

DOI: 10.18721/JPM.13106  
УДК 532.526.4, 533.6.08

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ЦИЛИНДРА, ПОГРУЖЕННОГО В СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

**Ю.С. Чумаков, А.М. Левченя, Е.Ф. Храпунов**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлены новые экспериментальные данные, количественно характеризующие поля осредненной по времени скорости, осредненной температуры, интенсивности пульсаций скорости и температуры, а также корреляции пульсаций скорости и температуры в окрестности круглого цилиндра, установленного на вертикальной нагретой поверхности, на высоте, соответствующей развитому турбулентному режиму течения. Систематические измерения в средней вертикальной (проходящей через ось цилиндра) плоскости выполнены методами термоанемометрии и термометра сопротивления. Проведено сравнение измеренных профилей осредненной скорости и температуры с результатами численного моделирования на основе уравнений Рейнольдса. Достигнуто хорошее соответствие опытных и расчетных данных, которые в целом указывают на кардинальную перестройку течения как перед цилиндром в области формирования подковообразных вихревых структур, так и за препятствием, в ближней отрывной зоне и зоне восстановления свободноконвективного пристенного течения.

**Ключевые слова:** круглый цилиндр, свободноконвективный теплообмен, пограничный слой, термоанемометрия, зона влияния

**Ссылка при цитировании:** Чумаков Ю.С., Левченя А.М., Храпунов Е.Ф. Экспериментальное исследование течения в зоне влияния цилиндра, погруженного в свободноконвективный пограничный слой на вертикальной поверхности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2020. Т. 13. № 1. С. 66–77. DOI: 10.18721/JPM.13106

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## **AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE FLOW IN THE AREA OF INFLUENCE OF A CYLINDER IMMersed IN THE FREE CONVECTIVE BOUNDARY LAYER ON A VERTICAL SURFACE**

**Yu.S. Chumakov, A.M. Levchenya, E.F. Khrapunov**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

New experimental data that quantitatively characterize fields of the mean velocity and temperature, the intensity of temperature and velocity pulsations, and also velocity-temperature correlations in the near zone of a circular cylinder placed on the vertical heated surface at the height corresponding to the fully turbulent flow regime have been presented. Systematic measurements in the middle vertical plane (the plane that contains the cylinder axis) were performed using constant temperature anemometer and resistance temperature detectors. The experimental data was compared with numerical simulation one obtained through solving the RANS equations. The overall data were in good agreement and indicated the cardinal restructuring of the flows both before the cylinder (where the horseshoe-shaped vortex formed) and behind the obstacle (in the near separated area and the recovery one of the natural convective near-wall layer).

**Keywords:** circular cylinder, free-convective heat exchange, hot wire anemometry, area of influence

**Citation:** Chumakov Yu.S., Levchenya A.M., Khrapunov E.F., An experimental study of the flow in the area of influence of a cylinder immersed in the free convective boundary layer on a vertical surface, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 13 (1) (2020) 66–77. DOI: 10.18721/JPM.13106

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

### Введение

Характерные особенности теплообмена в случае турбулентного режима свободной конвекции, развивающейся у вертикальных нагретых поверхностей, весьма важны в различных приложениях, таких как охлаждение протяженных поверхностей теплообменников, строительство высотных зданий и сооружений, пожарная безопасность, энергетика, безопасность атомных реакторов и т.п. В качестве упрощенной модели подобных течений, во многих работах рассматривается задача о развитии турбулентного свободноконвективного пограничного слоя вдоль вертикальной нагретой пластины.

В большинстве экспериментальных исследований развития пограничного слоя при свободной конвекции, анализировалось течение воздуха при сравнительно небольших перепадах абсолютной температуры (не превышающих 30 % от температуры окружающей среды). Измерения основных характеристик течения и теплообмена, таких как профили средней температуры и средней скорости, напряжение сдвига на стенке, были выполнены Ч. Уорнером и В. Арпачи [1], Р. Чизрайтом [2], А. Пировано и др. [3], Р. Смитом [4], Т. Цудзи и Я. Нагано [5], Ю.С. Чумаковым [6, 7]. Эксперименты, охватывающие измерения различных характеристик турбулентности, были проведены Р. Смитом [4], Р. Чизрайтом и К. Доуном [8], М. Миямото и др. [9], Р. Чизрайтом и Э. Иерокипиотисом [10], Т. Цудзи и Я. Нагано [5, 11], С.Б. Никольской и Ю.С. Чумаковым [12], О.А. Кузьмицким и др. [13]. Обобщение накопленных экспериментальных результатов способствует более глубокому пониманию основных свойств течения и особенностей развития турбулентного режима для этого общего случая.

Во многих практических приложениях свободноконвективный пограничный слой, образующийся на нагретой вертикальной поверхности, может быть существенно воз-

мущен одиночным препятствием или совокупностью нескольких препятствий. Такими «макросшероховатостями» могут быть конструкции промышленных устройств или жилых зданий (крупногабаритные контейнеры для хранения отработанного ядерного топлива, здания с солнечными панелями и т.п.). В ряде случаев препятствия преднамеренно вводят в свободноконвективный пограничный слой, чтобы управлять или контролировать его поведение и тем самым интенсифицировать теплообмен. Примерами подобных исследований могут служить работы [14 – 16, 17]. Как правило, для улучшения теплообмена в режиме свободной конвекции, на нагреваемой поверхности устанавливается система вертикальных ребер. В последнее время особое внимание уделяется использованию V-образных ребер, которые способствуют существенной интенсификации теплоотдачи [18 – 20]. Большое внимание уделяется исследованию проблем управления потоком и интенсификации теплообмена в пограничном слое, возникающем на протяженной вертикальной нагретой пластине, при турбулентном режиме свободной конвекции. Некоторые вопросы увеличения теплопередачи с помощью ребер различной высоты изучены на экспериментальных установках в работах [21, 22]. Авторы работы [23] сравнили эффективность интенсификаторов теплообмена в виде одной длинной пластины и ряда коротких, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга и установленных поперек направления развития пограничного слоя. Проведенные эксперименты показали, что в случае использования поперечного ряда коротких пластин можно добиться большего возмущения течения в следе за этими препятствиями и тем самым существенно увеличить интенсивность теплообмена.

В работах [24, 25] рассматривались особенности формирования структуры течения и теплообмен перед полубесконечным цилиндром, пронизывающим турбулентный

свободноконвективный пограничный слой, формирующийся на вертикальной нагретой поверхности. Особое внимание уделялось изучению эффектов, вызванных образованием подковообразных вихревых структур, с помощью трехмерных расчетов на основе RANS. Результаты расширенного исследования, проведенного на основе RANS для случая цилиндра конечной высоты, возмущающего пограничный слой, были изложены в работе [26]. Авторы анализировали влияние высоты цилиндра, а также тепловых условий на его поверхности, преобразующих структуру течения и теплообмен в передней и тыльной частях этого цилиндра.

В настоящей работе представлены результаты измерений средних и пульсационных характеристик полей скорости и температуры в окрестности круглого цилиндра, установленного на вертикальной нагретой поверхности, на высоте, соответствующей развитому турбулентному режиму течения. Проведен также анализ полученных данных.

### Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования проведены на стенде, созданном в лаборатории гидроаэродинамики Институ-

та прикладной математики и механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в 1990-х годах [6, 7] и модернизированном в последние три года (рис. 1). Генератором свободноконвективного воздушного потока является вертикальная алюминиевая пластина 4 шириной 90 см и высотой 495 см. С обратной стороны пластины находятся 25 нагревателей (на рис. 1 не показаны), работой которых управляет электронная система, способная поддерживать заданный тепловой режим длительное время.

Если задавать определенный режим каждой из 25 секций, то можно моделировать различные законы нагрева поверхности по ее высоте и, в частности, режим постоянной температуры поверхности. Благодаря большой высоте пластины удается реализовать все три режима воздушного течения: ламинарный, переходный и развитый турбулентный, вплоть до значений числа Грасгофа  $4,5 \cdot 10^{11}$ .

Для передвижения измерительного датчика 13 в пространстве образующегося течения, используется координатное устройство, обеспечивающее точность перемещения около 0,5 мм по вертикальной координате  $X$ , а по нормальной к поверх-

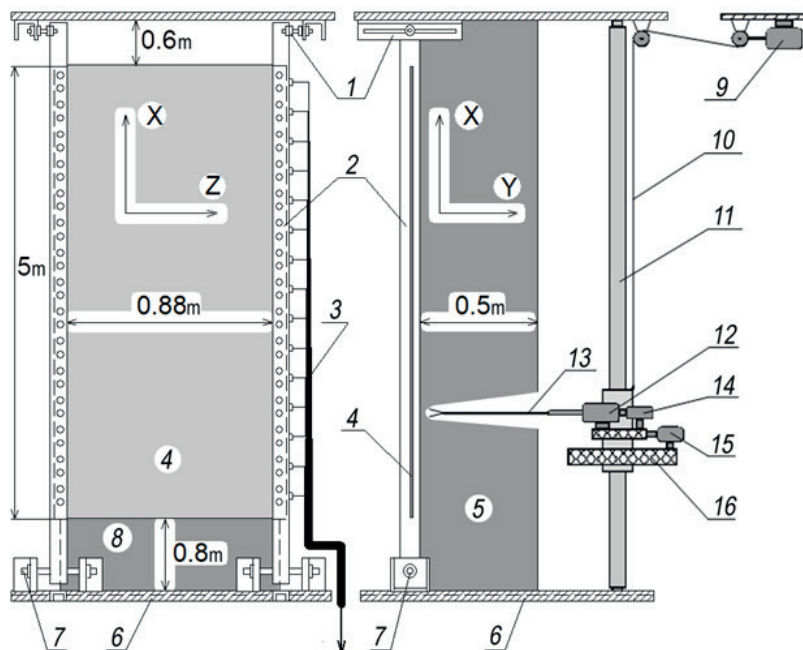


Рис.1. Схема стенда с нагреваемой вертикальной пластиной и координатным устройством:

- 1 – верхнее крепление; 2 – вертикальные опоры; 3 – кабели датчиков температуры;
- 4 – нагреваемая пластина; 5 – боковые шторки; 6 – фундамент; 7 – нижнее шарнирное крепление;
- 8 – задняя шторка; 9, 15 – электродвигатели; 10 – трос; 11 – направляющие стойки; 12 – система фиксации державки датчика; 13 – зонд; 14 – шаговый двигатель; 16 – подвижная каретка

ности координате  $Y$  (поперек пограничного слоя), – порядка 0,001 мм; при этом перемещение по нормальной координате осуществляется с помощью шагового двигателя 14 по заданной программе. Измерение параметров потока в одном сечении пограничного слоя выполняется полностью автоматически.

Необходимо отметить, что столь высокая точность перемещения датчика 13 поперек пограничного слоя возможна только при движении в одном направлении, например, от поверхности. Алгоритм перемещения датчика в первую точку у поверхности использует реверсивную форму движения, что существенно снижает точность определения координаты этой точки. В данной работе точность определения нормальной координаты первой точки измерения была не хуже 0,1 мм. Далее движение датчика происходит в одном направлении и точность перемещения соответствует заявленной выше (0,001 мм).

Процедура измерения скорости и температуры в заданной точке пространства одинакова и заключается в следующем. Аналоговый сигнал, соответствующий температуре (или скорости), с помощью аналого-цифрового преобразователя оцифровывается согласно заданным параметрам: количество ( $N$ ) и частота ( $Hr$ ) выборок. В данной работе  $N = 2000$ , а  $Hr = 100$  Гц; таким образом, время обработки сигнала в заданной точке составляет 20 с. Далее определяются среднее и среднеквадратичное значения (RMS) пульсаций данной величины.

#### Рабочий участок и методика измерений

Изучалась зона взаимодействия развитого турбулентного свободноконвективного пограничного слоя с трехмерным препятствием в виде низкотеплопроводного (адиабатического) цилиндра диаметром 40 мм, с такой же высотой (рис. 2, *a*). Цилиндр

устанавливался на высоте 1800 мм, отсчитываемой от передней кромки пластины, что, при реализованном нагреве пластины до 60 °С и температуре внешнего воздуха около 26 °С, соответствует значению числа Грасгофа (традиционно определяемого), равному приблизительно  $2 \cdot 10^{10}$ . При данном числе Грасгофа натекающий на цилиндр слой является турбулентным, а его толщина примерно в четыре раза превосходит высоту установленного цилиндра.

Методом термоанемометрии (ТА) и с помощью термометра сопротивления выполнены систематические совместные измерения полей осредненных скорости и температуры в средней вертикальной (проходящей через ось цилиндра) плоскости, интенсивности пульсаций скорости и температуры, а также корреляции последних.

Известно, что при использовании метода ТА для измерения скорости в неизотермическом потоке необходимо учитывать влияние температуры при расшифровке показаний термоанемометра. Для рассматриваемого течения, которое характеризуется небольшими средними скоростями и большим уровнем пульсаций, обычно используемый метод термокомпенсации по средней температуре может приводить к весьма неточным измерениям актуальной скорости. В настоящей работе для измерений применялся оригинальный метод термокомпенсации, описанный в статье [27]. Согласно указанному методу, показание термоанемометра, соответствующее актуальной скорости в данной точке пространства, расшифровывается с учетом актуальной температуры в той же точке. Для реализации метода используется специальная калибровочная установка [27], основным принципом работы которой является равномерное движение датчика по неравномерно нагретому неподвижному воздуху. Установка позволяет калибровать датчики при скоростях от 1 до 50 см/с при температуре воздуха от 20 до

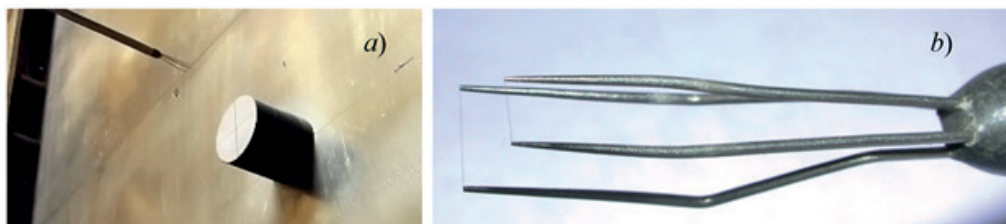


Рис.2. Фрагменты экспериментальной установки: *a* – пластина с установленным на ней цилиндром (в его окрестности виден измерительный зонд); *b* – двухниточный зонд для одновременного измерения актуальных значений скорости течения и температуры воздуха

80 °С. Результаты калибровки представляются в виде зависимости напряжения с термоанемометра от скорости потока, а коэффициенты в этой зависимости являются функциями температуры.

Таким образом, для измерения скорости в неизотермическом потоке зонд должен состоять, как минимум, из двух датчиков. Один датчик (холодная нить) используется для измерения температуры, а другой (горячая нить) – для измерения напряжения, зависящего от скорости потока и его температуры. По измеренной температуре определяются коэффициенты калибровки и вычисляется скорость в данной точке потока.

На рис. 2, *b* представлена фотография двухниточного зонда, использованного в настоящей работе для измерения актуальных значений температуры и скорости. Чувствительными элементами служат вольфрамовые проволочки диаметром 5 мкм и длиной 3,5 мм. В процессе измерений зонд ориентируется так, чтобы холодная нить находилась вверх по потоку относительно горячей нити: это уменьшает влияние теплового «микротока» от горячей нити. При этом обе нити располагаются горизонтально и параллельно поверхности пластины, что позволяет очень близко придвинуть зонд к ней. Следует иметь в виду, что указанное расположение датчика скорости (горячей нити) соответствует измерению модуля вектора актуальной скорости, лежащего в средней вертикальной плоскости.

### Результаты измерений и их обсуждение

Результаты измерений характеристик потока в нескольких нормальных сечениях перед и за цилиндром приведены на рис. 3 – 5. Здесь следует заметить, что «температурная» и «скоростная» нити датчика разнесены в пространстве на 2 мм; при этом, как отмечалось выше, скоростная нить располагается над температурной. Данное обстоятельство определяет небольшие сдвиги в значениях вертикальной координаты  $X$  на легендах приводимых графиков, которые идентифицируют положение представляемых профилей различных измеряемых величин. Профили здесь и далее обозначены на легендах графиков указанием расстояния  $dX$  от соответствующей измерительной нити до ближайшей кромки цилиндра (передней или кормовой). Расстояние до пластины, по нормали к ней, нормировано на высоту цилиндра  $h = 40$  мм.

На рис. 3 представлены профили средней скорости и ее пульсаций. Вертикальной линией на этих и следующих графиках с экспериментальными данными отмечено положение торца цилиндра. Развившийся на пластине статистически двумерный свободноконвективный пограничный слой, с максимумом скорости в нем около 0,4 м/с, тормозится по мере приближения к передней кромке цилиндра (рис. 3, *a*), а в ближайших к ней трех сечениях заметно возрастание модуля скорости в области  $y/h > 1$ , что соответствует зоне ускорения потока, перетекающего через торец цилиндра. В ближнем следе за цилиндром (рис. 3, *b*) область ускоренного течения над торцом сохраняет свое присутствие в первых сечениях после задней кромки, а вблизи поверхности, в аэродинамической тени цилиндра, так же как и перед ним, наблюдается существенное снижение модуля скорости, особенно в области рециркуляции. При дальнейшем продвижении вниз по потоку происходит постепенное восстановление свободноконвективного пограничного слоя. На рис. 3, *c*, *d* показаны отдельные измеренные профили среднеквадратичных значений (RMS) пульсаций скорости. К сожалению, метод ТА не позволяет проводить надежные измерения скорости в непосредственной близости от высокотеплопроводной стенки. В нашем случае толщина «запретной зоны» составляет около 2 мм, что соответствует 5% от высоты препятствия.

На рис. 4, аналогичном рис. 3, представлены профили средней температуры и ее пульсаций в сечениях перед и за цилиндром. Профили температуры в большинстве сечений перед цилиндром и вдали от него весьма схожи. У передней кромки препятствия монотонность профилей температуры несколько нарушается, и на расстоянии в несколько миллиметров перед кромкой (в области менее 10% от высоты тела) наблюдается существенное локальное снижение температуры. Обращение к приведенным в работе [26] результатам численного моделирования позволяет заключить, что это снижение отвечает области образования подковообразной вихревой структуры, где относительно холодный поток из внешней части пограничного слоя подсасывается к поверхности пластины под действием подковообразного вихря. В следе за цилиндром (рис. 4, *b*) наблюдается большее расслоение между профилями в разных сечениях.

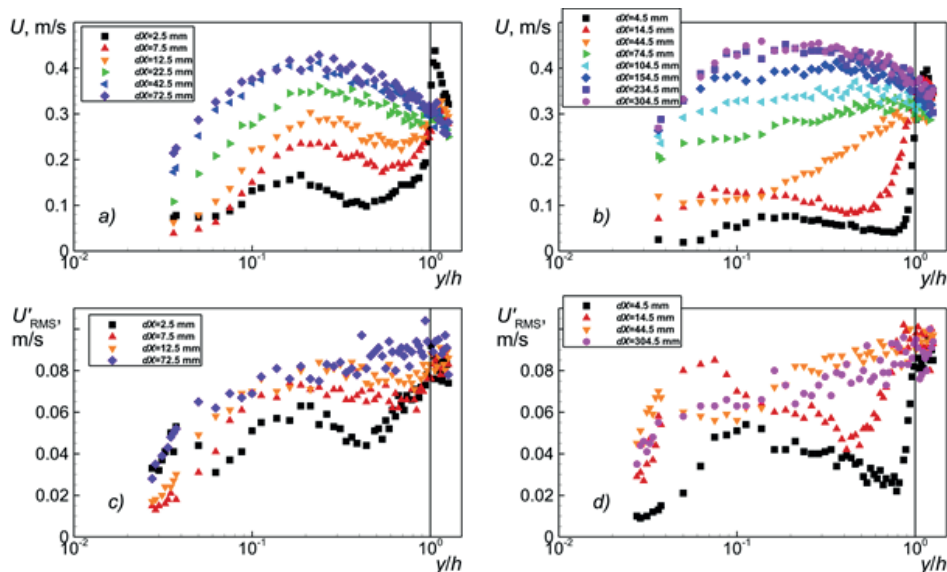


Рис. 3. Результаты измерения поля скорости течения: средняя скорость перед (a) и за (b) цилиндром; пульсации скорости перед (c) и за (d) цилиндром;  $dX$  – расстояния от соответствующей измерительной нити до ближайшей кромки цилиндра; вертикальными линиями отмечено положение торца цилиндра

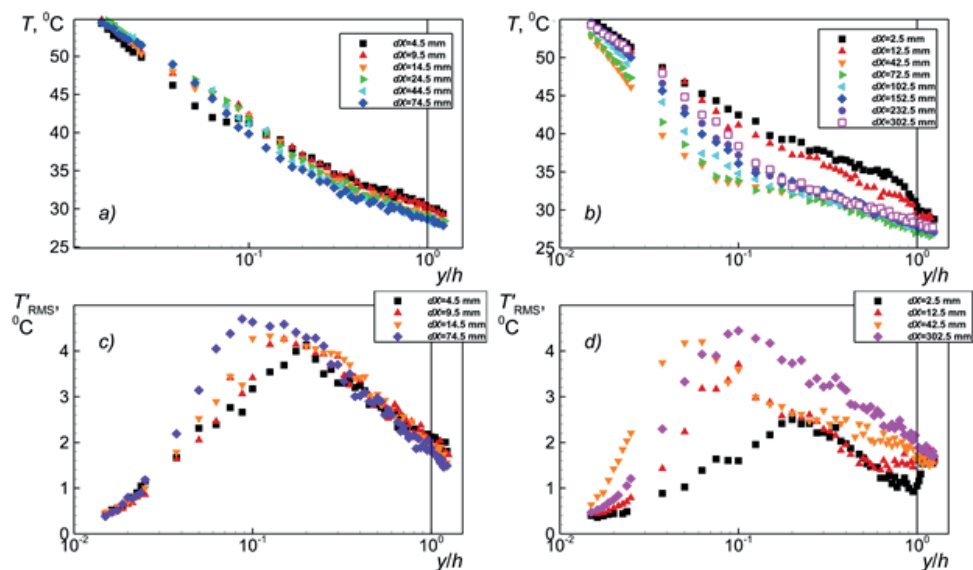


Рис. 4. Результаты измерения температурных полей: средняя температура воздуха перед (a) и за (b) цилиндром; пульсации температуры перед (c) и за (d) цилиндром;  $dX$  – расстояния от соответствующей измерительной нити до ближайшей кромки цилиндра; вертикальными линиями отмечено положение торца цилиндра

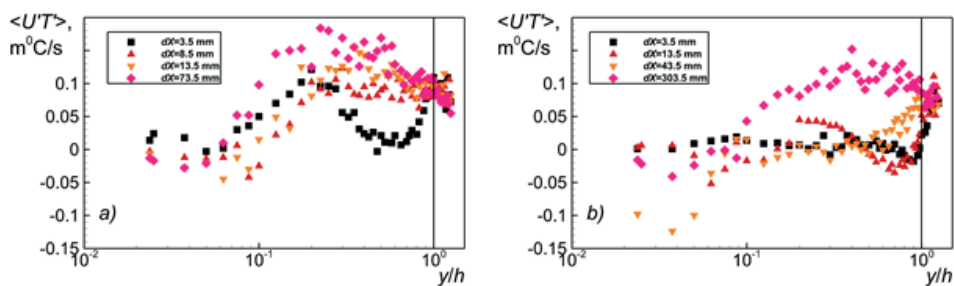


Рис. 5. Распределения корреляции  $\langle UT' \rangle$  перед (a) и за (b) цилиндром по результатам измерений;  $dX$  – расстояния от соответствующей измерительной нити до ближайшей кромки цилиндра; вертикальными линиями отмечено положение торца цилиндра

В области рециркуляции, близко к задней кромке препятствия, поток хорошо перемешан и прогрет теплом от горячей поверхности пластины. Ниже по потоку, за точкой обратного присоединения пограничного слоя, оторвавшегося перед препятствием недалеко от пластины (например, на расстоянии по нормали порядка 10% от высоты цилиндра), наблюдаются значения температуры, которые существенно (на 10°) меньше таковых, характерных для невозмущенного пограничного слоя на этом расстоянии от пластины. Дальше по потоку происходит постепенное восстановление профиля температуры, соответствующее случаю невозмущенного препятствием пограничного слоя.

Профили среднеквадратичных значений пульсаций температуры, показанные на рис. 4, *c* и *d*, а также профили нормированной корреляции пульсаций скорости и температуры, приведенные на рис. 5, дают возможность сопоставить положение максимумов пульсацией перед и за цилиндром, а также оценить общий уровень значений данных величин.

#### Сопоставление экспериментальных результатов с данными численного моделирования

Представляет интерес сопоставить полученные опытные данные с опубликованными недавно результатами численного моделирования течения при аналогичных условиях [26]. В этой работе приведены результаты численного исследования структуры трехмерного течения и теплообмена в окрестности кругового цилиндра, возмущающего развитый турбулентный свободноконвективный пограничный слой. Расчеты выполнены с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS) по SST-модели турбулентности Ментера. Геометрическая конфигурация и условия, принятые в расчетах для одного из вариантов (размеры цилиндра, тепловые условия на его поверхности, параметры набегающего на него пограничного слоя), близки к условиям описанных выше экспериментов. По сути дела, расчеты, представленные в статье [26], выступили в роли вспомогательных по отношению к постановке приведенных здесь экспериментов и позволили предсказать ряд особенностей реального течения, развивающегося в окрестности выбранного нами цилиндра. На рис. 6 дается сопоставление результатов

измерений средних величин с данными, которые получены численным моделированием. Здесь скорость  $U$  нормирована на ее максимальное значение  $U_{\max}$  на расстоянии 72.5 мм перед цилиндром, а безразмерная температура  $\theta$  определена по традиционной для подобных задач формуле

$$\theta = \frac{T - T_a}{T_w - T_a},$$

где  $T_w$ ,  $T_a$  – значения температуры нагретой поверхности и внешнего пространства, соответственно.

Следует также заметить, что результаты расчетного определения составляющих вектора средней скорости были пересчитаны для получения «эффективных» значений  $U$ , получаемых при измерениях посредством датчика с одной «скоростной» нитью, который не чувствителен к направлению вектора скорости, а реагирует лишь на актуальное значение модуля скорости, поперечной к нити. Пересчет основан на простых соотношениях, использующих расчетную информацию о локальном направлении вектора осредненной скорости в точке измерения. Анализ информации, представленной на рис. 6, позволяет заключить, что наблюдается весьма удовлетворительное, а по отдельным сопоставляемым профилям и очень хорошее согласие между опытными и расчетными данными, которые в целом указывают на кардинальную перестройку течения как в области перед цилиндром, где формируются подковообразные вихревые структуры, так и в области за цилиндром, включающей ближнюю отрывную зону и зону восстановления свободноконвективного пристенного течения. Отметим, что в отношении последней имеется, однако, заметное различие между результатами экспериментов и RANS-расчетов. Как можно видеть на рис. 6, *b*, в расчетной модели явно замедлен процесс восстановления свободноконвективного слоя.

#### Заключение

Для области взаимодействия развитого турбулентного свободноконвективного пограничного слоя с погруженным в него круговым низкотеплопроводным цилиндром получены новые экспериментальные данные, количественно характеризующие поля осредненной по времени скорости воздушного течения, осредненной температуры воздуха, интенсивности пульсаций

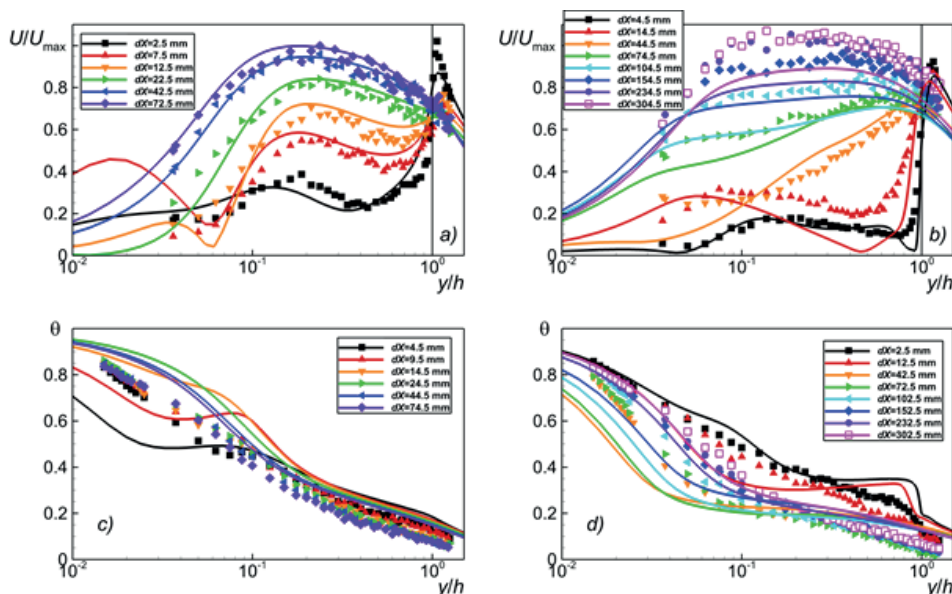


Рис. 6. Сопоставление экспериментальных данных (символы) с результатами численного моделирования RANS (сплошные линии): представлены средняя нормированная скорость течения перед (a) и за (b) цилиндром, а также средняя безразмерная температура воздуха перед (c) и за (d) цилиндром;

$dX$  – расстояния от соответствующей измерительной нити до ближайшей кромки цилиндра

скорости и температуры, а также корреляции пульсаций скорости и температуры.

Семейство измеренных профилей осредненной скорости и температуры использовано для сравнения результатов, полученных экспериментально и путем численного моделирования на основе RANS-приближения. Достигнуто весьма удовлетворительное, а по отдельным сопоставляемым профилям и очень хорошее согласие между опытными и расчетными данными, которые в целом указывают на кардинальную перестройку течения как в области перед цилиндром, где формируются подковообразные вихревые структуры, так и в области за препятствием, включающей ближнюю отрывную зону и зону восстановления свободноконвективного пристенного течения. Вместе с тем, результаты RANS-расчетов демонстрируют несколько замедленное

восстановление свободноконвективного пограничного слоя в дальнем следе за цилиндром, по сравнению с экспериментальными данными.

В настоящее время измерения выполнены только для средней вертикальной плоскости, проходящей через ось цилиндра; планируется продолжить работу по исследованию трехмерной структуры течения посредством измерений и для других сечений рабочего участка.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №18-19-00082). Результаты RANS-расчетов получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого ([www.scc.spbstu.ru](http://www.scc.spbstu.ru)).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Warner C.Y., Arpaci V.S. An experimental investigation of turbulent natural convection in air at low pressure along a vertical heated flat plate // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1968. Vol. 11. No. 3. Pp. 397–406.
2. Cheesewright R. Turbulent natural convection from a vertical plane surface // Journal of Heat Transfer. 1968. Vol. 90. No. 1. Pp. 1–8.
3. Pirovano A., Viannay S., Jannot M.

4. Smith R.R. Characteristics of turbulence in free convection flow past a vertical plate. Ph.D. Thesis, University of London, 1972.
5. Tsuji T., Nagano Y. Characteristics of a



turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1988. Vol. 31. No. 8. Pp. 1723–1734.

6. **Chumakov Yu.S., Kuzmitsky V.A.** Surface shear stress and heat flux measurements at a vertical heated plate under free convection heat transfer // *Russian Journal of Engineering Thermophysics*. 1998. Vol. 8. No. 1–4. Pp. 1–15.

7. **Чумаков Ю.С.** Распределение температуры и скорости в свободноконвективном пограничном слое на вертикальной изотермической поверхности // *Теплофизика высоких температур*. 1999. Т. 37. № 5. С. 744–749.

8. **Cheesewright R., Doan K.S.** Space-time correlation measurements in a turbulent natural convection boundary layer // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1978. Vol. 21. No. 7. Pp. 911–921.

9. **Miyamoto M., Kajino H., Kurima J., Takanami I.** Development of turbulence characteristics in a vertical free convection boundary layer // *Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference*. Munich, FRG. Vol. 2. 1982. Pp. 323–328.

10. **Cheesewright R., Ierokipiotis E.** Velocity measurements in a turbulent natural convection boundary layer // *Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference*. Munich, FRG. Vol. 2. 1982. Pp. 305–309.

11. **Tsuji T., Nagano Y.** Turbulence measurements in a natural convection boundary layer along a vertical flat plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1988. Vol. 31. No. 10. Pp. 2101–2111.

12. **Никольская С.Б., Чумаков Ю.С.** Экспериментальное исследование пульсационного движения в свободноконвективном пограничном слое // *Теплофизика высоких температур*. 2000. Т. 38. № 2. С. 249–256.

13. **Kuzmitskiy O.A., Nikolskaya S.B., Chumakov Yu.S.** Spectral and correlation characteristics of velocity and temperature fluctuations in a free-convection boundary layer // *Heat Transfer Research*. 2002. Vol. 33. No. 3–4. Pp. 144–147.

14. **Bhavnani S.H., Bergles A.E.** Effect of surface geometry and orientation on laminar natural convection heat transfer from a vertical flat plate with transverse roughness elements // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1990. Vol. 13. No. 5. Pp. 965–981.

15. **Burak V.S., Volkov S.V., Martynenko O.G., Khrantsov P.P., Shikh I.A.** Experimental study of free-convection flow on a vertical plate with constant heat flux in the presence of one or more steps // *International Journal of Heat and Mass*

*Transfer*. 1995. Vol. 38. No. 1. Pp. 147–154.

16. **Aydin M.** Dependence of the natural convection over a vertical flat plate in the presence of the ribs // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 1997. Vol. 24. No. 4. Pp. 521–531.

17. **Polidori G., Padet J.** Transient free convection flow on a vertical surface with an array of large scale roughness elements // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2003. Vol. 27. No. 3. Pp. 251–260.

18. **Misumi T., Kitamura K.** Enhancement techniques for natural convection heat transfer from vertical finned plate // *Heat transfer – Japanese Research*. 1994. Vol. 23. No. 16. Pp. 513–524.

19. **Fujii M.** Enhancement of natural convection heat transfer from a vertical heated plate using inclined fins // *Heat Transfer – Asian Research*. 2007. Vol. 36. No. 6. Pp. 334–344.

20. **Naserian M., Fahiminia M., Goshayeshi H.R.** Experimental and numerical analysis of natural convection heat transfer coefficient of V-type fin configurations // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2013. Vol. 27. No. 7. Pp. 2191–2197.

21. **Misumi T., Kitamura K.** Enhancement of natural convective heat transfer from tall vertical heated plates // *JSME B. (in Japanese)*. 1999. Vol. 65. No. 640. Pp. 4041–4048.

22. **Komori K., Inagaki T., Kito S., Mizoguchi N.** Natural convection heat transfer along a vertical flat plate with a projection in the turbulent region // *Heat Transfer – Asian Research*. 2001. Vol. 30. No. 3. Pp. 222–233.

23. **Tsuji T., Kajitani T., Nishino T.** Heat transfer enhancement in a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2007. Vol. 28. No. 6. Pp. 1472–1483.

24. **Levchenya A.M., Smirnov E.M., Zhukovskaya V.D., Ivanov N.G.** Numerical study of 3D turbulent flow and local heat transfer near a cylinder introduced into the free-convection boundary layer on a vertical plate // *Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference (IHTC-16)*, August 10–15, 2018. Beijing, China. Paper IHTC16-22916. DOI: 10.1615/IHTC16.hte.022916 (2018) 5493–5500.

25. **Levchenya A.M., Smirnov E.M., Zhukovskaya V.D.** Numerical study of 3D flow structure near a cylinder piercing turbulent free-convection boundary layer on a vertical plate // *AIP Conf. Proc.* 2018. Vol. 1959. P. 050017.

26. **Smirnov E.M., Levchenya A.M., Zhukovskaya V.D.** RANS-based numerical



simulation of the turbulent free convection vertical-plate boundary layer disturbed by a normal-to-plate circular cylinder // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 144. December. P. 118573.

27. Кузьмицкий В.А., Чумаков Ю.С. Установка для статической калибровки термоанемометра при малых скоростях в неизотермической воздушной среде // Теплофизика высоких температур. 1995. Т. 33. № 1. С. 116–120.

*Статья поступила в редакцию 17.01.2020, принята к публикации 31.01.2020.*

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЧУМАКОВ Юрий Сергеевич** – доктор физико-математических наук, профессор Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
chymakov@yahoo.com

**ЛЕВЧЕНЯ Александр Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
levchenya\_am@spbstu.ru

**ХРАПУНОВ Евгений Федорович** – аспирант Высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
hrapunov.evgenii@yandex.ru

### REFERENCES

1. Warner C.Y., Arpaci V.S., An experimental investigation of turbulent natural convection in air at low pressure along a vertical heated flat plate, International Journal of Heat and Mass Transfer. 11 (3) (1968) 397–406.

2. Cheesewright R., Turbulent natural convection from a vertical plane surface, Journal of Heat Transfer. 90 (1) (1968) 1–8.

3. Pirovano A., Viannay S., Jannot M., Convection naturelle en régime turbulent le long d'une plaque plane verticale, Proceedings of the 9th International Heat Transfer Conference, Elsevier, Paris, Amsterdam. 4 (1.8) (1970) 1–12.

4. Smith R.R., Characteristics of turbulence in free convection flow past a vertical plate, Ph.D. Thesis, University of London, 1972.

5. Tsuji T., Nagano Y., Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate, International Journal of Heat and Mass Transfer. 31 (8) (1988) 1723–1734.

6. Chumakov Yu.S., Kuzmitsky V.A., Surface shear stress and heat flux measurements at a vertical heated plate under free convection heat transfer, Russian Journal of Engineering

Thermophysics. 8 (1–4) (1998) 1–15.

7. Chumakov Yu.S., Temperature and velocity distributions in a free-convection boundary layer on a vertical isothermal surface, High Temperature. 37 (5) (1999) 714–719.

8. Cheesewright R., Doan K.S., Space-time correlation measurements in a turbulent natural convection boundary layer, International Journal of Heat and Mass Transfer. 21(91) (1978) 911–921.

9. Miyamoto M., Kajino H., Kurima J., Takanami I., Development of turbulence characteristics in a vertical free convection boundary layer, Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Munich, FRG. 2 (1982) 323–328.

10. Cheesewright R., Ierokipiotis E., Velocity measurements in a turbulent natural convection boundary layer, Proceedings of the 7th International Heat Transfer Conference, Munich, FRG. 2 (1982) 305–309.

11. Tsuji T., Nagano Y., Turbulence measurements in a natural convection boundary layer along a vertical flat plate, International Journal of Heat and Mass Transfer. 31 (10) (1988)

2101–2111.

12. **Nikolskaya S.B., Chumakov Yu.S.**, Experimental investigation of pulsation motion in a free-convection boundary layer, *High Temperature*. 38 (2) (2000) 231–237.

13. **O.A. Kuzmitskiy, Nikolskaya S.B., Chumakov Yu.S.**, Spectral and correlation characteristics of velocity and temperature fluctuations in a free-convection boundary layer, *Heat Transfer Research*. 33 (3–4) (2002) 144–147.

14. **Bhavnani S.H., Bergles A.E.**, Effect of surface geometry and orientation on laminar natural convection heat transfer from a vertical flat plate with transverse roughness elements, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 13 (5) (1990) 965–981.

15. **Burak V.S., Volkov S.V., Martynenko O.G., et al.**, Experimental study of free-convection flow on a vertical plate with constant heat flux in the presence of one or more steps, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 38 (1) (1995) 147–154.

16. **Aydin M.**, Dependence of the natural convection over a vertical flat plate in the presence of the ribs, *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 24 (4) (1997) 521–531.

17. **Polidori G., Padet J.**, Transient free convection flow on a vertical surface with an array of large scale roughness elements, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 27 (3) (2003) 251–260.

18. **Misumi T., Kitamura K.**, Enhancement techniques for natural convection heat transfer from vertical finned plate, *Heat transfer – Japanese Research*. 23 (16) (1994) 513–524.

19. **Fujii M.**, Enhancement of natural convection heat transfer from a vertical heated plate using inclined fins, *Heat Transfer – Asian Research*. 36 (6) (2007) 334–344.

20. **Naserian M., Fahiminia M., Goshayeshi H.R.**, Experimental and numerical analysis of natural convection heat transfer coefficient of

V-type fin configurations, *Journal of Mechanical Science and Technology*. 27 (7) (2013) 2191–2197.

21. **Misumi T., Kitamura K.**, Enhancement of natural convective heat transfer from tall vertical heated plates, *JSME B (in Japanese)*, 65 (640) (1999) 4041–4048.

22. **Komori K., Inagaki T., Kito S., Mizoguchi N.**, Natural convection heat transfer along a vertical flat plate with a projection in the turbulent region, *Heat Transfer – Asian Research*. 30 (3) (2001) 222–233.

23. **Tsuji T., Kajitani T., Nishino T.**, Heat transfer enhancement in a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate, *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 28 (6) (2007) 1472–1483.

24. **Levchenya A.M., Smirnov E.M., Zhukovskaya V.D., Ivanov N.G.**, Numerical study of 3D turbulent flow and local heat transfer near a cylinder introduced into the free-convection boundary layer on a vertical plate, *Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16, August 10–15, 2018, Beijing, China, Paper IHTC16-22916. DOI: 10.1615/IHTC16.hte.022916, (2018) 5493–5500.*

25. **Levchenya A.M., Smirnov E.M., Zhukovskaya V.D.**, Numerical study of 3D flow structure near a cylinder piercing turbulent free-convection boundary layer on a vertical plate, *AIP Conference Proceedings*. 1959 (2018) 050017.

26. **Smirnov E.M., Levchenya A.M., Zhukovskaya V.D.**, RANS-based numerical simulation of the turbulent free convection vertical-plate boundary layer disturbed by a normal-to-plate circular cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 144 (December) (2019) 118573.

27. **Kuzmitskii V.A., Chumakov Yu.S.**, Facility for static calibration of a hot-wire anemometer at low velocities in a nonisothermal air medium, *High Temperature*. 33 (1) (1995) 109–113.

*Received 17.01.2020, accepted 31.01.2020.*

## THE AUTHORS

### **CHUMAKOV Yuriy S.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
chymakov@yahoo.com

### **LEVCHENYA Alexander M.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
levchenya\_am@spbstu.ru



Приборы и техника физического эксперимента

**KHRAPUNOV Evgeniy F.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation

hrapunov.evgenii@yandex.ru