

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*

*КОШИН АНТОН АЛЕКСАНДРОВИЧ, ассистент,
dawghood@mail.ru*

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

*ГАУСС КСЕНИЯ СЕРГЕЕВНА, ассистент,
gauss.ksyu@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*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПРИ ОБТЕКАНИИ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ЗДАНИЙ*

Приведены результаты сажемасляной визуализации отрывных течений при обтекании воздушным потоком моделей в виде квадратных призм, которые моделируют отдельно стоящие здания или же группы зданий, взаимно влияющих друг на друга. В статье представлены картины обтекания воздухом как одиночных квадратных призм, так и их тандемного расположения при линейном и нелинейном смещении относительно направления воздушного потока. Эксперименты проводились при фиксированном числе Рейнольдса $Re = 4,25 \cdot 10^4$ и двух углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° . Относительная высота моделей $H/a = 1, 3$ и 6 .

Ключевые слова: визуализация течений; число Рейнольдса; угол атаки воздушного потока; физическое моделирование.

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

ALEKSEY I. GNYRYA, DSc, Professor,

tsp_tgasu@mail.ru

SERGEY V. KOROBKOV, PhD, A/Professor,

korobkov@hotmail.ru

DMITRY I. MOKSHIN, Instructor,

mokshin@sibmail.com

ANTON A. KOSHIN, Instructor,

dawghood@mail.ru

OLGA O. ANOSHKINA, Research Assistant,

anoshkina_22@mail.ru

KSENIYA S. GAUSS, Instructor,

gauss.ksyu@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

A STUDY OF SLIPSTREAM STRUCTURE IN BUILDING MODEL AIRFLOW

The paper presents results of oil-black visualization of separated air flows around the building models in the form of square prisms that simulate freestanding buildings or a group of buildings having the mutual effect on each other. The airflow patterns are described for both single square prisms and their tandem arrangement at a linear and non-linear displacement relative to the airflow direction. Experiments are carried out at a fixed Reynolds number of $4,25 \cdot 10^4$ and two angles of attack of 0 and 45 degrees. The relative height of the models is 1, 3 and 6.

Key words: airflow visualization; Reynolds number; angle of attack; physical modeling.

Экспериментальное изучение конвективного теплообмена от плохообтекаемых тел, таких как куб, призма, параллелепипед и др., является актуальной задачей при оценке тепловых потерь строительных сооружений. Эта проблема в последнее время приняла особую остроту в связи с ужесточившимися строительными нормами по величине тепловых потерь и, соответственно, необходимостью более точного определения коэффициентов теплоотдачи от наружных поверхностей к окружающему воздуху.

Здания и сооружения имеют различную форму, в том числе форму квадратной призмы, и обтекание трехмерных препятствий является одним из наиболее сложных случаев формирования отрывных течений, не поддающихся в настоящее время достаточно точному численному решению.

В литературе имеется сравнительно небольшое количество работ, направленных на изучение структуры течения и теплообмена одиночной квадратной призмы [1–7]. В имеющихся экспериментально-теоретических работах данного направления решен ряд частных задач, который не может

описать весь спектр возможных воздействий отрывных потоков, формируемых различными гранями.

Работы, посвященные изучению отрывных течений при обтекании воздушным потоком моделей системы зданий при вариации их относительной высоты и расположения, практически отсутствуют.

Данные исследования являются составной частью комплексных экспериментальных исследований аэромеханики и теплообмена моделей системы зданий при вариации их формы и расположения.

Целью настоящих экспериментальных исследований является получение закономерностей процессов турбулентного переноса от моделей в виде квадратных призм, которые моделируют отдельно стоящие здания или же группы зданий, взаимно влияющих друг на друга. Наиболее простой ситуацией является тандем зданий, но и в этом случае возможны многочисленные варианты условий их расположения относительно друг друга и по отношению к направлению ветра. Конечной целью подобных исследований является разработка технически обоснованных норм на тепловые потери через ограждающие конструкции. Для этого необходимо было создать физические модели зданий и провести ряд экспериментов на аэродинамическом стенде, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

Исследованиям теплоотдачи одиночной модели и системы моделей в виде квадратных призм предшествовала программа визуализационных наблюдений.

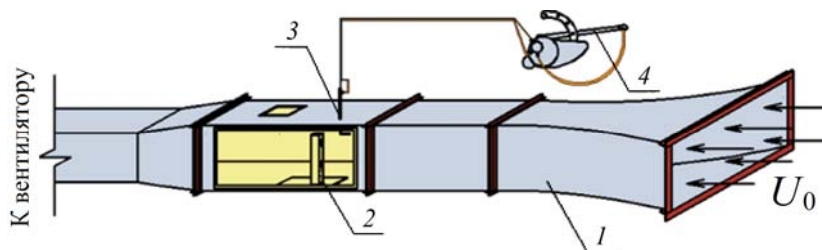


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования структуры течения воздушного потока:
 1 – аэродинамическая труба; 2 – испытываемая модель; 3 – трубка Пито – Прандтля; 4 – микроманометр ММН-2400

Исследование структуры течения воздушного потока при обтекании одиночной призмы различной высоты

В данном разделе приведены результаты исследования и анализ визуализационных измерений отдельно стоящей квадратной призмы, установленной на плоскости, при изменении её относительной высоты $H/a = 1; 3; 6$, где a – размер грани поперечного сечения модели, равный 50 мм. Все модели (6 шт.) изготавливались из органического стекла и устанавливались на подложку, выполненную из того же материала. Приведены качественные картины симметричного обтекания призмы воздушным потоком при углах атаки $\varphi = 0$

и 45° . Опыты были проведены при максимальном числе Рейнольдса ($Re = 4,25 \cdot 10^4$) [8].

В ходе экспериментов все грани призмы, в том числе и верхняя поверхность, а также подложка, на которой устанавливалась модель, покрывались тонким ровным слоем раствора черного цвета, полученного путем смешивания типографской краски и керосина (рис. 2).



Рис. 2. Нанесение сажемазляного раствора на модель

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. 3).

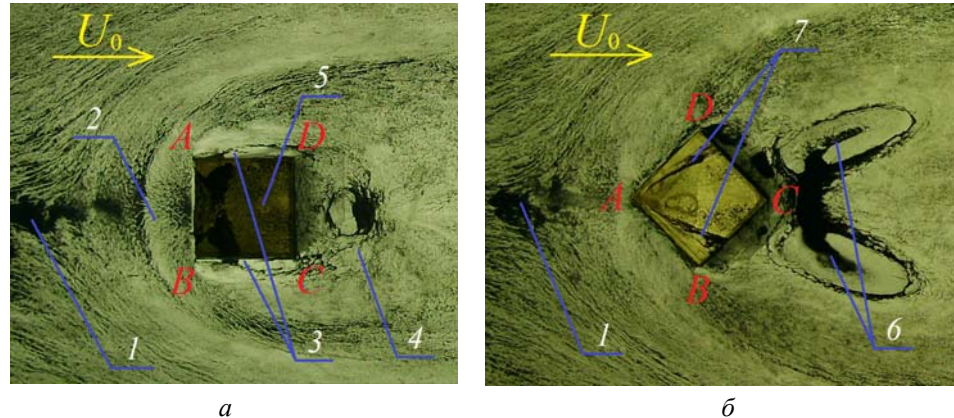


Рис. 3. Схема обтекания одиночной призмы потоком воздуха при $Re = 4,25 \cdot 10^4$:
a – угол атаки воздушного потока $\varphi = 0^\circ$; *b* – угол атаки воздушного потока $\varphi = 45^\circ$; 1 – набегающий поток; 2 – подковообразный вихрь; 3 – зоны рециркуляции; 4 – сводообразный вихрь; 5 – линии тока; 6 – дорожка Кармана; 7 – клинообразные вихри

Как видно из рис. 3, *a*, пограничный слой течения, приближаясь к вертикально установленной призме на плоскости, подвергается трехмерному раз-

делению у грани ($A-B$). Область течения в непосредственной близости от призмы характеризуется наличием подковообразного вихря, возникающего на передней грани и простирающегося вдоль боковых граней модели в направлении вниз по течению. Вблизи подковообразного вихря поток имеет неустойчивый характер. Величина начального подковообразного вихря примерно такая же, как и толщина пограничного слоя свободного потока.

На боковых ($B-C$) и ($D-A$) гранях наблюдается рециркуляция течения. Эти вихри покрывают значительную часть боковых поверхностей. Явление, наблюдаемое в течение сажемазляной визуализации воздушного потока, заключается в неустойчивом, с периодическими пульсациями течения, возникающем ниже верхних по потоку углов боковых граней, где внутренний подковообразный вихрь имеет значительную кривизну и происходит его поворот. Образование зоны рециркуляции на боковых гранях происходит из-за срыва потока на передней грани ($A-B$) и повторного его присоединения с образованием отрывного пузыря.

В области за призмой образуется сводообразный вихрь. Его отпечатки на подложке в результате визуализации обнаружены в виде двух противоположных вращающихся вихрей. Верхняя грань призмы охвачена зоной отрыва, которая начинается около переднего края верхней грани.

Исследование (рис. 3, б) для случая обтекания призмы потоком воздуха при угле атаки $\varphi = 45^\circ$ показало, что помимо общих особенностей течение имеет и ряд отличий. Как видно из рисунка, на верхней грани призмы образуются два конусообразных вихря в виде Δ -структуры. Они совершают спиральное вращение. Эти вихри своими вершинами наклонены к направлению потока.

Установлено, что при увеличении относительной высоты модели H/a картина обтекания потоком воздуха в основании призмы носит схожий характер.

Выявлено, что независимо от угла атаки воздушного потока для модели соотношением $H/a = 1$ характерно значительное влияние пограничного слоя. По мере увеличения относительной высоты модели влияние турбулентных пульсаций снижается.

Исследование структуры течения воздушного потока при обтекании ряда из двух призм, расположенных друг за другом

Данный блок посвящен анализу результатов исследования аэродинамической структуры отрывных потоков тандемно расположенных призм при изменении расстояния между ними в продольном направлении $L1/a$ относительно движения воздушного потока (рис. 4).

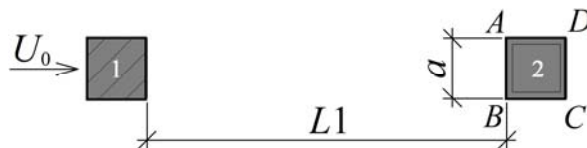


Рис. 4. Схема расположения моделей в следе друг за другом при изменении расстояний между ними $L1/a$

В опытах использовались модели сечением 50×50 мм и высотой 300 мм ($H/a = 6$), изготовленные из оргстекла. Все эксперименты проводились при одном числе Рейнольдса ($Re = 4,25 \cdot 10^4$) и двух крайних углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° [9–13].

При $\varphi = 0^\circ$ принят следующий диапазон калибров: $L1/a$: основные – от 0,5 до 6,0 с шагом 0,5; дополнительные – от 6,0 до 30,0 с интервалом 3,0.

При $\varphi = 45^\circ$ принят следующий диапазон калибров: $L1/a$: основные – 0,5; 1,0; 3,0; 6,0; дополнительные – от 6,0 до 30,0 с интервалом 3,0.

При изменении расстояния $L1/a$ между моделями картина течения имеет ряд особенностей по сравнению с обтеканием одиночной призмы (рис. 5).

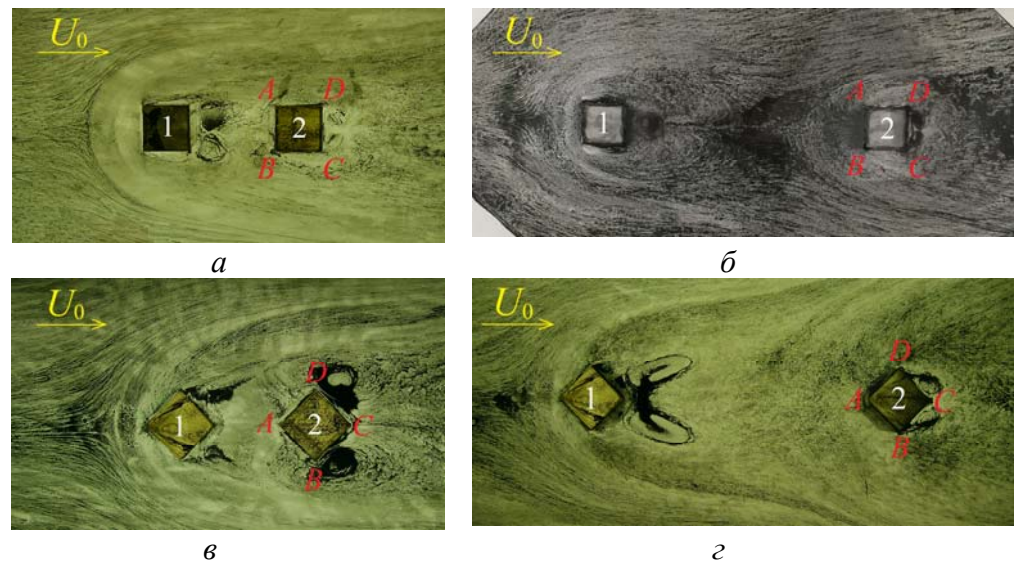


Рис. 5. Картина обтекания двух призм, расположенных в следе друг за другом, при изменении расстояния между моделями:

$a - L1/a = 1,5$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$; $б - L1/a = 6,0$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 0^\circ$; $в - L1/a = 1,5$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 45^\circ$; $г - L1/a = 6,0$, $Re = 4,25 \cdot 10^4$, $\varphi = 45^\circ$

При $\varphi = 0^\circ$ (рис. 5, *a*) и расстоянии между моделями $L1/a = 0,5 \div 4,0$ область влияния сводообразного вихря, образованного за моделью 1, увеличивается, далее при $L1/a = 4,0 \div \infty$ степень его воздействия на модель 2 снижается. Очертания подковообразного вихря перед моделью 2 проявляются только при $L1/a = 6,0$, где также наблюдается присоединение отрывного течения на верхней грани. Зоны рециркуляции, находящиеся на боковых гранях ($B-C$) и ($D-A$) модели 2, уменьшаются с увеличением расстояния $L1/a$ от 0,5 до 6,0, где они практически отсутствуют. Далее при $L1/a = 6,0 \div \infty$ наблюдается интенсивное развитие этого течения. Сводообразный вихрь, образованный за моделью 2, слабо развит при $L1/a = 0,5 \div 3,0$, далее при расстояниях $L1/a = 3,0 \div 4,5$ наблюдается ярко выраженное очертание зоны его влияния. При $L1/a = 4,5 \div \infty$ воздействие этого вихря на модель 2 снижается.

При $\varphi = 45^\circ$ (рис. 5, б) и расстоянии между моделями $L1/a = 1,5$ наблюдается увеличение зоны влияния сводообразного вихря, образованного за моделью 1, и прослеживается его смещение к боковым ребрам *B* и *D* модели 2. Однако его влияние распространяется не только на фронтальные, но и на кормовые грани. При увеличении расстояния между моделями $L1/a = 1,5 \rightarrow \infty$ область влияния сводообразных вихрей, образованных как за моделью 1, так и за моделью 2, уменьшается до масштабов отдельно стоящей призмы.

При полном сближении $L1/a = 0$ (рис. 6, а) модели, находящиеся под углом атаки 0° , проявляют свойства, аналогичные одиночной. Модели под углом 45° (рис. 6, б) формируют комплексную турбулентную зону у кормовых граней первой модели и у фронтальных граней второй.

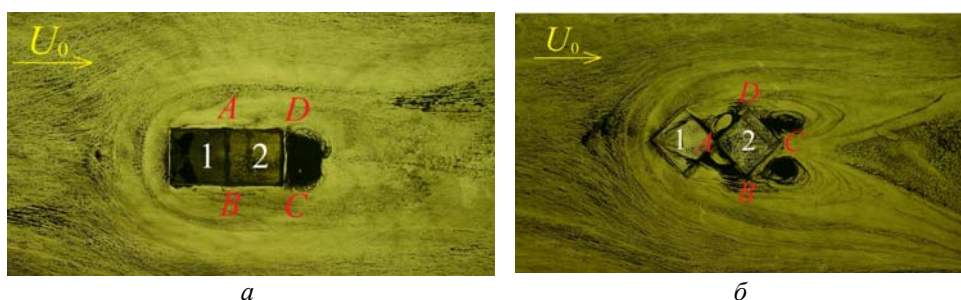


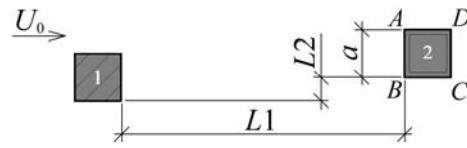
Рис. 6. Визуализация течения воздушного потока вблизи тандема моделей зданий:
а – $L1/a = 0$, угол атаки 0° ; б – $L1/a = 0$, угол атаки 45°

Таким образом, при увеличении калибра между призмами ($L1/a$) картина обтекания воздушным потоком модели 2 приближается к модели 1, что обусловлено ее постепенным выходом из аэродинамической «тени». При этом отчетливо обнаруживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночно стоящей призмы.

Очевидно, что механизм снижения теплообмена (Nu) и динамических величин (C_p) модели 2 при увеличении расстояния между призмами $L1/a$, как свидетельствуют об этом результаты визуализационных наблюдений, будет объясняться снижением воздействия отрывных течений на модель 2, находящуюся в следе, и уменьшением степени влияния вихреобразования между моделями.

**Исследование структуры течения воздушного потока
при обтекании ряда из двух моделей при изменении расстояния
между ними в поперечном направлении
относительно направления движения воздушного потока**

Основным предметом исследования в данном разделе является опытное изучение визуализационных измерений тандема из двух квадратных призм при изменении расстояния между ними в поперечном направлении $L2/a$ относительно движения воздушного потока (рис. 7).

Рис. 7. Схема расположения моделей при поперечном их смещении $L2/a$

Эксперименты проводились при следующих калибрах: $L2/a = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ и $L1/a = 0,25; 0,5; 3,0; 6,0$. Число Рейнольдса (Re) в опытах было постоянным и равнялось $4,25 \cdot 10^4$, угол атаки воздушного потока $\varphi = 0^\circ$ [12, 14–18].

При изменении расстояния $L2/a$ между моделями аэродинамическая картина имеет сложный характер, который можно проследить на рис. 8.

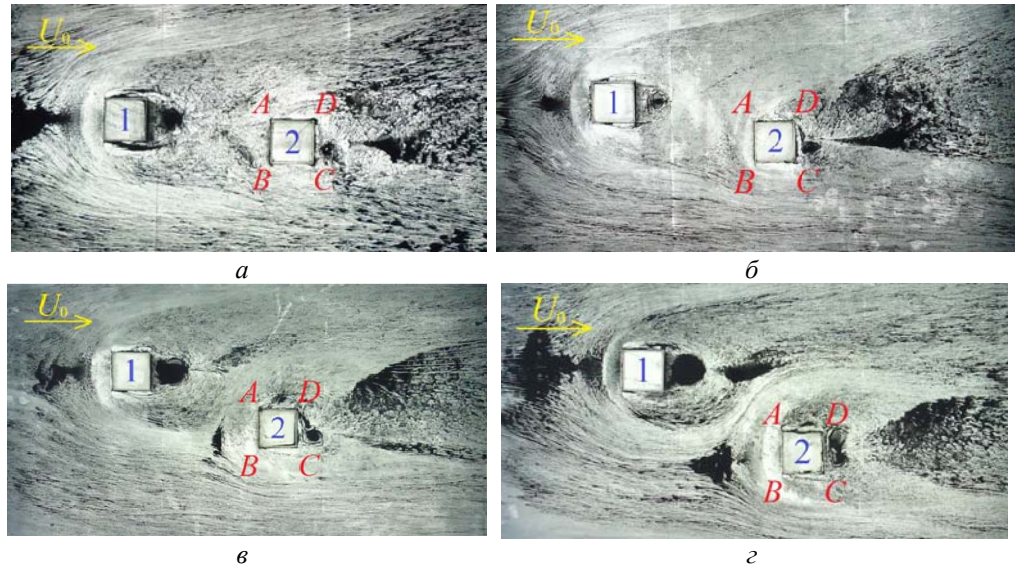


Рис. 8. Картина обтекания двух призм, смещенных в поперечном направлении:
 а — $L2/a = 0,5, L1/a = 3, \varphi = 0^\circ$; б — $L2/a = 1,0, L1/a = 3, \varphi = 0^\circ$; в — $L2/a = 1,5, L1/a = 3, \varphi = 0^\circ$; г — $L2/a = 2,0, L1/a = 3, \varphi = 0^\circ$

При малом смещении $L2/a = 0,5$ (рис. 8, а) изменение потока наблюдается непосредственно за моделью 1 в виде отклонения зоны вторичного отрыва перед моделью 2 и вихревой дорожки за ней. Грань ($D-A$) попадает в след модели 1, в то время как грань ($B-C$) оказывается под воздействием вторичного отрыва, сформированного ребром B . По мере увеличения смещения $L2/a$ (рис. 8, б, в) модель 2 гранью ($A-B$) входит в зону действия первичного отрыва, и разделение потока становится более явным. Вихревая дорожка в следе модели 2 отклоняется в сторону ребра D под воздействием отрывной струи. Также под воздействием вторичного разделения потока у грани ($D-A$) можно проследить отрывное течение большой интенсивности, которое оказывает влияние на вихревую дорожку всего тандема.

При смещении $L2/a = 2$ имеет место интерференция двух отрывных струй от моделей 1 и 2, что приводит к увеличению скорости воздушного потока, проходящего между моделями, и, как результат, увеличению разрежения на грани ($D-A$).

При большом смещении $L2/a \geq 2,0$ (рис. 8, ε) картина обтекания второй призмы приближается к картине обтекания впереди стоящей призмы или одиночной призмы. При этом отчетливо обнаруживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночно стоящей призмы.

Наиболее выраженное изменение структуры течения воздушного потока происходит при расстоянии между моделями $L1/a = 0,5 \div 1,0$ и смещении $L2/a = 0,5 \div 1,0$ (рис. 9).

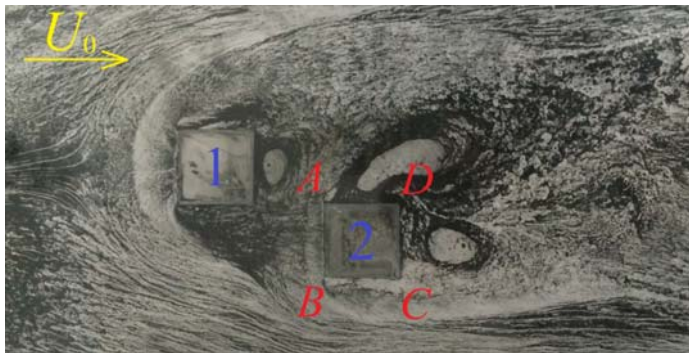


Рис. 9. Визуализация течения воздуха вблизи тандема квадратных призм при поперечном смещении $L2/a = 1,0$, $L1/a = 1,0$, $\varphi = 0^\circ$

При расстояниях между моделями $L1/a = 1,0$ и $L2/a = 1,0$ (рис. 9) 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.

Из всего сказанного выше можно сделать вывод, что при увеличении калибра между призмами ($L2/a$) картина обтекания воздушным потоком модели 2 приближается к картине обтекания модели 1, а следовательно, и одиночной модели. При этом отчетливо обнаруживаются те же режимы течения, что и при обтекании потоком воздуха одиночно стоящей призмы.

Очевидно, что структура сложных отрывных течений будет непосредственно сказываться на характере изменения средней теплоотдачи и ветрового давления. Одной из основных особенностей является наличие вихревых зон между призмами 1 и 2. С увеличением калибра ($L2/a$), как показали визуализационные испытания, влияние вихревых зон на модель 2 от модели 1 ослабевает, что в итоге приводит к выравниванию воздушного потока, а следовательно, понижению процессов теплообмена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Goldstein, R.J.* Convective mass transfer from a square cylinder and its base plate / R.J. Goldstein, S.Y. Yoo, M.K. Chung // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* – 1990. – V. 33. – № 11. – P. 9–18.
2. *Igarashi, T.* Local heat transfer from a square prism to an air stream / T. Igarashi // *Int. J. Heat and Mass Transfer.* – 1986. – V. 29. – № 5. – P. 777–784.
3. *Reiher, H.* Der warmeubergang von stromender luft an rohrbundel in kreuzstrom / H. Reiher // *VDI Forshungsheft.* – 1925. – № 269. – S. 47.
4. *Wall pressures* of separation-reattachment flow on a square in aniform flow / J.M. Robertson, J.B. Wedding, J.A. Peterka, J.E. Cermak // *J. Ind. Aerodyn.* – 1977/1978. – № 2. – P. 345–359.
5. *Sakata, H.* A numerical analysis of unsteady separated flow by discrete vortex model (1st Report, Flow around a square prism) / H. Sakata, T. Adashi, T. Inamura // *Trans. Soc. Mech. Engrs.* – 1983. – P. 49–440, 801–808.
6. *Dong-Hyeog Yoon.* Heat transfer enhancement in channel flow using an inclined square cylinder / Dong-Hyeog Yoon, Kyung-Soo Yang, Choon-Bum Choi // *J. of Heat Transfer.* – 2009. – V. 131. – P. 1–4.
7. *Dutta, S.* Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties / S. Dutta, K. Muralidhar, P.K. Panigrahi // *Experiments in Fluids.* – 2003. – V. 34. – P. 16–23.
8. *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.
9. *Аэродинамическая структура* обтекания моделей зданий. Сажемазляная визуализация и поля давлений / А.А. Кошин, Д.И. Мокшин, С.В. Коробков, А.И. Гныря, В.И. Терехов // *Сб. тр. Международ. научн. конф. «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании», Москва, 19–21 октября 2011 г.* – М. : Изд-во ФГБОУ ВПО «МГСУ». – 2011. – Т. 1. – С. 138–143.
10. *Комплексные экспериментальные исследования* аэродинамики и теплообмена моделей зданий и сооружений / А.И. Гныря, С.В. Коробков, А.А. Кошин, Д.И. Мокшин // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2011. – № 4 – С. 113–126.
11. *Исследование теплообмена* тандема моделей зданий при линейном их расположении / А.И. Гныря, С.В. Коробков, А.П. Бояринцев, Д.И. Мокшин // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2014. – № 5. – С. 90–97.
12. *Внешний теплообмен* тандема моделей зданий, расположенных в следе / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков, А.И. Гныря, В.И. Терехов // *Сб. докладов: Всероссийская конференция «XXXI Сибирский теплофизический семинар», посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе.* – Новосибирск : Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2014. – С. 97–102.
13. *Мокшин, Д.И.* Исследование структуры течения воздушного потока ряда квадратных призм при линейном их расположении / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // *Новый взгляд. Международный научный вестник.* – Вып. 5. – Новосибирск : Издательство ЦРНС, 2014. – С. 121–130.
14. *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 (28 июля 2014 г).* – Уфа : Аэтерна, 2014. – С. 34–38.
15. *Мокшин, Д.И.* Исследование структуры течения воздушного потока ряда квадратных призм при смещении одной из моделей от продольной оси канала / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: сб. материалов XIII Международной научно-практической конференции.* – Новосибирск : Издательство ЦРНС, 2014. – С. 202–208.
16. *Моделирование вихревой структуры* и ветровых нагрузок при нелинейном расположении двух квадратных призм / А.А. Кошин, С.В. Коробков, А.И. Гныря, В.И. Терехов // *Сб. докладов: Всероссийская конференция «XXXI Сибирский теплофизический семинар», посвященный 100-летию со дня рождения академика С.С. Кутателадзе.* – Новосибирск : Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2014. – С. 78–84.

17. *Ветровое давление* в тандеме моделей зданий при их нелинейном расположении / А.И. Гныря, С.В. Коробков, Д.И. Мокшин, А.А. Кошин, В.И. Терехов // Энерго-и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: Мат. науч. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 24–26 марта 2015 г. – Новосибирск : Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2015. – С. 71–74.
18. *Интегральный теплообмен* тандема моделей зданий при малых расстояниях между ними и вариации их расположения / А.И. Гныря, С.В. Коробков, Д.И. Мокшин, А.А. Кошин, В.И. Терехов // Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий: Мат. науч. конф. с междунар. участием, Новосибирск, 24–26 марта 2015 г. – Новосибирск : Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2015. – С. 75–78.

REFERENCES

1. Goldstein R.J., Yoo S.Y., Chung M.K. Convective mass transfer from a square cylinder and its base plate. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1990. V. 33. No. 11. Pp. 9–18.
2. Igarashi T. Local heat transfer from a square prism to an air stream. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 1986. V. 29. No. 5. Pp. 777–784.
3. Reiher H. Der warmeubergang von stromender luft an rohrbundel in kreuzstrom . VDI Forschungsheft. 1925. No. 269. P. 47.
4. Robertson J.M., Wedding J.B., Peterka J.A., Cermak J.E. Wall pressures of separation-reattachment flow on a square in uniform flow. *J. Ind. Aerodyn*. 1977/1978. No 2. Pp. 345–359.
5. Sakata H., Adashi T., Inamura T. A numerical analysis of unsteady separated flow by discrete vortex model (1st Report, Flow around a square prism). *Trans. Soc. Mech. Engrs*. 1983. Pp. 49–440, 801–808.
6. Dong-Hyeog Yoon, Kyung-Soo Yang, Choon-Bum Choi. Heat transfer enhancement in channel flow using an inclined square cylinder. *J. of Heat Transfer*. 2009. V. 131. Pp. 1–4.
7. Dutta S., Muralidhar K., Panigrahi P.K.. Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties. *Experiments in Fluids*. 2003. V. 34. Pp. 16–23.
8. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Issledovanie srednego teploobmena otdel'nostoyashchikh kvadratnykh prizm [A study of heat transfer between freestanding square prisms]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty*. 2014. No. 13. Pp. 196–202. (rus).
9. Koshin A.A., Mokshin D.I., Korobkov S.V., Gnyrya A.I., Terehov V.I. Aerodinamicheskaya struktura obtekaniya modelei zdaniy. Sazhemaslyanaya vizualizatsiya i polya davlenii [Aerodynamic structure of building model airflow. Oil-black visualization and pressure fields]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education'*, 2011. V. 1. Pp. 138–143. (rus)
10. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Koshin A.A., Mokshin D.I., Terehov V.I. Kompleksnye eksperimental'nye issledovaniya aerodinamiki i teploobmena modelei zdaniy i sooruzhenii [Complex experimental studies of aerodynamics and heat transfer between building models]. *Vestnik TSUAB*. 2011. No. 4. Pp. 113–126. (rus)
11. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Boyarintsev A.P., Mokshin D.I. Issledovanie teploobmena tandem modelei zdaniy pri lineinom ikh raspolozhenii [Heat transfer in building models at tandem linear arrangement]. *Vestnik TSUAB*, 2014. No. 5. Pp. 90–97. (rus)
12. Mokshin D.I., Korobkov S.V., Gnyrya A.I., Terehov V.I. Vneshnii teploobmen tandem modelei zdaniy, raspolozhennykh v slede [External heat tandem models of buildings, located in the following]. *Coll. Papers All-Rus. Conf. 'XXXI Siberian Thermophysical Seminar'*, 2014. Pp. 97–102. (rus)
13. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Issledovanie struktury techeniya vozdušnogo potoka ryada kvadratnykh prizm pri lineinom ikh raspolozhenii [A study of airflow structure of square prisms at linear arrangement]. *Novyi vzglyad. Mezhdunarodnyi nauchnyi vestnik*, 2014. No. 5. Pp. 121–130. (rus).
14. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Struktura techeniya vozdušnogo potoka ryada kvadratnykh prizm pri nelineinom ikh raspolozhenii [Airflow structure of square prisms with nonlinear location]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Science of the Third Millennium'*. 2014. Pp. 34–38. (rus)

15. Mokshin D.I., Korobkov S.V. Issledovanie struktury techeniya vozdušnogo potoka ryada kvadratnykh prizm pri smeshchenii odnoi iz modelei ot prodol'noi osi kanala [Investigation of airflow structure of square prisms at longitudinal displacement of one of the models]. *Proc. 13th Int. Sci. Conf. 'Basic and Applied Research: Problems and Outcomes'*. 2014. Pp. 202–208. (rus)
16. Koshin A.A., Korobkov S.V., Gnyrya A.I., Terekhov V.I. Modelirovanie vikhrevoi struktury i vetrovykh nagruzok pri nelineinom raspolozhenii dvukh kvadratnykh prizm [Simulation of vortex structure and wind loads at the nonlinear location of two square prisms]. *Coll. Papers All-Rus. Conf. 'XXXI Siberian Thermophysical Seminar'*, 2014. Pp. 78–84. (rus)
17. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Mokshin D.I., Koshin A.A., Terekhov V.I. Vetrovoe davlenie v tandeme modelei zdanii pri ikh nelineinom raspolozhenii [Wind pressure in tandem building models at nonlinear location]. *Proc. Sci. Conf. 'Energy and Resource Efficiency of Low-Rise Residential Buildings'*, 2015. Pp. 71–74. (rus)
18. Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Mokshin D.I., Koshin A.A., Terekhov V.I. Integral'nyi teploobmen tandema modelei zdanii pri malykh rasstoyaniyakh mezhdru nimi i variatsii ikh raspolozheniya [Integrated heat-exchange between tandem building models at small distances and various locations]. *Proc. Sci. Conf. 'Energy and Resource Efficiency of Low-Rise Residential Buildings'*. 2015. Pp. 75–78. (rus)