

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 699.86

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

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

*МОКШИН ДМИТРИЙ ИЛЬИЧ, ассистент,
mokshin@sibmail.com*

*АНОШКИНА ОЛЬГА ОЛЕГОВНА, аспирант,
anoshkina_22@mail.ru*

*МИХАЙЛОВА СВЕТЛАНА МИХАЙЛОВНА, магистрант,
sv.mikhaylova91@gmail.com*

*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*

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ТАНДЕМА МОДЕЛЕЙ ЗДАНИЙ ПРИ МАЛЫХ РАССТОЯНИЯХ МЕЖДУ НИМИ И ВАРИАЦИИ ИХ РАСПОЛОЖЕНИЯ*

Приведены результаты цикла экспериментальных исследований среднего коэффициента теплообмена тандема моделей зданий на специальном аэродинамическом стенде, включающем в себя дозвуковую аэродинамическую трубу, исследуемые тепловые модели, устройства для задания тепловых граничных условий, измерительные термодатчики и аппаратуру для регистрации их показаний. В статье представлены графики изменения среднего коэффициента теплообмена позади стоящей модели здания в тандеме в зависимости от изменения расстояния между ними при фиксированном числе Рейнольдса $Re = 4,25 \cdot 10^4$ и угле атаки воздушного потока $\varphi = 0^\circ$.

Ключевые слова: средний коэффициент теплообмена; число Рейнольдса; угол атаки воздушного потока; внешний теплообмен; физическое моделирование.

ALEKSEY I. GNYRYA, DSc, Professor,

*Исследования выполнены при финансовой поддержке работ по гранту РФФИ (проект №13-08-00505a).

tsp_tgasu@mail.ru

SERGEY V. KOROBKOV, PhD, A/Professor,

korobkov@hotmail.ru

DMITRY I. MOKSHIN, Assistant Professor,

mokshin@sibmail.com

OLGA O. ANOSHKINA, Research Assistant,

anoshkina_22@mail.ru

SVETLANA M. MIKHAYLOVA, Undergraduate Student,

sv.mikhaylova91@gmail.com

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

INTEGRAL HEAT TRANSFER BETWEEN BUILDING MODELS AT SMALL DISTANCES AND DIFFERENT TANDEM ARRANGEMENTS

The paper presents the pilot study results on the average heat-transfer coefficient for building models arranged on a specialized aerodynamic test bench comprising a subsonic wind tunnel, thermal models and devices for giving thermal boundary conditions, heat sensors and measuring equipment. A change of the average heat-exchange coefficient of the building model located behind another one, is shown depending on the distance between them at a fixed Reynolds number and the airflow angle of attack.

Keywords: average heat-transfer coefficient; Reynolds number; airflow angle of attack; external heat exchange; physical simulation.

Энергоресурсосбережение является одной из наиболее серьезных задач XXI в. Требуемые для развития энергоресурсы можно получить не только за счет увеличения добычи сырья в труднодоступных районах и строительства новых энергообъектов, но и уменьшением затрат за счет энергосбережения. Одним из актуальных направлений энергосбережения является разработка норм теплотребления производственными и жилыми зданиями и сооружениями.

В настоящее время разработанные нормы, такие, например, как СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» и ТСН 23-316-2000 «Тепловая защита жилых и общественных зданий. Томская область» и т. п., не учитывают размещение здания (ландшафтные особенности, присутствие соседних зданий и т. д.), особенности климата (реальную температуру окружающего воздуха, направление ветра, влияние солнечного излучения и т. д.), особенности изменения температуры в течение суток.

Поэтому целью таких экспериментальных исследований, как [1–5], является получение закономерностей процессов турбулентного переноса от изделий прямоугольной формы, которые моделируют отдельно стоящие здания, или же группы сооружений, взаимно влияющих друг на друга. Наиболее простой ситуацией является тандем зданий, но и в этом случае возможна много-

вариантность условий их расположения относительно друг друга, а также по отношению к направлению ветра. В имеющихся экспериментально-теоретических работах данного направления [1–4] решен ряд частных задач, который не может описать весь спектр возможных воздействий отрывных потоков, формируемых различными гранями. Конечной целью подобных исследований является разработка технически обоснованных норм на тепловые потери через ограждающие конструкции. Для этого необходимо было создать физические модели зданий и сооружений и провести ряд экспериментов в аэродинамических трубах. Методика проведения экспериментов и обработки результатов измерений представлена в работах [6, 7].

Основным предметом исследования в данном разделе является опытное изучение среднего коэффициента теплоотдачи ряда двух моделей зданий призматической формы при изменении расстояния между ними в поперечном направлении относительно направления движения воздушного потока $L2/a$ (рис. 1).

Для этого было проведено два типа исследований:

1. Исследование структуры течения воздушного потока с помощью сажемалярной визуализации [5, 8]. В ходе экспериментов все грани двух призм, в том числе и верхние поверхности, а также подложка, на которой устанавливались модели, покрывались тонким ровным слоем раствора черного цвета, полученного путем смешивания типографской краски и керосина.

После этого исследуемая модель устанавливалась в рабочую камеру аэродинамической трубы. Эксперимент продолжался до тех пор, пока не появилась четко видимая характерная картина обтекания модели потоком воздуха. После этого модель извлекалась из трубы, и интересные фрагменты визуализационных картин фотографировались (рис. 1).

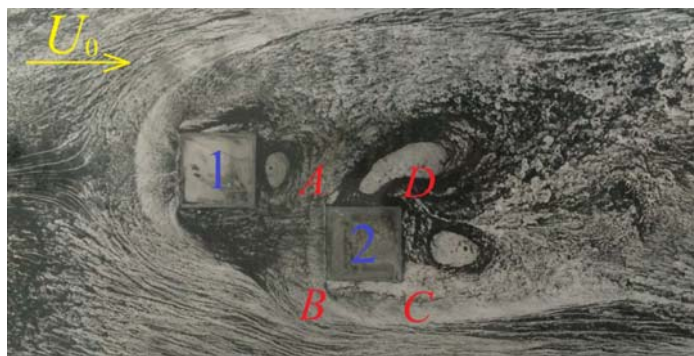


Рис. 1. Визуализация течения воздуха вблизи тандема квадратных призм при поперечном смещении $L2/a = 1,0$, $L1/a = 1,0$, $\varphi = 0^\circ$

2. Исследование интегрального теплообмена осуществлялось с применением термопар типа (ХК) и АЦП. Для этого в опытах использовались также две идентичные модели с поперечным сечением 50×50 мм и высотой 300 мм: передняя модель не нагревалась, позади нее – нагревалась. Все эксперименты проводились при одном числе Рейнольдса $Re = 4,25 \cdot 10^4$ и угле атаки воздуш-

ного потока $\varphi = 0^\circ$. Эксперимент продолжался до тех пор, пока температура стенки модели не была $q_{ст} = \text{const}$.

Серия экспериментов по исследованию теплообмена проводилась при следующих расстояниях между моделями: $L2/a = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ и $L1/a = 0,5$, и их количество составило 20 шт.

Определяющим параметром в данном исследовании является смещение от продольной оси канала ($L2/a$) (рис. 2).

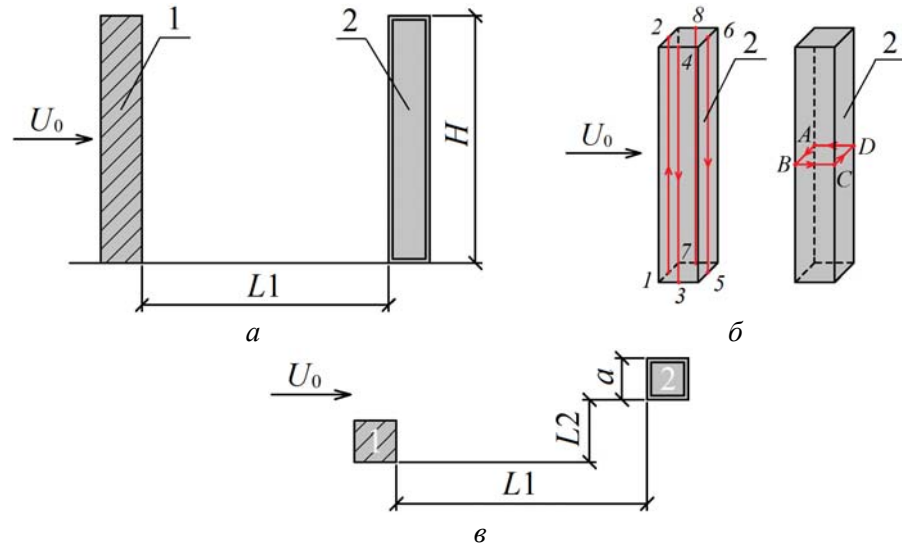


Рис. 2. Схема расположения исследуемой модели 2 относительно модели 1: *a* – общий вид экспериментальной модели; *б* – вертикальные и горизонтальные сечения; *в* – схема расположения моделей при поперечном смещении $L2$

Наиболее выраженное изменение структуры течения воздушного потока происходит при расстоянии между моделями $L1/a = 0,5 \div 1,0$ и смещении $L2/a = 0,5 \div 1,0$ (см. рис. 1).

При расстоянии между моделями $L1/a = 1,0$ и $L2/a = 1,0$ на грани ($D - A$) модели 2 наблюдается сильное вихревое течение, которое образуется путем срыва воздушного потока с ребра A модели 2 и под воздействием прижимающего течения от ребра D модели 1.

Очевидно, что структура сложных отрывных течений будет непосредственно сказываться на характере изменения средней теплоотдачи. Одной из основных особенностей является наличие вихревых зон между призмами 1 и 2.

Характер изменения среднего по граням теплообмена модели в зависимости от ее смещения на $L2/a = 0 \div 2$ при угле атаки воздушного потока $\varphi = 0^\circ$ показан на рис. 3. Для сравнения на этих рисунках представлены данные для $L2/a \rightarrow \infty$, что соответствовало случаю обтекания одиночной призмы на плоскости [9].

При малом расстоянии между моделями $L1/a = 1,0$ и смещении $L2/a$ от 0 до 2,0 (рис. 3) происходит интенсификация средних коэффициентов теплооб-

мена по граням модели 2. Максимальная величина теплообмена находится на боковой грани ($D - A$) при $L2/a = 0,5$, минимальная – на боковой грани ($B - C$) при $L2/a = 2,0$.

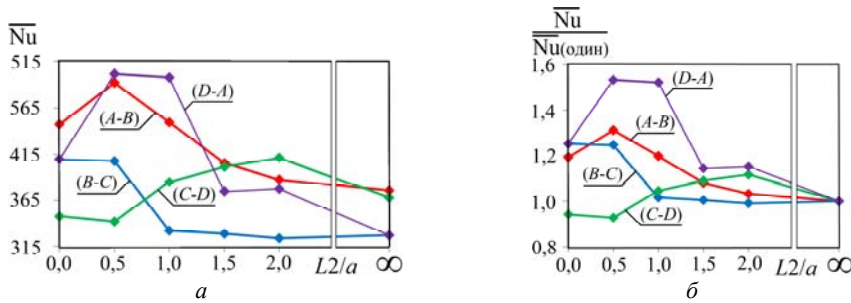


Рис. 3. Теплообмен граней модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L2/a$, $L1/a = 1,0$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$:
 a – зависимость Nu/Nu (один) от $L2/a$; b – зависимость Nu от $L2/a$; \blacklozenge – средний по грани ($A - B$); \blacklozenge – средний по грани ($B - C$); \blacklozenge – средний по грани ($C - D$); \blacklozenge – средний по грани ($D - A$)

На кормовой грани ($C - D$) происходит изменение величины теплообмена при увеличении смещения $L2/a$ до 20 % при смещении на $L2/a = 2,0$, и вклад от этой грани в общий теплообмен становится существенным.

Большие изменения значений теплообмена происходят на лобовой грани ($A - B$) до 25 % и на боковой грани ($D - A$) до 55 % при смещении $L2/a = 0,5 \div 1,0$. Дальнейшее увеличение смещения $L2/a = 1,0 \div 2,0$ приводит к снижению величины теплообмена.

На боковой грани ($B - C$) теплообмен снижается при $L2/a > 0,5$, грань выходит из аэродинамического следа модели 1 и попадает под действие первичного отрывного течения.

Из рис. 3 также видно, что разброс данных по граням увеличивается при минимальном смещении моделей $L2/a = 0,5 \div 1,0$ до 60 %.

Для прогнозирования тепловых потерь наибольший практический интерес представляют данные по средней теплоотдаче от всей поверхности призмы. Такие опытные результаты представлены на рис. 4 при изменении расстояний $L1/a$ и $L2/a$ между ними, $\varphi = 0^\circ$.

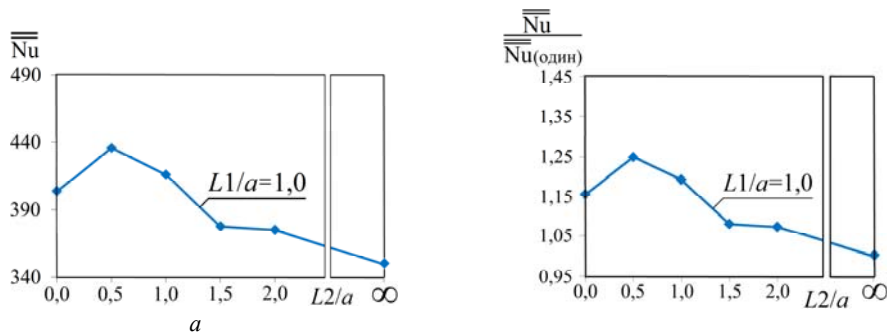


Рис. 4. Теплообмен по всей поверхности модели 2 в зависимости от расстояния между моделями $L2/a$, $\varphi = 0^\circ$, $U_0 = 14$ м/с, $L1/a = 1,0$:
 a – зависимость Nu/Nu (один) от $L2/a$; b – зависимость Nu от $L2/a$

Согласно рис. 4 при смещении $L2/a > 1,0$ модель 2 выходит из следа модели 1, теплообмен от всей поверхности модели 2 резко снижается, стремясь к значениям отдельно стоящей призмы.

Механизм снижения теплообмена при увеличении расстояния между призмами $L2/a$, как свидетельствуют визуализационные картины наблюдения [8], объясняется тем, что позади стоящая модель выходит из аэродинамического следа впереди стоящей модели, снижается воздействие отрывных течений и вихреобразования, что приводит к уменьшению значений коэффициентов теплообмена, при этом картина обтекания приближается к отдельно стоящей призме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Meinders, E.R.* Local convective heat transfer from an array of wall-mounted cubes / E.R. Meinders, T.H. Van Der Meer, K. Hanjalic // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 1997. – P. 335–346.
2. *Meinders, E.R.* Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes / E.R. Meinders, K. Hanjalic // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 1999. – P. 255–267.
3. *Meinders, E.R.* Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configurations of two wall-mounted cubes / E.R. Meinders, K. Hanjalic // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 2002. – P. 465–482.
4. *Терехов, В.И.* Структура течения и теплообмен от одиночного куба, расположенного на поверхности при различных углах атаки / В.И. Терехов, А.И. Гныря, С.В. Коробков // *Теплофизика и аэромеханика.* – 2010. – Т. 17. – № 4. – С. 521–533.
5. *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.
6. *Мокшин, Д.И.* Методика проведения и обработки экспериментов по исследованию локальной и средней теплоотдачи зданий и сооружений / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // *Наука и современность.* – 2014. – № 31. – С. 112–122.
7. *Мокшин, Д.И.* Расчет локального коэффициента конвективной теплоотдачи с помощью программы ЭВМ / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты.* – 2014. – № 13. – С. 216–223.
8. *Мокшин, Д.И.* Структура течения воздушного потока ряда квадратных призм при нелинейном их расположении / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // *Наука третьего тысячелетия: сб. статей Международной научно-практической конференции.* – 2014. – С. 34–38.
9. *Мокшин, Д.И.* Исследование среднего теплообмена отдельностоящих квадратных призм / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты.* – 2014. – № 13. – С. 196–202.

REFERENCES

1. *Meinders E.R., Van Der Meer T.H, Hanjalic K.* Local convective heat transfer from an array of wall-mounted cubes // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1997. Pp. 335–346.
2. *Meinders E.R., Hanjalic K.* Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1999. Pp. 255–267.
3. *Meinders E.R., Hanjalic K.* Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configurations of two wall-mounted cubes // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2002. Pp. 465–482.
4. *Terekhov V.I. Gnyrya A.I., Korobkov S.V.* Struktura techeniya i teploobmen ot odinochnogo kuba, raspolzhenogo na poverkhnosti pri razlichnykh uglakh ataki [Flow and heat transfer

- from a single cube located on the surface at different angles of attack]. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2010. V. 17. No. 4. Pp. 521–533. (rus)
5. Gnyrya A.I., Terekhov V.I., Korobkov S.V. Rezul'taty vizualizatsii techeniya vozdušnogo potoka vdol' ryada iz dvukh kubov, raspolozhennykh na ploskosti drug za drugom [Airflow visualization along two cube tandem]. *Vestnik TSUAB*. 2009. No. 3. Pp. 117–124. (rus)
 6. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Metodika provedeniya i obrabotki eksperimentov po issledovaniyu lokal'noi i srednei teplootdachi zdaniy i sooruzhenii [Experimental technique for local and average building heat-transfer]. *Nauka i sovremennost'*. 2014. No. 31. Pp. 112–122. (rus)
 7. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Raschet lokal'nogo koeffitsienta konvektivnoi teplootdachi s pomoshch'yu programmy EVM [Computation of local coefficient of convective heat-transfer using computer programs]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty*. 2014. No. 13. Pp. 208–215. (rus)
 8. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Struktura techeniya vozdušnogo potoka ryada kvadratnykh prizm pri nelineinom ikh raspolozhenii [The structure of the flow of air flow number of square prisms with a nonlinear their location]. *Proc. Sci. Conf. 'Science of the Third Millennium'*. 2014. Pp. 34–38. (rus)
 9. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Issledovanie srednego teploobmena otdel'nostoyashchikh kvadratnykh prizm [Average heat transfer of square prisms]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty*. 2014. No. 13. Pp 196–202. (rus)