

ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГРУППУ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

NUMERICAL AND PHYSICAL SIMULATION OF WIND IN- FLUENCE ON GROUP OF HIGH-ALTITUDE BUILDINGS

**С.В.Гувернюк¹, О.О.Егорычев², С.А.Исаев²,
Н.В.Корнев³, О.И.Поддаева².**

**S.V.Guvernnyuk¹, O.O.Egorichev², S.A.Isaev²,
N.V.Kornev³, O.I.Poddaeva².**

¹НИИ механики МГУ, ²МГСУ, ³Университет Ростoka

Обсуждаются результаты численного и физического моделирования взаимодействия ветрового потока с двумя последовательно расположенными высотными сооружениями.

Results of numerical and physical simulation of interaction of a wind stream with two consistently located high-altitude constructions are discussed.

Введение. Проблемы строительной аэродинамики [4], связанные с ветровым воздействием на высотные сооружения, продолжают оставаться актуальными. Развитие мезомасштабных моделей окружающей среды, разработка многоблочных вычислительных технологий и пакетных технологий под многопроцессорные параллельные платформы [3] позволяет поставить и решить комплекс задач о взаимодействии ветрового потока с группой препятствий, усовершенствовать сложившиеся подходы к анализу отрывных течений несжимаемой вязкой жидкости [2,5]. Особую важность представляет верификация математических и дискретных моделей турбулентного отрывного обтекания высотных сооружений, созданного программного обеспечения на базе сравнения численных прогнозов с экспериментальными данными испытаний рассматриваемых объектов в аэродинамических трубах. Оценка осредненных и пульсационных, локальных и интегральных нагрузок на сооружения сочетается с детальным анализом нестационарного процесса пространственного вихреобразования с акцентом на учет влияния аэродинамической интерференции тел.

Приоритетным направлением современной промышленной аэромеханики является моделирование турбулентности и совершенствование мезомасштабных моделей окружающей среды. В минувшее десятилетие указанные темы получили развитие в сочетании с разработкой многоблочных вычислительных технологий и пакета VP2/3 (скорость-давление, двумерная и трехмерная версии) [5]. Их достоинством является способность улавливать разномасштабные элементы структуры отрывного течения с помощью перекрывающихся сеток простой топологии соответствующего масштаба. В результате достигается не только значительная экономия вычислительных ресурсов, но и повышение

точности решения за счет размещения густых сеток в желательных местах (определяемых интерактивно).

Актуальной представляется проблема адаптации подхода и оценка степени достоверности вычислительной технологии URANS (на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса) для решения задач аэродинамики строительных сооружений и, в частности, определения осредненных и пульсационных характеристик ветрового воздействия на высотные здания. Следует подчеркнуть важный методический принцип корректного применения вычислительных технологий в строительной аэродинамике. С одной стороны, в силу ряда объективных причин исходные предположения математической постановки задачи имеют неизбежные отличия от реальных условий ветрового воздействия на строительные сооружения (одна из главных проблем связана с трудностями адекватного задания параметров пространственной и временной порывистости реальных ветров). Поэтому соответствующие корректные численные решения не всегда могут быть непосредственно пригодны для практического применения в инженерных прогнозах ветровых нагрузок. С другой стороны, совершенно недопустима распространившаяся в последнее время среди пользователей универсальных коммерческих пакетов типа CFX практика непрофессиональной трактовки «численных решений», полученных без соблюдения необходимых условий достоверности процедуры численного решения соответствующих математических краевых задач. К таким псевдонаучным приемам относятся попытки получения стационарных «решений» задачи обтекания плохообтекаемых тел, «методы» использования расчетных полей кинетической энергии турбулентности для оценок пульсаций давления на фасадах зданий и т.д.

Постановка задачи, методы решения. Группа зданий моделируется парой прямоугольных параллелепипедов I и II, расположенных друг за другом на горизонтальном основании так, что их общая вертикальная плоскость симметрии параллельна направлению набегающего ветрового потока, а наветренные фасады «1-2» и «5-6» перпендикулярны вектору скорости потока (рис. 1, а). Расстояние между зданиями равно L , высота первого корпуса – H_I , второго – H_{II} .

Невозмущенный воздушный поток предполагается равномерным с постоянной скоростью U , за исключением пограничного слоя толщиной δ на подстилающей поверхности. В качестве характерного линейного размера принята ширина a наветренной грани «1-2» первого корпуса. Число Рейнольдса $Re = aU/\nu$; время t нормируется на $t_0 = a/U$, продольная и поперечная силы ветрового воздействия отнесены к $\rho U^2 a^2$. Здесь ρ – плотность, ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха.

Взаимодействие системы тел с ветровым потоком исследуется методами физического и вычислительного экспериментов. В данной работе результаты экспериментов и расчетов представлены для одного варианта соотношений линейных размеров конструкции (таблица 1 соответствует рис. 1, все линейные величины отнесены к a). Число Рейнольдса и толщина турбулентного пограничного слоя в эксперименте – $Re = 4.3 \cdot 10^5$ и $\delta = 0.3$, в расчете – $Re = 10^5$ и $\delta = 1.0$.

Таблица 1

«1-2», «3-4»	«2-3», «1-4»	H_I	L	«5-6», «7-8»	«6-7», «5-8»	H_{II}
1	0.87	2.77	1.86	0.99	0.86	3.09

Физические эксперименты проведены в аэродинамической трубе А-6 НИИ механики МГУ [1]. Ширина a наветренного фасада корпуса I составляла

215 мм, степень загромождения поперечного сечения рабочей части аэродинамической трубы моделями зданий не превышала 2%. Скорость потока U варьировалась от 5 до 35 м/с, при $U > 25$ м/с наблюдалась автомодельность по числу Рейнольдса, основная серия измерений выполнена при $U = 30$ м/с. Измерялись поверхностные распределения давления на всех фасадах первого и второго корпусов (рис.1,а), по ним находились средние и пульсационные значения коэффициента давления C_p , а также характерные частоты в спектрах колебаний этой величины (дренажные точки располагались равномерно на срединной вертикальной линии всех боковых граней тел I-II по 4 на каждой).

Вычислительные эксперименты выполнены с помощью компьютерной технологии VP2/3 [5]. Движение турбулентных воздушных потоков описывается в рамках модели URANS для вязкой несжимаемой жидкости. Многоблочная расчетная сетка состоит из четырех разномасштабных фрагментов (рис.1,б): двух прямоугольных и двух криволинейных, согласованных с контурами тел. Острые кромки тел скруглены с радиусом 0.05. Внешняя сетка со сгущением ячеек к плоской стенке разделяет на контрольные объемы внешнюю расчетную область, внутри которой располагаются тела. Внутренняя сетка с более мелкими ячейками располагается в подобласти, окружающей параллелепипеда, а также простирающейся в зону ближнего следа. Прилегающие к телам криволинейные сетки (рис.1,в) настроены на разрешение пограничных слоев вдоль поверхности омываемых тел. Всего в расчетной области содержится около миллиона ячеек сетки. Хорошее разрешение пристеночной области течения за счет введения отдельной мелкой сетки позволяет без существенных затруднений использовать низкорейнольдсовые модели турбулентности, в данном случае – модель переноса сдвиговых напряжений Ментера (MSST). Введение дополнительной сетки, связанной с той или иной гидродинамической (или физической) особенностью течения (поля характеристик), настройка ее на соответствующий масштаб осуществляются в ходе получения предварительного решения. Количество таких локальных дополнительных сеток в пакете VP2/3 может быть любым, с помощью средств объектно-ориентированного программирования осуществляется автоматическое установление связей между ними. Визуализация расчетных пространственных вихревых структур осуществляется изоповерхностями скалярной величины W , равной разнице квадратов модуля тензора скоростей деформаций и модуля завихренности.

Обсуждение результатов. Характерной особенностью рассматриваемого трехмерного течения является формирование глобальной отрывной области между зданиями, причем наблюдается корреляция эволюции вихревых структур (рис.2) и колебаний поперечной силы R_z (рис.3,а): глобальная фрагментация вихревой пелены с отрывом крупномасштабных вихрей происходит в моменты, когда поперечная сила обращается в ноль. Изолинии величины $W = -0.1$ построены на рис. 2 в последовательные моменты времени $t = 200.6$ (а), 202.2 (б), 203.2 (в), 204.4 (г), 206 (д), 207.6 (е), 208.6 (ж), 209.8 (з). Число Струхала $Sh = a \Omega / U$ определяется по данным на рис.3, оно приближенно равно 0.1 (Ω – частота колебаний поперечной нагрузки R_z).

В эксперименте силы непосредственно не измерялись, однако о характере изменения поперечной силы R_z можно судить по разности давлений на боковых гранях. На рис. 4,а построена зависимость $F_z(t)$, полученная по экспериментальным значениям давления на боковых гранях «5-8» и «6-7» (рис.1,а) следующим образом: определяются мгновенные средние значения коэффициентов давления $C_{p(5-8)}$ и $C_{p(6-7)}$ на каждой грани, затем их половинная разность умножается на относительную площадь грани, в результате получаем

$F_z(t) = 1.33 (C_{p(6-7)} - C_{p(5-8)})$. В случае большого числа дренажных точек на гранях тела величина $F_z(t)$, очевидно, стремится к значению боковой силы $R_z(t)$. В данном эксперименте дренажные точки были только в срединных сечениях граней, поэтому зависимость $F_z(t)$ (рис.4,а) лишь приближенно отражает характер изменения боковой силы R_z . Тем не менее, видно, что как и в расчете (рис.3,а) имеются выраженные колебания боковой силы, причем с той же самой частотой, соответствующей числу Струхала $Sh = 0.1$.

Расчетные продольные нагрузки R_{xI} , R_{xII} , действующие на корпуса I и II по линии ветрового потока, практически стационарные, однако имеют разные знаки: $R_{xI} > 0$, $R_{xII} < 0$ (рис.3,б). При этом второй корпус испытывает не сопротивление, а значительную по величине тянущую силу, направленную против потока, что является одним из проявлений эффекта аэродинамической интерференции при совместном обтекании тел [2]. Наличие тянущей силы подтверждается экспериментальными данными. На рис. 4,б построено распределение осредненного по времени коэффициента перепада давления $\Delta C_p(y)$ между сходственными точками на гранях «5-6» и «7-8» корпуса II (рис.1,а), очевидно, такое распределение перепада давления порождает тянущую силу $R_{xII} < 0$.

На рис.5 сравниваются расчетные кривые и экспериментальные точки по распределению стационарной составляющей коэффициента давления $C_p(y)$ на боковых (а) и задней (б) гранях корпуса II. Поскольку осреднение расчетных данных проводилось лишь на одном периоде колебаний боковой силы, наблюдаются некоторые различия C_p на гранях «5-8» и «6-7».

В целом можно отметить количественное и качественное согласие численных прогнозов и данных измерений, что свидетельствует о приемлемости подхода URANS и применимости пакета VP2/3.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России» (проект 2009_1.5_000-010) и РФФИ (проект 11-01-00032).

Литература на русском языке

1. Аэродинамические установки Института механики Московского университета. Под ред. Г.Г. Черного, А.И. Зубкова, Ю.А. Панова. – М.: Изд-во МГУ, 1985.
2. Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. – Л.: Судостроение, 1989.
3. Егорычев О.О., Исаев С.А., Гувернюк С.В., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Разработка и применение многоблочных вычислительных технологий и мезомасштабных моделей окружающей среды для решения задач строительной аэродинамики // Сб. тр. Второй науч.-практ. конф. «Теория и практика расчета зданий, сооружений и элементов конструкций. Аналитические и численные методы». – М., МГСУ, 2009. С.127-138.
4. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения – М., Стройиздат, 1984.
5. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под редакцией А.В. Ермишина и С.А. Исаева. – М.: МГУ, 2003.

Ключевые слова на русском языке: вычислительная аэродинамика, ветер, строительные сооружения, нагрузки, пакетные технологии, уравнения Рейнольдса, модели турбулентности,

Ключевые слова на английском языке: computational aerodynamics, wind, building construction, loads, package technologies, Reynolds equations, model of turbulence

Почтовый адрес авторов:

119899, Москва, Мичуринский проспект дом.1

192283, Санкт-Петербург, ул. Купчинская, 30,4,104

Fahnenstrasse, 4, 18057, Rostock, Germany

Телефон/факс авторов:

495-939-32-66

812-771-03-11

491744279801

e-mail авторов:

guyv@imec.msu.ru

isaev3612@yandex.ru

nikolai.kornev@uni-rostock.de

Рецензент: Береславский Эдуард Наумович, доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

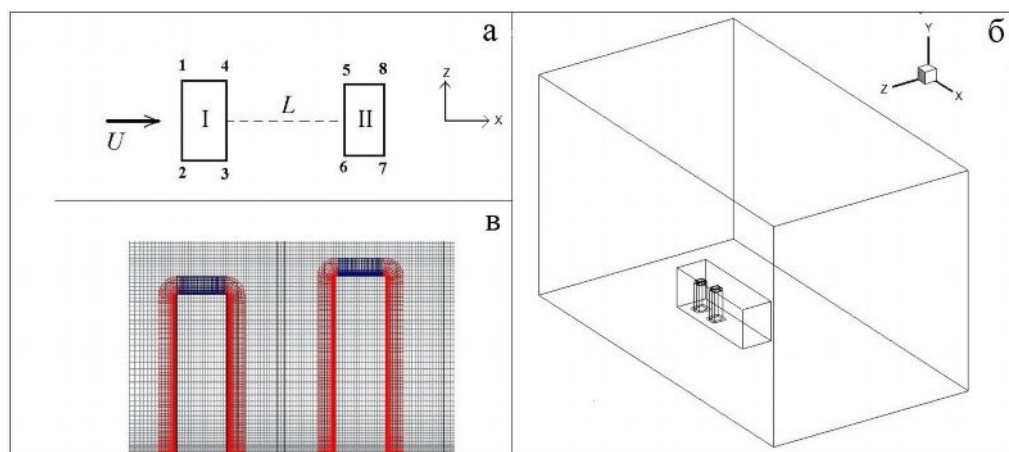


Рис.1.

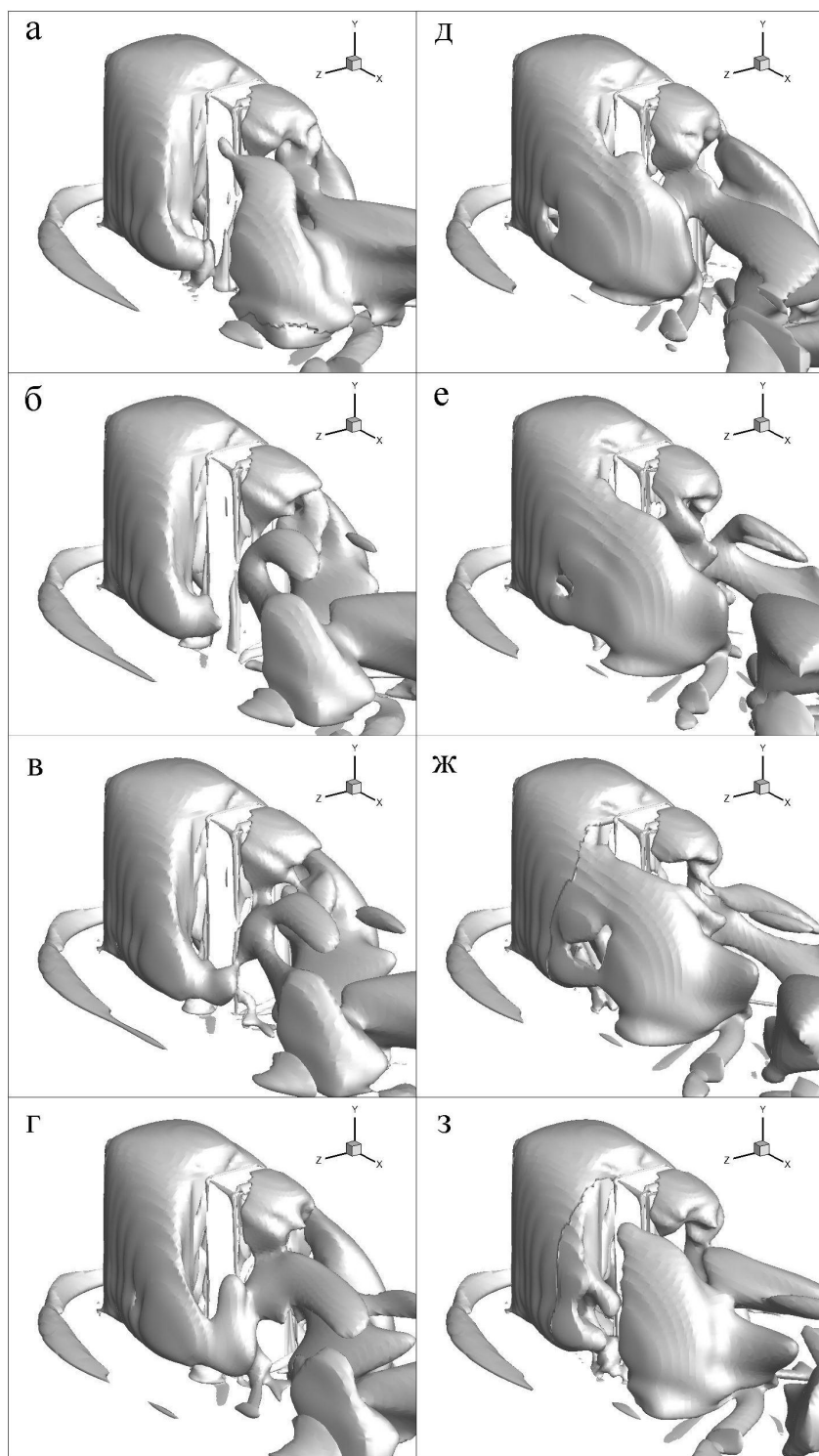


Рис.2.

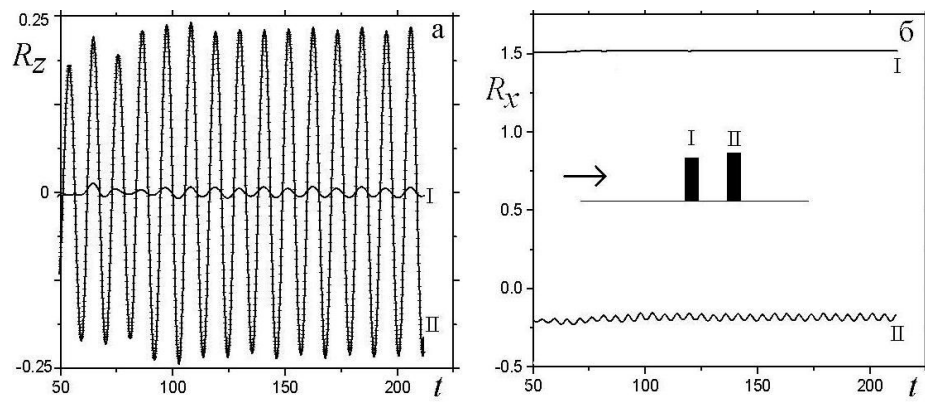


Рис.3.

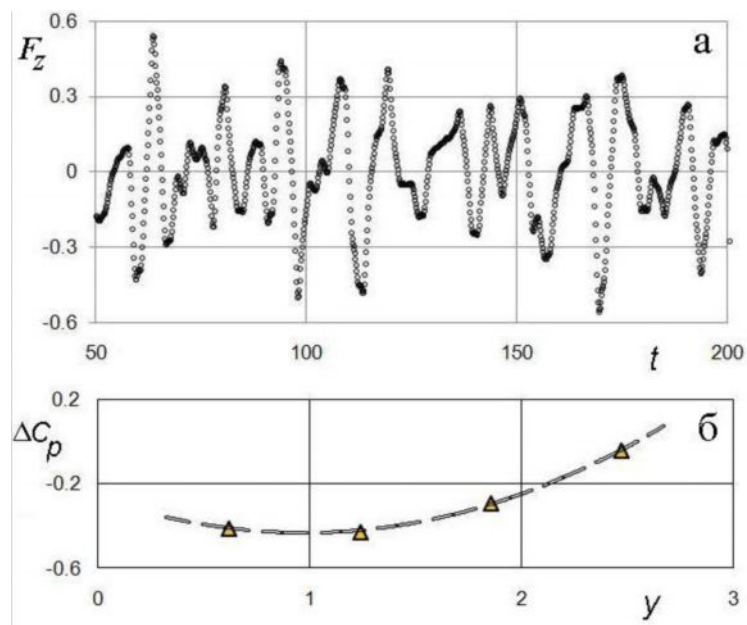


Рис.4.

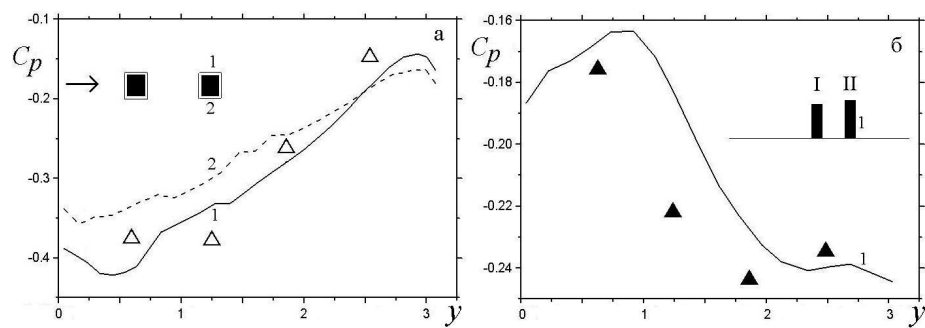


Рис.5.