

УДК 624.03:533.6.01

*ГНЫРЯ АЛЕКСЕЙ ИГНАТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
tsp_tgasu@mail.ru*

*КОРОБКОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
korobkov@hotmail.ru*

*ДЁГИН АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ, магистрант,
dega11@mail.ru*

*СОКОЛ МАКСИМ НИКОЛАЕВИЧ, магистрант,
frost2232900@gmail.com*

*КОШИН АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ, ст. преподаватель,
dawghood@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,*

*ТЕРЕХОВ ВИКТОР ИВАНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
terekhov@itp.nsc.ru*

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКОВ ВОЗДУХА ВОКРУГ ГРУППЫ ИЗ ТРЕХ МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ В УСЛОВИЯХ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ *

В работе изложены результаты сажемасляной визуализации разделения потоков воздуха вокруг группы из трех моделей в виде квадратных призм, которые моделируют группу зданий, взаимно влияющих друг на друга. Приведены результаты характера течения воздуха в тандеме моделей зданий в зависимости от их расположения. Эксперименты проводились при числе Рейнольдса $Re = 7 \cdot 10^4$ и углах атаки воздуха 0 и 45° при фиксированной высоте моделей.

Целью данной работы было установление взаимосвязи полученных картин обтекания моделей системы зданий потоком воздуха с картиной распределения локальных коэффициентов теплоотдачи и давления, полученной при проведении серий экспериментов на аэродинамической трубе, а также оценка гидродинамической структуры отрывных течений, характера и размеров отрывных зон.

Ключевые слова: визуализация течений; архитектурная аэродинамика; число Рейнольдса; модели зданий.

ALEKSEY I. GNYRYA, DSc, Professor,

tsp_tgasu@mail.ru

SERGEY V. KOROBKOV, PhD, A/Professor,

korobkov@hotmail.ru

ANDREI G. DYOGIN, PhD, Undergraduate Student,

dega11@mail.ru

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ (проект НШ-8780.2016.8).

*MAKSIM N. SOKOL, Undergraduate Student,
frost2232900@gmail.com
ANTON A. KOSHIN, Senior Lecturer,
dawghood@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia,
VIKTOR I. TEREKHOV, DSc, Professor,
terekhov@itp.nsc.ru
Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS,
1, Academician Lavrent'ev Str., 630090, Novosibirsk, Russia*

AIR FLOW INTERFERENCE EFFECT IN THE BUILDING MODELS

The paper presents results of oil-black visualization of air flow separated by the groups of three building models designed to simulate buildings mutually affecting each other. The air flow behavior is described depending on the building models positions. Experiments are carried out at $7 \cdot 10^4$ Reynolds number, 0 and 45° angles of attack at a fixed height of the building models.

The aim of this work is to determine the correlation between air flow around the models and the distribution of the local heat transfer and pressure factors obtained during the experiments in a wing tunnel. Also, the assessment is given to the hydrodynamic structure of separated flows, their behavior and amount.

Keywords: airflow visualization; architectural aerodynamics; Reynolds number; building model.

Введение

Строительство в быстроразвивающихся районах России предъявляет повышенные требования к зданиям и сооружениям, находящимся под интенсивными ветровыми нагрузками. Исследование ветровых нагрузок и распределения давления актуально с позиции проектирования несущих конструкций зданий, прогнозирования аэрации жилых микрорайонов, застроек и расчета систем вентиляции. Обтекание потоком воздуха зданий различной высоты является сложной и многофакторной задачей. Разное планирование зданий и сооружений в группах и микрорайонах приводит к вариации аэродинамической картины обтекания и распределения полей давления, теплоотдачи на отдельных зданиях, которая осложняется наличием отрывных потоков, взаимодействующих между собой. Обширный объем сведений в области аэродинамики строительных конструкций в значительной мере покрывает потребности современных методик проектирования. Однако взаимодействие ветровых потоков от ряда зданий, влияние их местоположения на интерференцию потоков остается малоизученным.

Анализ литературы позволил определить ряд научных школ как в России, так и за рубежом. В России к ним можно отнести работы В.Г. Гагарина, С.А. Исаева, С.В. Гувернюка, А.М. Белостоцкого, О.О. Егорычева, Э.А. Лозинского, П.В. Леденева, А.А. Синявина, С.Д. Саленко и др. в области архитектурной аэродинамики и строительной теплофизики по экспериментальному исследованию ветрового воздействия при обтекании группы зданий. В области исследования структуры потока и теплоотдачи группы объектов при

изменении расстояния между ними, углов атаки и скорости набегающего потока воздуха следует упомянуть работы А.И. Гныри, А.В. Злодеева, В.И. Терехова, Ю.А. Табунщикова, В.В. Ларичкина и др.

Однако работ, посвященных детальному изучению аэродинамики и теплообмена при обтекании воздушным потоком моделей системы зданий при вариации их относительной высоты и взаимного расположения, сравнительно мало [1–5].

Поэтому актуальными являются исследования, направленные на совершенствование расчетов ветровых нагрузок, а также локального и интегрального теплообмена при обтекании потоком воздуха группы зданий.

Результаты натурных исследований дают более полное представление об архитектурной аэродинамике и распределении локальной и интегральной теплоотдачи зданий и сооружений. Однако натурные исследования, в силу их дороговизны и сложности в организации, могут применяться в исключительных случаях.

Таким образом, главным инструментом изучения теплообмена и аэродинамических характеристик при обтекании потоком воздуха группы высотных и повышенной этажности зданий является экспериментальное исследование на установках, моделирующих реальные условия ветрового воздействия на здания.

Целью настоящих исследований является проведение комплексных экспериментальных исследований внешней аэродинамики и теплообмена группы моделей зданий в условиях интерференции воздушных потоков, моделирующих реальную застройку микрорайонов, в том числе высотных и повышенной этажности зданий.

Задачами работы являются расчетно-экспериментальные исследования внешней аэродинамики и теплообмена групп зданий, разработка и верификация расчетных методов, предназначенных для использования при проектировании городской застройки с целью снижения тепловых потерь и обеспечения безопасности и комфортности городской среды.

Предметом исследований являются аэродинамика и конвективный теплообмен наружной поверхности оболочки здания в зависимости от его формы, скорости и угла атаки потока воздуха, местоположения его в группе подобных зданий, а также величины аэродинамической нагрузки на ограждающие конструкции.

На первом этапе экспериментов были получены данные по визуализации структуры отрывных потоков при обтекании системы моделей зданий различных высот, калибров, чисел Рейнольдса, а также углов атаки потока воздуха.

Описание модели, постановка задачи, материал и методика исследования

Целью визуализационных исследований является установление взаимосвязи полученных картин обтекания системы моделей зданий потоком воздуха с картиной распределения коэффициентов давления C_p и теплоотдачи α , полученных при проведении серий экспериментов на аэродинамической трубе, а также оценка гидродинамической структуры отрывных течений, характера и размеров отрывных зон.

Серии экспериментов проводились на аэродинамической трубе разомкнутого типа, установленной в лаборатории кафедры ТСП ТГАСУ, общий вид которой представлен на рис. 1. Методика проведения эксперимента исследований представлена в работе [6].



Рис. 1. Аэродинамическая труба

Поперечное сечение рабочего канала аэродинамической трубы составляет 300×210 (h) мм и его длина 900 мм (рис. 2).

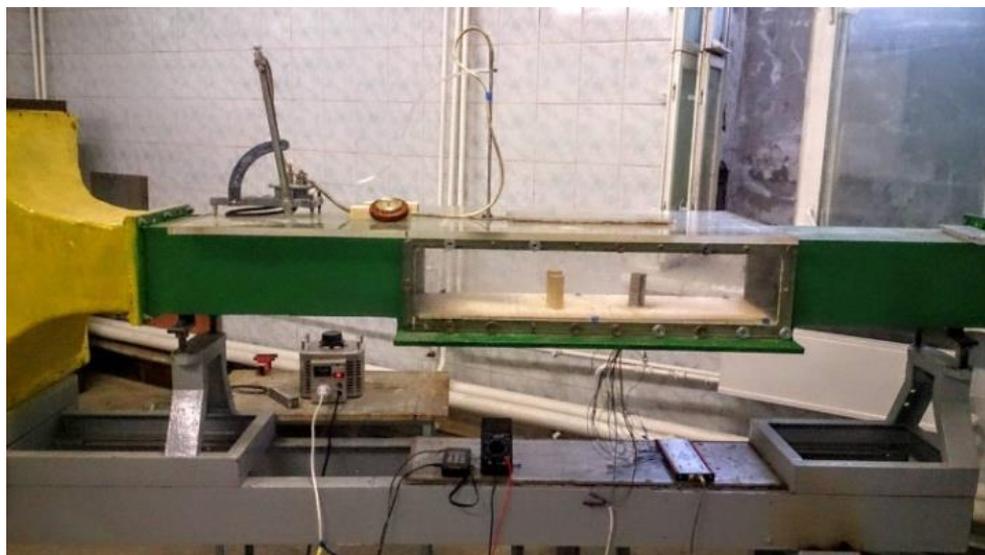


Рис. 2. Общий вид рабочей камеры аэродинамической трубы

Максимальная скорость воздушного потока составляла 35 м/с, а максимальное число Рейнольдса, рассчитанное по размеру грани призмы, $Re = U_0 \cdot a / \nu = 7 \cdot 10^4$. Изменение скорости потока воздуха осуществлялось систе-

мой регулирования оборотов при помощи частотного преобразователя марки FC-051P7K5 фирмы-производителя Danfoss (Дания).

В опытах использовались квадратные призмы с размером грани $a = 30$ мм и относительной высотой $H/a = 3$ и 5 (соответственно $H = 90$ и 150 мм). Размеры модели выбирались таким образом, чтобы степень поджатия потока не превышала 10 %.

Эксперименты проводились для трех квадратных призм при различных местоположениях моделей друг относительно друга по следующим принципам: две модели-препятствия располагались выше по потоку и создавали турбулентные отрывные течения, которые оказывали влияние на аэродинамическую структуру третьей исследуемой модели, расположенной ниже по потоку (рис. 3). Такое расположение моделей является одним из распространенных вариантов проектных решений квартальной застройки.

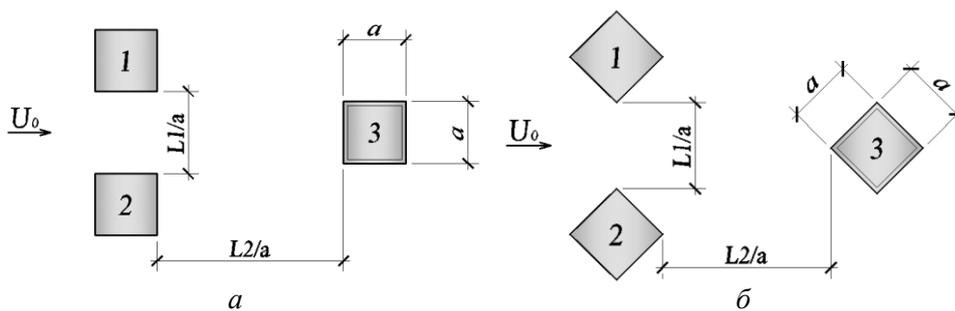


Рис. 3. Схема расположения экспериментальных моделей в потоке воздуха:

a – угол атаки воздушного потока 0° , b – угол атаки воздушного потока 45° ; a – поперечный размер моделей, мм; $L1$ – расстояние между моделями-препятствиями, мм; $L2$ – расстояние между поперечной группой препятствий (модели «1» и «2») и исследуемой моделью «3»; U_0 – воздушный поток; \rightarrow – направление воздушного потока

Изменение калибра между впереди стоящими моделями-препятствиями составляло $L1/a = 1; 2; 3$. Исследуемая модель «3» располагалась в следе на удалении от впереди стоящих препятствий на расстоянии $L2/a = 2; 4; 6; 8$ и 10 . Все модели изготавливались из оргстекла толщиной стенки 5 мм.

Обсуждение результатов

Результаты визуализации воздушного течения вблизи группы из трех моделей при угле атаки воздуха 0° представлены на рис. 4.

Как видно из рис. 4, a , при малых расстояниях между призмами ($L1/a = 1$ и $L2/a = 2$) отрывные потоки воздуха между моделями «1» и «2» объединяются в общий ускоренный поток за счет их поджатия и воздействуют на модель «3». На передней грани модели «3» происходит сильное торможение течения без образования подковообразного вихря, характерного для впереди стоящих моделей «1» и «2». Наблюдается сильное влияние сводообразных вихрей, образованных в кормовой зоне за моделями «1» и «2», характерных для застойных зон. Аналогичное явление наблюдается за моделью «3», однако его следы вы-

ходят далеко за пределы ее граней. Обнаруженные следы вихрей (зоны рециркуляции) с периодическими пульсациями, формирующихся вблизи боковых граней, значительно больше, чем у моделей «1» и «2». Это свидетельствует о том, что модель «3» боковыми гранями расположена в зоне интенсивного турбулентного течения. Все вышесказанное свидетельствует о действии воздушного течения, имеющего большую скорость, чем скорость потока, т. е. слияние двух отрывных течений приводит к формированию ускоренной воздушной струи между моделями, действующей на модель «3».

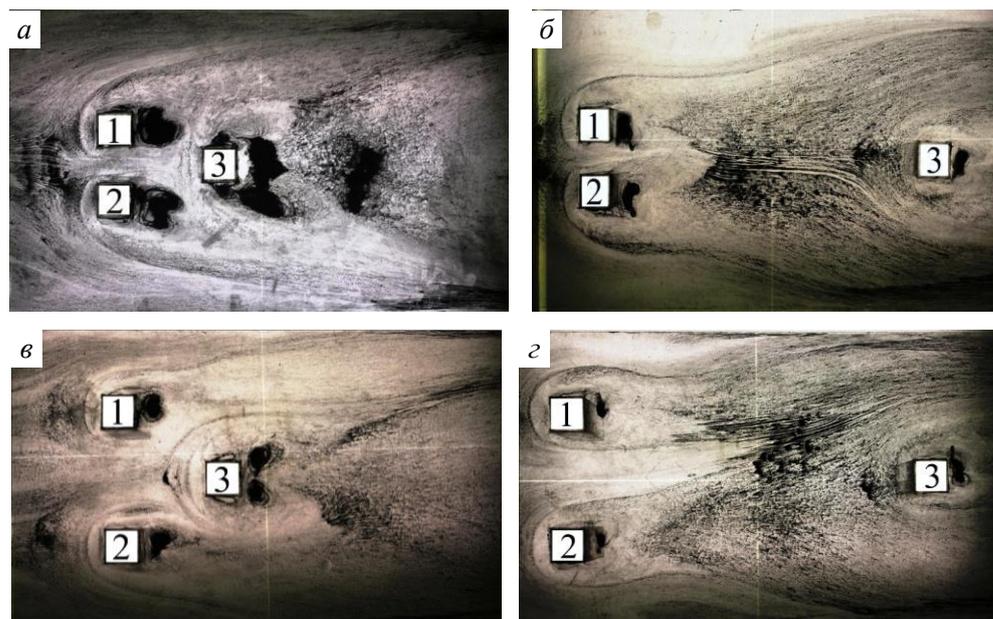


Рис. 4. Визуализация течения воздушного потока вблизи группы из трех моделей:
 $a - L1/a = 1$ и $L2/a = 2$; $б - L1/a = 1$ и $L2/a = 10$; $в - L1/a = 3$ и $L2/a = 2$;
 $з - L1/a = 3$ и $L2/a = 10$

С увеличением поперечного смещения $L1/a$ до 3 калибров (рис. 4, в) влияние интерференции потока воздуха, формирующегося между моделями «1» и «2», ослабевает. Контуры подков на передних гранях моделей «1» и «2» занимают в поперечном канале между ними величину не более $L1/4$. Начинают появляться очертания подковообразного вихря на передней грани модели «3». Модель «3» подвержена только действию разреженных зон за моделями «1» и «2». Каждая из впереди стоящих моделей имеет свою четкую картину обтекания как одиночная модель.

С увеличением расстояния $L2/a$ с 2 до 10 калибров (рис. 4, б, з) зона устойчивого влияния подковообразного вихря за впереди стоящими моделями в области между системой моделей постепенно размывается. Картина обтекания потоком воздуха модели «3» приближается к картине обтекания впереди стоящих моделей «1» и «2», а следовательно, и одиночной модели. При этом отчетливо прослеживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночной впереди стоящей модели.

Подобные явления наблюдаются и при обтекании группы из трех моделей при угле атаки воздуха 45° (рис. 5). Режим течения потока здесь клинообразный.

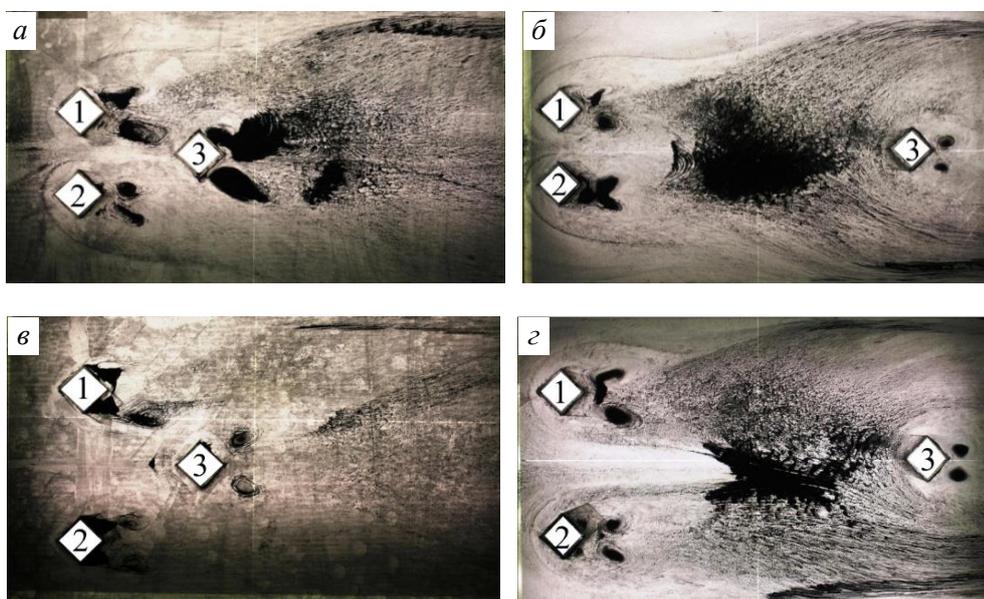


Рис. 5. Визуализация течения воздушного потока вблизи группы из трех моделей:
а – $L1/a = 1$ и $L2/a = 2$; б – $L1/a = 1$ и $L2/a = 10$; в – $L1/a = 3$ и $L2/a = 2$;
г – $L1/a = 3$ и $L2/a = 10$

Выводы

Очевидно, что структура сложных отрывных течений будет непосредственно сказываться на характере изменения интегральной теплоотдачи и ветрового давления. Одной из основных особенностей является наличие вихревых зон между системой из трех моделей призм, моделирующих систему зданий. С увеличением калибров $L1/a$ и $L2/a$, как показали визуализационные испытания, влияние вихревых зон на модель «3» от моделей «1» и «2» ослабевает, что приводит к выравниванию воздушного потока и в итоге должно приводить к лучшему обновлению застойной массы и, следовательно, возрастанию процессов теплообмена. При этом картина обтекания позади стоящей модели приближается к отдельно стоящей призме.

Полученные результаты дополняют известные данные как отечественных, так и зарубежных ученых в области исследования теплообмена и архитектурной аэродинамики при обтекании группы зданий, моделирующих квартальную застройку. В конечном итоге оптимальное расположение зданий при застройке кварталов может снизить количество продуваемых зон и сократить потери тепла в зданиях и сооружениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meinders, E.R. Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configuration of two wall-mounted cubes /, E.R. Meinders, K. Hanjalic // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2002. – № 45. – P. 465–482.

2. *Aliaga, D.A.* Convective heat transfer distributions over plates with square ribs from infrared thermography measurements / D.A. Aliaga, J.P. Lamb, D.E. Klein // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. – 1994. – № 37 (3). – P. 363–374.
3. *Martinuzzi, R.J.* Turbulent flow around two interfering surface-mounted cubic obstacles in tandem arrangement / R.J. Martinuzzi, B. Havel // *Journal of Fluids Engineering*. – 2000. – V. 122. – P. 24–31.
4. *Valensia, A.* Numerical study of the unsteady flow and heat transfer in channels with periodically mounted square bars / A. Valensia, J.S. Martin, R. Gormaz // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. – 2001. – № 37. – P. 265–270.
5. *Popovac, M.* Vortical structure and heat transfer on a jet-impinged wall-mounted cube in a cross-flow / M. Popovac, K. Hanjalic // *Turbulence, Heat and Mass Transfer*. – 2006. – № 5. – P. 1–11.
6. *Гныря, А.И.* Результаты визуализации течения воздушного потока вдоль ряда из двух кубов, расположенных на плоскости друг за другом / А.И. Гныря, В.И. Терехов, С.В. Коробков // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2009. – № 3. – С. 117–124.

REFERENCES

1. *Meinders E.R., Hanjalic K.* Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configuration of two wall-mounted cubes. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2002. No. 45. Pp. 465–482.
2. *Aliaga D.A., Lamb J.P., Klein D.E.* Convective heat transfer distributions over plates with square ribs from infrared thermography measurements. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1994. No. 37 (3). Pp. 363–374.
3. *Martinuzzi R.J., Havel B.* Turbulent flow around two interfering surface-mounted cubic obstacles in tandem arrangement. *Journal of Fluids Engineering*. 2000. V. 122. Pp. 24–31.
4. *Valensia A., Martin J.S., Gormaz R.* Numerical study of the unsteady flow and heat transfer in channels with periodically mounted square bars. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2001. No. 37. Pp. 265–270.
5. *Popovac M., Hanjalic K.* Vortical structure and heat transfer on a jet-impinged wall-mounted cube in a cross-flow. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*. 2006. No. 5. Pp. 1–11.
6. *Gnyria A.I., Terehov V.I., Korobkov S.V.* Rezul'taty vizualizatsii techeniya vozdušnogo potoka vdol' ryada iz dvukh kubov, raspolozhennykh na ploskosti drug za drugom [Result of visualization of air streaming along row of two cubes located on a plane one after another]. *Vestnik of Tomsk state University of Architecture and Building*. 2009. No. 3. Pp. 117–124. (rus)