

Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS

Д.ф.-м.н., профессор С.А. Исаев;*

д.т.н., профессор Н.И. Ватин,

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;

программист П.А. Баранов;

д.т.н., главный конструктор А.Г. Судаков,

ОАО Аккумуляторная компания «Ригель»;

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник А.Е. Усачов,

ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского;

д.т.н., профессор В.В. Егоров,

ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения

Ключевые слова: высотные здания; ветровое воздействие; нестационарное обтекание; силовые нагрузки; пульсации; расчеты; верификация; многоблочные сетки; модели турбулентности; URANS; пакет программ

С начала 1990-х гг. развитие мезомасштабных моделей приземного ветрового потока с учетом орографии местности было сосредоточено на прогнозировании характеристик опасного сдвига ветра в районе аэропортов, в частности, аэропорта «Пулково» [2]. Модели основывались на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замыкаемых с помощью полуэмпирических моделей турбулентности [3-5].

К концу 90-х годов XX века предложенная концепция многоблочных вычислительных технологий, базирующихся на разномасштабных пересекающихся сетках, была успешно применена к моделированию вентиляции автомобильных тоннелей [6]. В последние годы многоблочная вычислительная методология используется для расчета ветрового воздействия на строительные сооружения, в том числе ансамбли зданий [7,8]. Следует отметить, что применение универсальных пакетов прикладных программ типа CFX (Fluent) для численного решения задач строительной аэродинамики [9] не всегда дает адекватные результаты, что может привести к неоправданному решению отказаться от физического эксперимента. Несомненно, что для верификации результатов численного моделирования обтекания сооружений должны проводиться точечные физические эксперименты.

Объект исследования и расчетная методология

Ветровое воздействие на здание представляется как взаимодействие развивающегося вдоль поверхности невозмущенного равномерного потока с расположенной на стенке моделью высотного сооружения. Физическим аналогом задачи является размещение в рабочей части аэродинамической трубы участка земной поверхности с моделью здания. В качестве допустимого предположения принимается, что поверхность плоская, а здание имеет форму параллелепипеда с выбранным характерным размером – шириной, удлинением 0.5 и высотой 2 (рисунок 1). Рассматриваемый участок земной поверхности и зона над ним должны иметь весьма протяженные размеры, чтобы возмущения от здания не оказывали влияния на входные граничные условия, а расстояния от здания до выходной, верхней и боковых границ были достаточными, чтобы поведение потока в их окрестности не влияло на поле течения около сооружения. Подбор размеров области решения задачи осуществляется в численных экспериментах.

Толщина пограничного слоя на входной границе задается в долях характерного размера и принимается равной 0.5. Число Рейнольдса, определенное по скорости невозмущенного потока, ширине здания и коэффициенту кинематической вязкости для воздуха, равняется 10^6 .

Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS

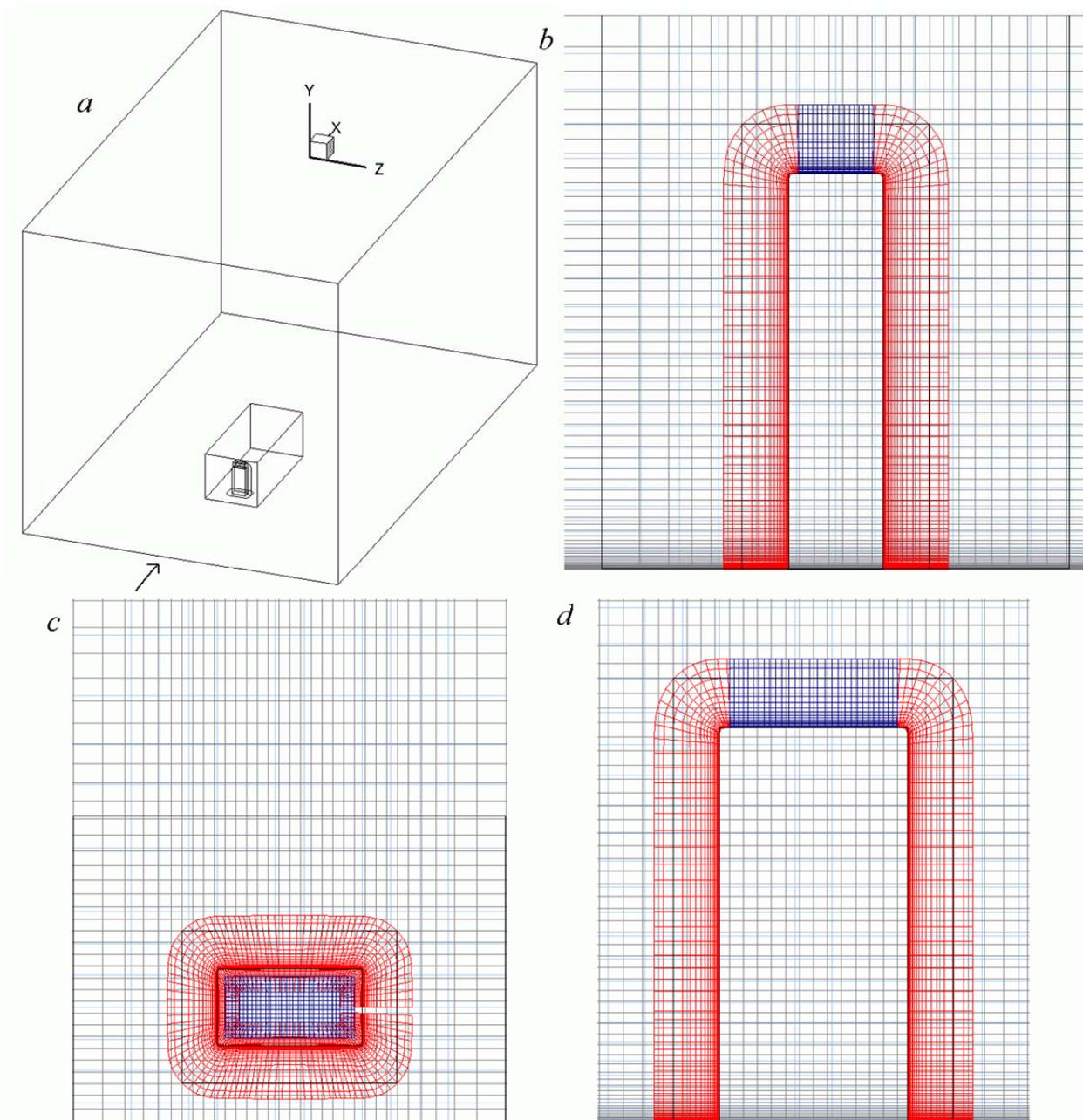


Рисунок 1. Схема расчетной области (а) с указанием направления невозмущенного потока и срединные сечения здания плоскостями ($xy - b$), ($xz - c$), ($yz - d$)

Декартова система координат x, y, z вводится в расчетной области (рисунок 1) с центром в середине основания здания с наветренной стороны. Расчетная область имеет размеры $37.5 \times 23 \times 23$, причем входная граница удалена от здания на расстояние 11.25. Область разбивается крупными ячейками с размером шагов в районе тела 0.2. Для отображения характерных особенностей нестационарного обтекания здания вводится окружающая его внутренняя подобласть с размерами $8.48 \times 3.4 \times 3.8$, причем входная граница удалена от здания на расстояние 1.54. Подобласть разбивается мелкими ячейками с шагами в окрестности тела, равными 0.075.

Модель здания имеет скругленные края с радиусом скругления 0.025. Около поверхности модели строится прилегающая расчетная сетка, состоящая из нескольких фрагментов (показаны красным и синим цветом на рисунке 1). Толщина прилегающей подобласти равна 0.35. Пристеночный шаг равен 0.001. Многоблочная разномасштабная структурированная сетка с пересечением составляющих ее фрагментов содержит примерно 400 тысяч ячеек. Поток взаимодействует со зданием под углом 90° .

Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS

Методология решения задачи на многоблочной сетке детально описывается в работе [10]. Осредненные по Рейнольдсу нестационарные уравнения Навье-Стокса замыкаются с помощью модели переноса сдвиговых напряжений Ментера [11-14], модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока в характеристиках турбулентности. Модель прошла апробацию на широком спектре задач.

Для решения исходных уравнений применяется конечно-объемный подход [15], основанный на коррекции давления, причем для дискретизации членов уравнений используются схемы не ниже второго порядка аппроксимации [16]. На входной проточной границе задаются профиль скорости в пределах пограничного слоя и вне его – однородный поток. Характеристики турбулентности рассчитываются для заданной толщины пограничного слоя. Вне его характеристики турбулентности соответствуют параметрам, заданным при эксперименте в аэродинамической трубе. На проточных выходных границах ставятся «мягкие» граничные условия. Шаг по времени принимается равным 0.02, а начальные условия задаются соответствующими состоянию удара пристеночного потока о тело. Помимо пространственной нестационарной задачи, решается также двумерная задача взаимодействия равномерного потока с нормально расположенной толстой пластинкой размером 0.5×2 , представляющей поперечное сечение модели высотного здания. Решение задачи заканчивается после выхода процесса обтекания на автоколебательный режим.

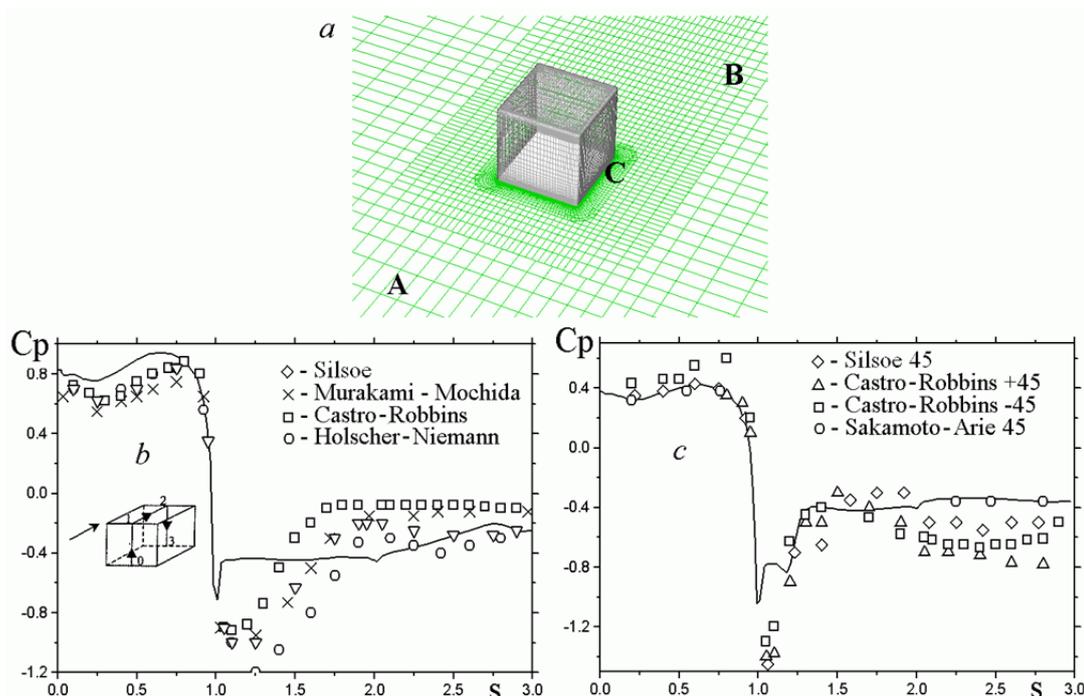


Рисунок 2. Многоблочная сетка (а), состоящая из трех разномасштабных фрагментов (А – внешняя, В – внутренняя, С – прилегающая), и сравнение распределений коэффициента давления в срединной плоскости обтекаемого куба при ориентации под углами 90° (b) и 45° (c)

Верификация расчетной методологии

В качестве тестовой задачи для верификации многоблочной расчетной методологии выбирается турбулентное обтекание куба на плоскости, сравнительные характеристики которого из нескольких экспериментальных исследований собраны в [17,18]. Подобно модели высотного здания на рисунке 1 куб помещается в расчетную область размером $38 \times 22 \times 23$ с удалением тела от входной границы на расстояние 11.5. Шаги сетки в окрестности куба равны 0.2 (рисунок 2). Дополнительная область для описания характерных черт обтекания куба и нестационарного следа за ним имеет размеры $8.45 \times 2.4 \times 3.8$ с расположением передней грани куба на расстоянии 1.28 от входной границы подобласти. Минимальные шаги внутренней декартовой сетки в окрестности тела равны 0.075. Прилегающая к поверхности куба криволинейная сетка имеет толщину 0.35. Пристеночный шаг равен 0.001. Радиус скругления краев куба равен 0.025. Число Рейнольдса – порядка 10^5 . Общее количество расчетных ячеек в многоблочной сетке составляет примерно 350 тысяч.

Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS

Физические эксперименты, приведенные в работе [18], выполнены с большим разбросом определяющих параметров. На рисунке 2 сравниваются осредненные по времени расчетные и экспериментальные коэффициенты статического давления в срединном сечении куба под углами 90° и 45° по отношению к набегающему потоку. С учетом некоторой неопределенности и нестыковки условий проведения испытаний модели куба, а также численного моделирования его обтекания, согласованность результатов представляется вполне приемлемой, а значит, математическая модель и расчетная методология в должной мере адекватны.

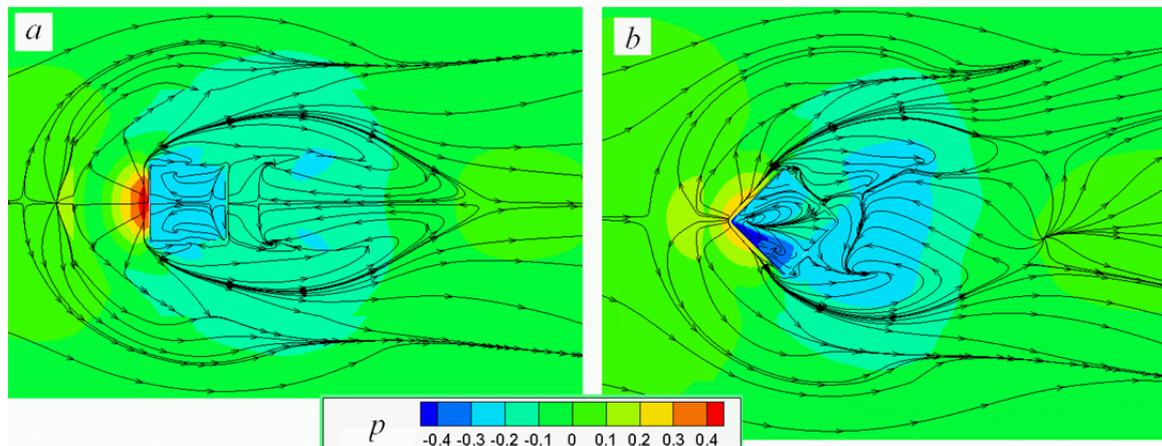


Рисунок 3. Осредненные по времени картины растекания на стенке с кубом с нанесенными распределениями статического давления при ориентации куба под углами 90° (a) и 45° (b)

Осредненные по времени вихревые картины обтекания куба под углами 90° и 45° к набегающему потоку, дополненные распределениями безразмерного по удвоенному скоростному напору статического давления, показаны на рисунке 3. Помимо развитых отрывных зон в ближнем следе за кубом, впереди него образуются подковообразные вихревые жгуты. Внутри отрывных зон возникают особые точки типа фокуса, являющиеся источниками восходящих смерчеобразных закрученных струйных потоков. Окрестности этих точек характеризуются зонами пониженного давления. На верхней грани куба также наблюдаются области низкого давления.

Расчет нестационарных ветровых нагрузок на высотные здания

Двумерное и пространственное взаимодействие однородного ветрового потока с высотным зданием характеризуется выходом на автоколебательный режим с образованием вихревой дорожки в следе за зданием (рисунок 4). Как видно, число Струхала в пространственном случае – 0.118 – существенно ниже, чем в двумерном случае – 0.152. Продольная сила, $X = 1.25$, оказывается значительно меньше, чем в двумерном случае (в среднем 1.4, а амплитуда поперечной нагрузки Z (порядка 0.2) еще больше отличается от двумерного обтекания (порядка 0.8). Интегральная силовая нагрузка безразмерна по удвоенному скоростному напору и характерной площади (длине – в двумерном случае).

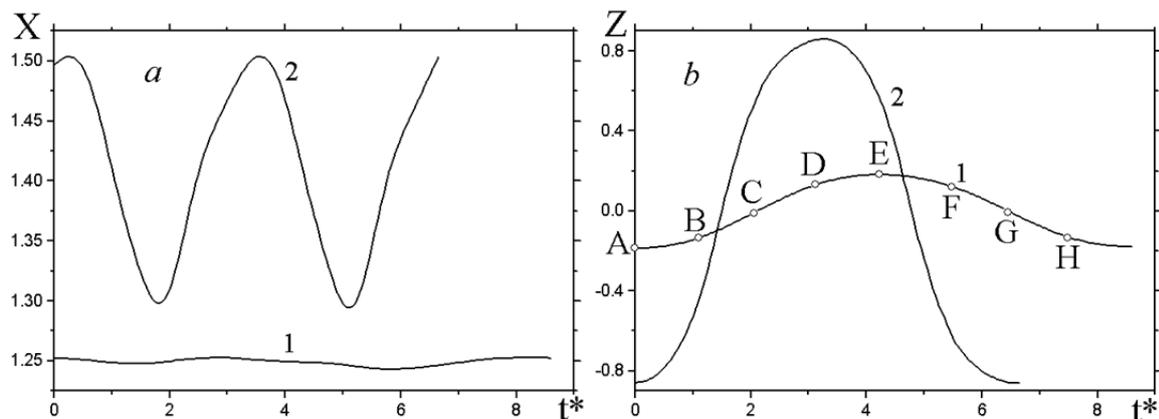


Рисунок 4. Сравнение пространственной (кривые 1) и двумерной (кривые 2) продольной $X(a)$ и поперечной $Z(b)$ силовой нагрузки на модель высотного здания на периоде колебаний Z

Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS

Картина эволюции поля давления в срединной поперечной плоскости показывает попеременный сход вихрей с боковых граней в ближний след (рисунок 5). При этом возникает циклическая нагрузка на модель высотного здания, связанная с образованием зон пониженного давления на боковых гранях.

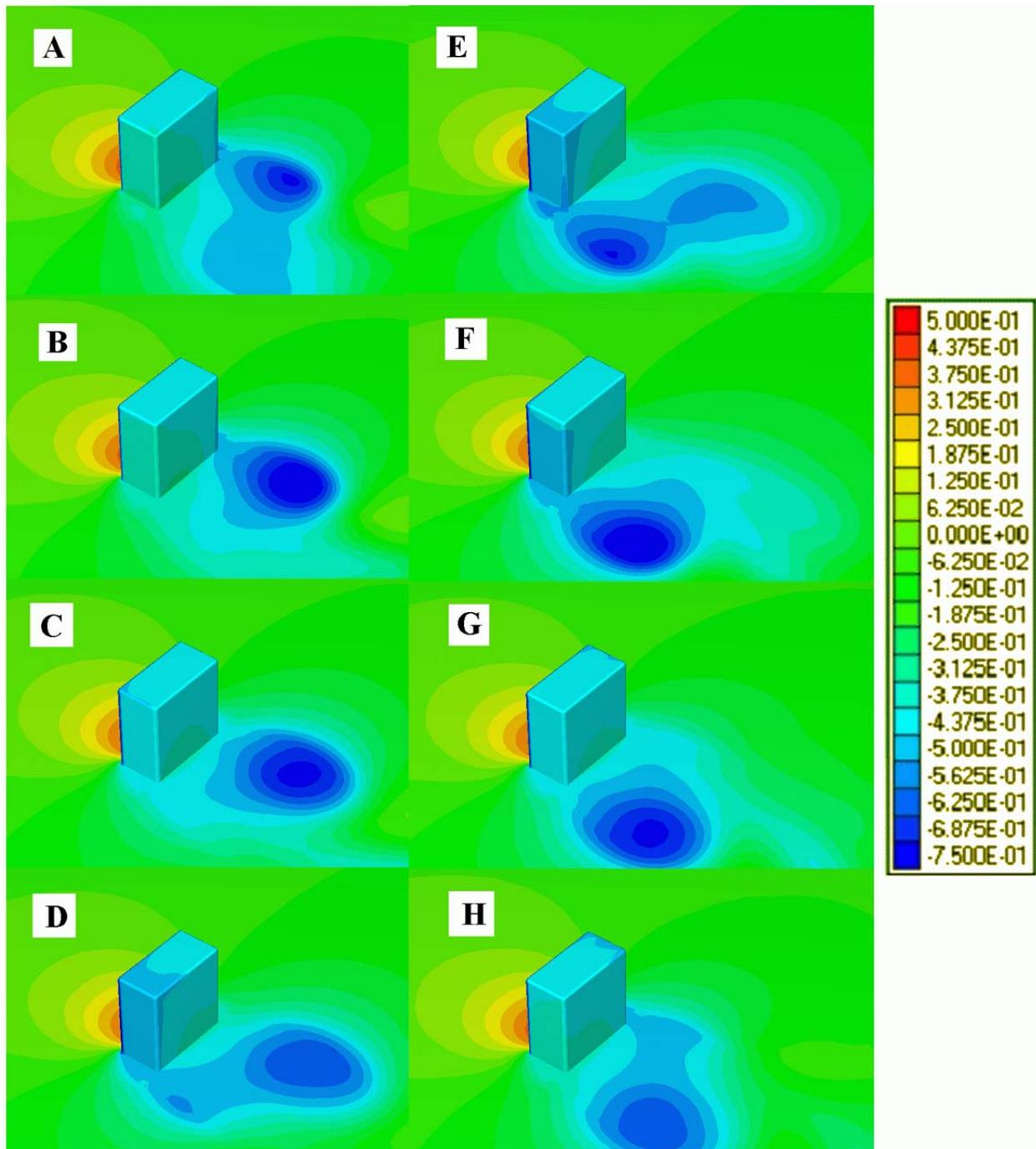


Рисунок 5. Изменение поля статического давления в срединной плоскости высотного здания в моменты времени, соответствующие точкам на рисунке 4б

Осредненное по периоду колебаний поперечной нагрузки поверхностное распределение статического давления (рисунок 6, *a,b*) существенно отличается от нестационарного асимметричного поля давления, представленного на рисунке 5. Как и в случае ветрового воздействия на куб, расположенный под углом 90° (рисунок 3), картина распределения осредненного статического давления получается симметричной. Периодический характер изменения локальных ветровых нагрузок на стенки здания описывается полем пульсационного давления (рисунок 6, *c,d*), рассчитанным по методике [10].

Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS

Максимум локальной нагрузки на здание приходится на зону торможения ветрового потока, расположенную примерно на середине передней грани. Верхняя и боковые грани находятся в областях пониженного давления. Пульсации давления на передней и верхней гранях практически отсутствуют, т.е. локальная нагрузка на них близка к стационарной. В то же время на боковых гранях, в особенности в зоне подковообразного вихря, пульсации велики и по величине сопоставимы с осредненным статическим давлением.

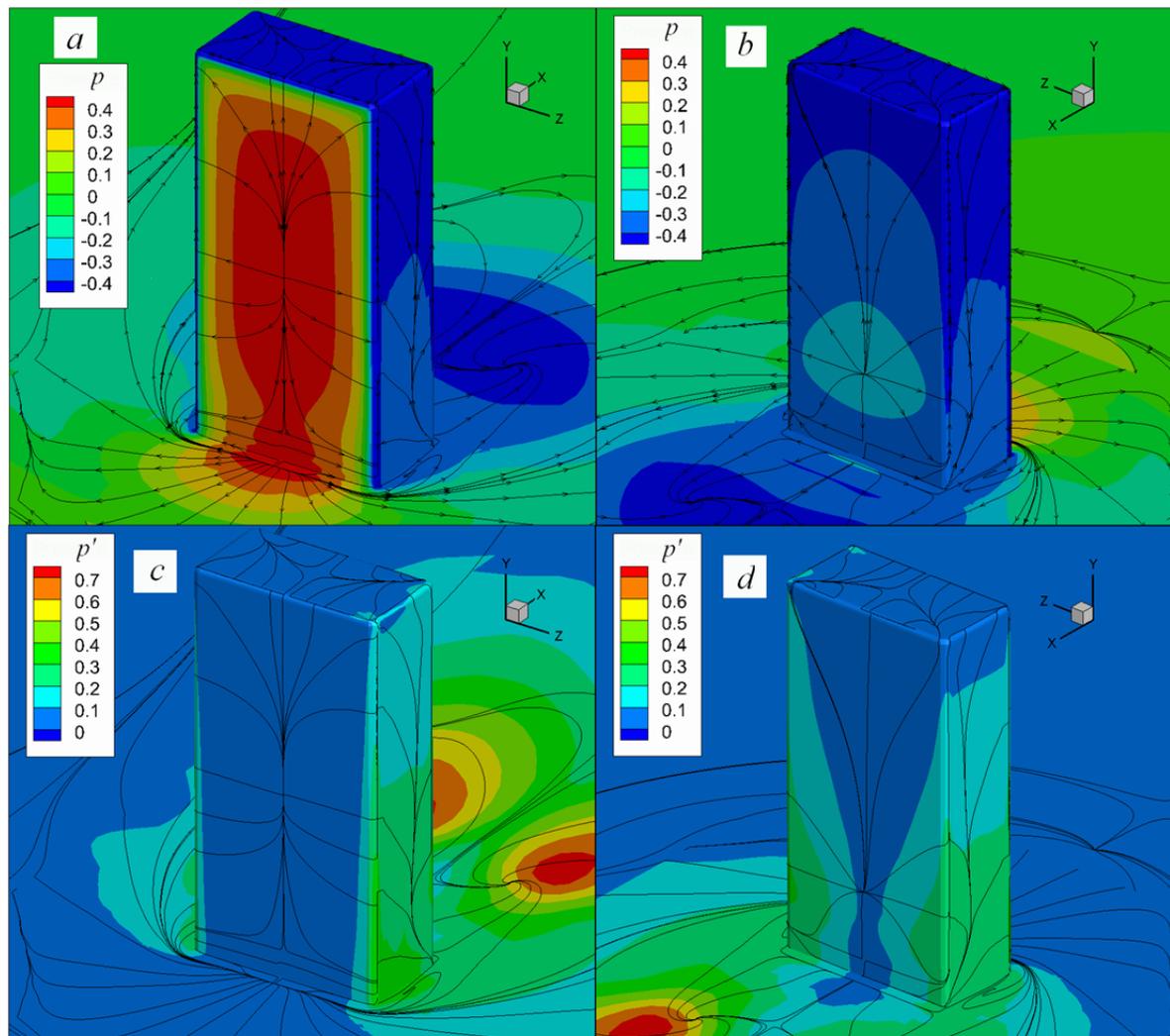


Рисунок 6. Поверхностные распределения осредненного (a,b) и пульсационного (c,d) давления с нанесенными картинками растекания. a,c – вид спереди; b,d – вид с тыльной стороны

Выводы

1. Разработана методология расчета ветрового воздействия на высотные здания на основе использования многоблочных разномасштабных структурированных сеток простой топологии с частичным наложением в рамках решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замыкаемых уравнениями модели переноса сдвиговых напряжений.

2. Расчетная методология верифицирована на тестовой задаче обтекания куба. Обоснована приемлемость модифицированной модели переноса сдвиговых напряжений с учетом влияния кривизны линий тока на характеристики турбулентности.

3. Продемонстрирован циклический характер ветрового воздействия на высотное здание с знакопеременной поперечной нагрузкой, составляющей порядка 15% от продольной нагрузки, при числе Струхала 0.118.

4. Показано, что уровень пульсаций статического давления на боковых стенках здания может быть одного порядка по величине с осредненным статическим давлением.

Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России» (проект 2009-1.5-000-010) и РФФИ (проект 11-01-00039).

Литература

1. Протокол №18 заседания Научно-технического совета Комитета по архитектуре и градостроительству города Москвы от 6 апреля 2006 г. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Microsoft Office Word. URL: http://dom6.ru/documents/center_doc/380213.doc (дата обращения: 09.01.2013).
2. Исаев С.А., Белоусова Л.Ю., Баранов П.А. Численный анализ ветрового режима в окрестности аэропорта Пулково // Инженерно-физический журнал. 1999. Т.72. №4. С.672-678.
3. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. СПб: БГТУ, 2001. 107 с.
4. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. La Canada: DCW Industries, 1998. 540 p.
5. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. Учебное пособие. СПб: Из-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.
6. Усачов А.Е., Исаев С.А., Баранов П.А. Численное моделирование течения воздуха при вентиляции отдельных участков автодорожных тоннелей // Труды ЦАГИ. Промышленная аэродинамика. 2009. Вып. 2684. С. 26-35.
7. Гувернюк С.В., Исаев С.А., Егорычев О.О., Поддаева О.И., Корнев Н.В., Усачов А.Е. Вычислительная аэродинамика строительных сооружений. Задачи и методы // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. 2011. Т.2. №2. С. 113-119.
8. Гувернюк С.В., Егорычев О.О., Исаев С.А., Корнев Н.В., Поддаева О.И. Численное и физическое моделирование ветрового воздействия на группу высотных зданий // Научно-технический журнал. Вестник МГСУ. 2011. Т. 1. №3. С. 185-191.
9. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы. Автореф. дисс.... канд. тех. наук. М.: МГСУ, 2010. 23 с.
10. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 398 с.
11. Menter F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. 1993. №93-2906. 21 p.
12. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya, Turkey, 12-17 October, 2003. Pp. 625-632.
13. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment // Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya, Turkey, 12-17 October, 2003. Pp. 663-640.
14. Hellsten A. Some improvements in Menter's $k-\omega$ turbulence model // AIAA Paper. 1998. №98-2554. 11 p.
15. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 1999. 389 p.
16. Leonard B.P. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1979. Vol. 19. №1. Pp. 59-98.
17. Castro I.P., Robins A.G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams // Journal of Fluid Mechanics. 1977. Vol. 79. №2. Pp. 307-335.
18. Richards P.J., Hoxey R.P., Short L.J. Wind pressures on a 6m cube // Expanded abstracts of 4th Int. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Application. Ruhr- University Bochum: Bochum, Germany, 2000. Pp. 515-518.

**Сергей Александрович Исаев, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812) 771-03-11; эл. почта: isaev3612@yandex.ru

© Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В., 2013

Исаев С.А., Ватин Н.И., Баранов П.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е., Егоров В.В. Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий для решения нестационарных задач строительной аэродинамики высотных зданий в рамках подхода URANS

doi: 10.5862/MCE.36.13

Development and verification of multiblock computational technologies for solution of unsteady problems of high building aerodynamics in the framework of URANS approach

S.A. Isaev;**N.I. Vatin,***Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia;***P.A. Baranov;****A.G. Sudakov,***PLC Battery Company "Rigel", Saint-Petersburg, Russia;***A.Ye. Usachov,***Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky, Moscow, Russia;***V.V. Yegorov,***Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia;*

+7(812) 771-03-11; e-mail: isaev3612@yandex.ru

Key words

high buildings; wind influence; unsteady flow; power load; pulsation; ripples; calculation; verification; multiblock grids; models of turbulence; URANS; program package

Abstract

Recently in building aerodynamics the school of computer simulation of wind influence on the building became urgent. The widespread high building construction plays significant role here.

In this article the genesis of multiblock calculation methodology for modeling wind influence on the high buildings is presented.

The methodology of calculation of wind influence on the high-altitude constructions, based on using multibank overlapping grids of various scales is developed. The methodology is verified on the test problem of a flow around a cube with short circuit with the help of model of shear stress transport.

Periodic character of local and integrated wind loadings on a high-altitude building is analyzed.

References

1. *Protokol №18 zasedaniya Nauchno-tekhnicheskogo soveta Komiteta po arkhitekture i gradostroitelstvu goroda Moskvy ot 6 aprelya 2006 g* [Report No.18 of session of Scientific and technical council of Committee on architecture and town-planning of city of Moscow from 6 April 2006]. [Online]. System requirements: Microsoft Office Word. URL: http://dom6.ru/documents/center_doc/380213.doc (Accessed: 09.01.2013) (rus)
2. Isayev S.A., Belousova L.Yu., Baranov P.A. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1999. Vol. 72. No. 4. Pp.644-649. (rus)
3. Belov I.A., Isayev S.A. *Modelirovaniye turbulentnykh techeniy. Uchebnoye posobiye* Simulation of turbulent flows. The manual]. Saint-Petersburg: BGTU, 2001. 107 p. (rus)
4. Wilcox D.C. *Turbulence modeling for CFD*. Canada: DCW Industries, 1998. 537 p.
5. Garbaruk A.V., Strelets A.V., Shur M.L. *Modelirovaniye turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy. Uchebnoye posobiye* [Simulation of turbulence in calculations of complex flows. The manual]. Saint-Petersburg: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. 88 p. (rus)
6. Usachov A.E., Isaev S.A., Baranov P.A. *Trudy TsAGI. Promyshlennaya aerodinamika*. 2009. No. 2684. Pp. 26-35 (rus)
7. Guvernyuk S.V., Yegorychev O.O., Isayev S.A., Poddaeva O.I., Kornev N.V., Usachov A.E. *Vestnik MGSU*. 2011. Vol. 2. No. 2. Pp. 113-119 (rus).
8. Guvernyuk S.V., Yegorychev O.O., Isayev S.A., Kornev N.V., Poddaeva O.I. *Vestnik MGSU*. 2011. Vol. 1. No. 3. Pp. 185-191. (rus)

Isaev S.A., Vatin N.I., Baranov P.A., Sudakov A.G., Usachov A.Ye., Yegorov V.V. Development and verification of multiblock computational technologies for solution of unsteady problems of high building aerodynamics in the framework of URANS approach

9. Dubinskiy S.V. *Chislennoye modelirovaniye vetrovykh vozdeystviy na vysotnyye zdaniya i komplekсы. Avtoreferat. diss.... kand. disstekh. nauk* [Numerical simulation of wind interaction with high-altitude buildings and complexes. Abstract of a thesis]. Moscow: MGSU, 2010. 23 p. (rus)
10. Bystrov Yu.A., Isayev S.A., Kudryavtsev N.A., Leontyev A.I. *Chislennoye modelirovaniye vikhrevoy intensifikatsii teploobmena v paketakh trub* [Numerical simulation of vortex heat transfer enhancement in tube packages]. Saint-Petersburg: Sudostroyeniye, 2005. 398 p. (rus).
11. Menter F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA*. 1993. Paper No. 93-2906.
12. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya, Turkey, 12-17 October, 2003*. Pp. 625–632.
13. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya, Turkey, 12-17 October, 2003*. Pp. 663-640.
14. Hellsten A. Some improvements in Menter's $k-\omega$ turbulence model. *AIAA*. 1998. Paper No. 98-2554.
15. Ferziger J.H., Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 1999. 389 p.
16. Leonard B.P. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1979. Vol. 19. No. 1. Pp.59-98.
17. Castro I.P., Robins A.G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. *Journal of Fluid Mechanics*. 1977. Vol. 79. No. 2. Pp.307-335.
18. Richards P.J., Hoxey R.P., Short L.J. Wind pressures on a 6m cube. *Expanded abstracts of 4th Int. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Application*. Ruhr- University Bochum: Bochum, Germany, 2000. Pp. 515-518.

Full text of this article in Russian: pp. 103-109