$  имеют переменные значения в интервале  $c_e = \pm 0,1$  и

$e_a \approx 0,35$ . Размер здания принимался:  $B_{\text{зд}} = 12 \text{ м} \times L_{\text{зд}} = (24 \dots 48) \text{ м}$ .

Изменение  $c_e$  в зависимости от расстояний  $a$  и  $c_1$  изображено на рис. 3а, из которого видно, что максимальное значение  $c_e$  наблюдается при значениях  $c_1 = 3 + B_{\text{зд}}/2$  м и

Рис. 7. Сравнение зарегистрированного давления ветра на втором и третьем этапах эксперимента при  $\alpha = 90^\circ$  в аэrodинамической трубе (а) и в натурных условиях (б)

$a = 1 \text{ м}$ . На рис. 3б показан характер изменения  $c_e$  и  $e_a$  в зависимости от направления ветра  $\alpha$  для РС, расположенного в зоне влияния здания на различных расстояниях  $c_1$ . Так, для положения 1 ( $c_1 = 0$ ) выявлено незначительное увеличение  $c_e$  и  $e_a$  при  $90^\circ > \alpha > 130^\circ$ . Увеличение  $c_1$  до положения 2 ( $c_1 = 3 + B_{\text{зд}}/2$ ) приводит к увеличению  $c_e$  и  $e_a$  до направления ветра с предельным  $\alpha \approx 50^\circ$ , где РС попадает в зону влияния отрывного обтекания от здания, в которой  $c_e = \pm 0,1$  и  $e_a \approx \pm 0,35$ . Дальнейшее увеличение  $c_1$  приводит к уменьшению  $c_e$  и предельного значения  $\alpha$  (кривая 3, рис. 3б). Значения угла направления ветра  $\alpha$  в зависимости от  $a$  и  $c_1$  приведены на рис. 3г.

Из изложенного следует, что аэродинамические характеристики РС, расположенного рядом со зданием, существенно зависят от расстояний  $a$ ,  $c_1$  и направления ветра  $\alpha$ . Максимальные значения  $c_e$  соответствуют положению 2 (рис. 3б, в) при направлении ветра  $\alpha \approx 90^\circ$  с коэффициентом 1,6 относительно отдельно стоящих РС.

При проведении второго и третьего этапов были рассмотрены следующие задачи, совершенствующие методику эксперимента:

- выбор системы и программы регистрации параметров ветровой нагрузки, НДС элементов и частот колебаний для модели в аэродинамической трубе и РС, эксплуатируемых в городской застройке (второй и третий этапы);
- выбор критериев сравнения результатов эксперимента по всем трем этапам.

Второй этап эксперимента выполнялся в аэродинамической трубе закрытого типа конструкции Прандтля с короткой рабочей частью на модели РС в масштабе 1:10 с установлением геометрических, кинематических и динамических критериев подобия. В процессе эксперимента изменяли аэродинамические характеристики РС в скоростной и связной системах координат (рис. 4а) при двух скоростях потока в трубе  $V_1 = 28 \text{ м/с}$ ,  $V_2 = 36 \text{ м/с}$  с помощью батарейного манометра (для распределенных параметров) и рычажных аэродинамических весов с цифровым обеспечением (для интеграль-

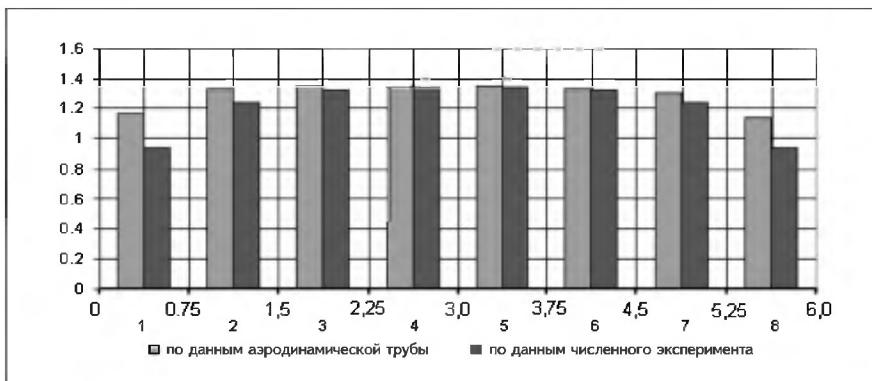


Рис. 8. Результаты сравнения данных первого и второго этапов эксперимента

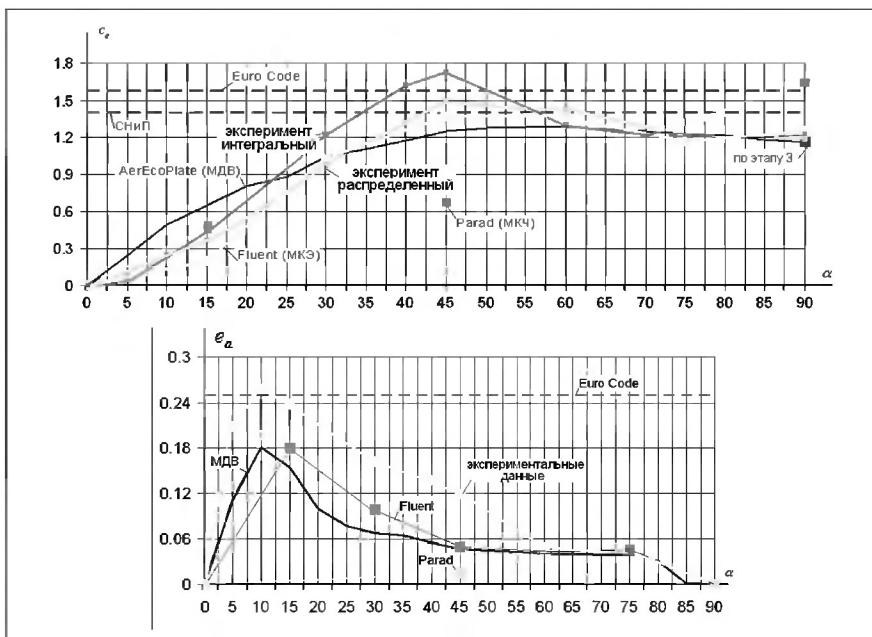


Рис. 9. Результаты сравнения данных по всем трем этапам

ных параметров). Распределенные параметры (давление на РП) регистрировали методом дренажа модели с наветренной и заветренной сторон РП модели РС (рис. 4б).

Значения аэродинамических характеристик  $c_x = c_e$  (для численного эксперимента) и  $c_y$  в зависимости от направления ветра  $\alpha$  (интегральные характеристики) приведены на рис. 5. Учитывая, что характер зависимостей при разных скоростях практически совпадает, можно судить о достоверности результатов испытаний.

При выполнении третьего этапа эксперимента (на реальном объекте в городской застройке) параметры фиксировали единовременно на всех системах измерения (рис. 6) в режиме реального времени:

- для ветровой нагрузки — с помощью блока NI6008 на базе системы измерений National Instruments (США) и датчиков давления DC002NGR4 (Honeywell, США);
- для НДС основных несущих элементов — с помощью тензоизмерительной системы ММТС 64.01 (г. Новосибирск) и тензодатчиков опытного завода ЦНИИСК (Москва);
- для параметров колебаний — с помощью системы измерений L-card (Москва) и индукционных вибродатчиков ВЭГИК (Москва).

Сопоставление результатов зарегистрированного давления ветра для второго и третьего этапов эксперимента приведены на рис. 7.

Зарегистрированные значения НДС и параметров колебаний реального

РС сравнивали с данными, полученными на ПК «Лира» (ветровая нагрузка принималась по данным численного эксперимента). Результаты показывают удовлетворительную сходимость для НДС элементов в пределах 7 %, для 1-й собственной частоты в пределах 1 %.

Распределенные характеристики по давлению ветра для первого и второго этапов эксперимента приведены на рис. 8.

Результаты сравнения аэродинамических характеристик по всем трем этапам с нормативными требованиями [1, 2] и численными расчетами приведены на рис. 9.

Подводя итоги комплексного эксперимента, можно сделать следующие выводы:

1. Качественные и количественные результаты численного моделирования средней составляющей ветровой нагрузки удовлетворительно соответствуют результатам эксперимента в аэродинамической трубе и определению ветровой нагрузки в городской застройке, причем в зоне несущественного влияния отрывных обтеканий погрешность составляет 5 %, а в зоне существенного влияния — 20 % (см. рис. 9).

2. Зарегистрированные параметры состояния (НДС основных элементов и частоты колебаний) РС в городской застройке соответствуют результатам расчетных данных с отклонением для НДС в пределах 7 %, для 1-й собственной частоты колебаний — 1 %.

3. Можно говорить о максимальных значениях аэродинамических характеристик для отдельно стоящих РС при  $\alpha = 45^\circ$ ,  $c_e = 1,57$  и  $\alpha = 15^\circ$ ,  $e_a = 0,26$ . Максимальное увеличение  $c_e$  для РС, расположенных группой, проявляется при расстоянии между ними  $a = 0,5b$  с коэффициентом 1,1, а для РС, расположенных рядом со зданием, при расстоянии между зданием и РС  $a = 1$  м,  $c_1 = 3 + B_{3d}/2$  м с коэффициентом 1,6.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия.
2. Eurocode 1: Basis design and action on structures. Part 2-4: «Wind action». ENV 1991-2-4, CEN, 1994. 154 р.