



DOI: 10.18721/JPM.111108

УДК 532.526

## ФОРМИРОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СТРУКТУРЫ В ОКРЕСТНОСТИ СТЫКА КРУГОВОГО ЦИЛИНДРА С ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Ю.С. Чумаков, А.М. Левченя, Х. Малах

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

Приводятся результаты численного расчета и анализ процесса взаимодействия свободно-конвективного пограничного слоя, который развивается на вертикальной нагретой поверхности, с трехмерным препятствием (круговой цилиндр), примыкающим к этой поверхности. Ось цилиндра направлена по нормали к поверхности. Численная модель базируется на уравнениях Навье – Стокса и баланса энергии. Исходная система трехмерных уравнений решается в приближении Буссинеска. Показано, что наличие препятствия на поверхности способствует образованию сложной вихревой структуры не только за цилиндром, но и перед ним. В частности, перед цилиндром, вверх по потоку, образуется подковообразный вихрь. Подобное вихреобразование наблюдается в вынужденно-конвективных течениях и в последнее время привлекает внимание многих исследователей. В настоящей работе представлены предварительные итоги исследования структуры сложного трехмерного вихревого течения в условиях свободной конвекции и влияния этого течения на теплообмен.

**Ключевые слова:** численное моделирование; свободно-конвективный теплообмен; вихревая структура; подковообразный вихрь; коэффициент теплообмена

**Ссылка при цитировании:** Чумаков Ю.С., Левченя А.М., Малах Х. Формирование вихревой структуры в окрестности стыка кругового цилиндра с вертикальной нагретой поверхностью // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 1. С. 73 – 85. DOI: 10.18721/JPM.111108

## THE VORTEX STRUCTURE FORMATION AROUND A CIRCULAR CYLINDER PLACED ON A VERTICAL HEATED PLATE

Yu.S. Chumakov, A.M. Levchenya, H. Malah

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

The interaction process analysis and results of numerical simulation of a free-convection boundary layer developing around a circular cylinder placed on a vertical heated plate are presented. The cylinder axis is directed normally to the plate. The numerical model is based on the Navier–Stokes and the energy balance equations. The assumed system of equations is solved using the Boussinesq approximation. It is shown that the presence of a three-dimensional obstacle (cylinder) on the plate results in the formation of a complex vortex structure both upstream and downstream of the cylinder. In particular, a horseshoe vortex formed upstream of it is similar to vortex formation that has been observed in forced convection heat transfer by many researchers. In this paper, the tentative results of the study of the complex three-dimensional vortical structure in conditions of free convection and its influence on the heat transfer are presented.

**Key words:** numerical modeling; natural convection heat transfer; vortex structure; horseshoe vortex system; heat transfer coefficient

**Citation:** Yu.S. Chumakov, A.M. Levchenya, H. Malah, The vortex structure formation around a circular cylinder placed on a vertical heated plate, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (1) (2018) 73 – 85. DOI: 10.18721/JPM.11108

### Введение

За последние 10 – 20 лет заметно возрос интерес к течениям, возникающим при взаимодействии пограничного слоя с различными препятствиями на поверхности, вдоль которой развиваются эти течения. Натекание потока на препятствие инициирует встречный градиент давления, приводящий к отрыву пограничного слоя. Для таких течений характерно образование довольно сложной вихревой структуры и, в первую очередь, образование так называемого подковообразного вихря (ПВ) [1].

К подобным течениям можно отнести вынужденно-конвективные, возникающие в области сочленения крыла с фюзеляжем самолета, торцевых областях турбинных решеток, в различных теплообменниках сложной геометрии. Область повышенного давления в подобных течениях растянута вдоль всей высоты препятствия, на которое набегаёт внешний поток, поэтому отрыв пограничного слоя и возникающий ПВ весьма интенсивны. Обзор многочисленных экспериментальных исследований, проведенных до начала XXI века и посвященных исследованию форм ПВ в вынужденно-конвективных течениях, представлен в работе [2], а исследования последних пятнадцати лет упомянуты в недавно выполненной экспериментальной работе [3].

Очевидно, что развивающиеся вихревые структуры оказывают заметное влияние на различные обменные процессы в потоке, а при наличии перепада температур между потоком и обтекаемой поверхностью могут способствовать появлению значительных неоднородностей локальной теплоотдачи. В технике существует целый класс теплообменных аппаратов, в которых теплообмен осуществляется в условиях свободно-конвективного течения. Одна из моделей подобных теплообменников может быть представлена в виде, например, вертикальной нагретой поверхности, вдоль которой формируется свободно-конвективный пограничный слой. На ней могут быть уста-

новлены различные устройства, температура которых равна или отличается от температуры поверхности. В узкой области соударения свободно-конвективного пограничного слоя и препятствия возникает зона повышенного давления, что приводит к отрыву пограничного слоя. Таким образом, по аналогии с вынужденно-конвективным течением, можно предположить, что и в этом случае в окрестности передней части препятствия на поверхности может образовываться сложная вихревая структура, содержащая подковообразный вихрь. Особенности развития течения в этом случае будут определяться не только интенсивностью отрыва, но и действием сил плавучести на отесняемый от пластины нагретый поток.

На современном этапе развития вычислительной гидроаэродинамики большое внимание уделяется применению методик численного моделирования для расчета существенно трехмерных течений с подковообразными вихревыми структурами в вынужденно-конвективных пограничных слоях (см., например, работы [4, 5]). Успех расчета теплообмена в устройствах с натеканием свободно-конвективного пограничного слоя на препятствие будет в значительной мере зависеть от точности воспроизведения сложной динамической структуры вихревых образований как непосредственно в области сочленения выступающих объектов с поверхностью, так и в следе за ними. При этом надо иметь в виду, что само течение возникает за счет локально действующей массовой силы, а не предписывается набегающим потоком. К сожалению, в известной авторам литературе ни экспериментальных, ни расчетных работ, посвященных изучению подковообразных вихрей в свободно-конвективных течениях, не обнаружено. Имеется работа [6], посвященная анализу нестационарной свободной конвекции вблизи вертикальной поверхности при его локальном возмущении за счет размещения на стенке небольшого кубического препятствия. Авторы показа-

ли, что наличие цилиндра, погруженного в свободно-конвективный пограничный слой, интенсифицирует теплоотдачу.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования трехмерного свободно-конвективного течения, которое возникает около вертикальной нагретой поверхности и примыкающего к ней кругового цилиндра; ось последнего направлена по нормали к поверхности.

### Постановка задачи

В приближении Буссинеска рассматривается ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости в окрестности кругового цилиндра, установленного на прямоугольной вертикальной плоскости, далее называемой пластиной. Пластина нагрета относительно среды, заполняющей внешнее пространство. Под действием возникающей в гравитационном поле силы плавучести воздух вблизи пластины поднимается, формируя вдоль нее свободно-конвективный пограничный слой. Поверхности пластины и цилиндра в представляемых расчетах служат границами расчетной области; сопряженный теплообмен не моделируется. В процессе вариантных расчетов изменяются два параметра задачи: температура цилиндра и его высота.

Цели работы – проанализировать влияние уровня нагрева цилиндра на структуру трехмерного свободно-конвективного течения в окрестности стыка цилиндра и пластины, а также сравнить особенности течения и теплообмена, когда цилиндр полностью погружен в пограничный слой и когда высота цилиндра превышает толщину пограничного слоя.

На рис. 1 представлена схема расчетной области и система координат, также приведены граничные условия (описываются далее). Начало системы координат расположено на расстоянии 0,8 м от нижней кромки пластины и совпадает с центром основания цилиндра, ось  $X$  соответствует горизонтальному направлению, ось  $Y$  – вертикальному (в направлении потока), а ось  $Z$  перпендикулярна пластине.

Диаметр цилиндра  $D = 0,02$  м. Расчетная область имеет форму параллелепипеда

высотой  $120D$ , шириной  $25D$  и толщиной  $10D$ . Все расчеты выполнены с искусственной симметризацией течения в плоскости, параллельной линии действия силы тяжести, разделяющей цилиндр пополам вдоль его оси. Расстояние от оси цилиндра до нижней границы расчетной области равно  $50D$ , а до верхней –  $70D$  (см. рис. 1). Высота цилиндра, «вырезанного» из расчетной области, варьируется в расчетах (конкретные значения указаны в табл. 1).

Граничные условия показаны на рис. 1 и формулируются следующим образом. Поверхности пластины и цилиндра – твердые стенки (серый фон) с условием прилипания. Температура пластины для всех вариантов равна  $60\text{ }^\circ\text{C}$ , температура поверхности цилиндра задается согласно табл. 1. На нижней и верхней границах области также ставится условие прилипания с температурой, равной температуре внешней среды  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . На плоскости, разделяющей цилиндр пополам вдоль его оси, и параллельной ей внешней границе, заданы условия симметрии. На участках длиной  $10D$  перед пластиной и после нее (по вертикальному направлению) также ставится условие симметрии, которое реализует непроницаемость и проскальзывание на этих участках. Плоскость, параллельная пластине, проницаема: поток может как втекать через нее, эжектируемый пограничным слоем (в этом случае температура затекающего воздуха равна  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ), так и выходить наружу, будучи вытеснен обтекаемым препятствием.

Для численного моделирования используются расчетные сетки, согласованные с границами расчетной области. Сетки имеют высокую степень детализации вблизи твердых поверхностей и во всей окрестности препятствия для повышения качества разрешения подковообразных вихревых структур. Сетка сгущена к твердым стенкам с коэффициентом сгущения 1,05. В плоскости пластины построены блочно-структурированные сетки из четырехугольников с прямоугольными ячейками вдали от препятствия. Блок сетки в окрестности цилиндра представляет собой  $C$ -сетку в форме «гайки», охватывающей цилиндр (рис. 2). Дополнительные блоки сетки

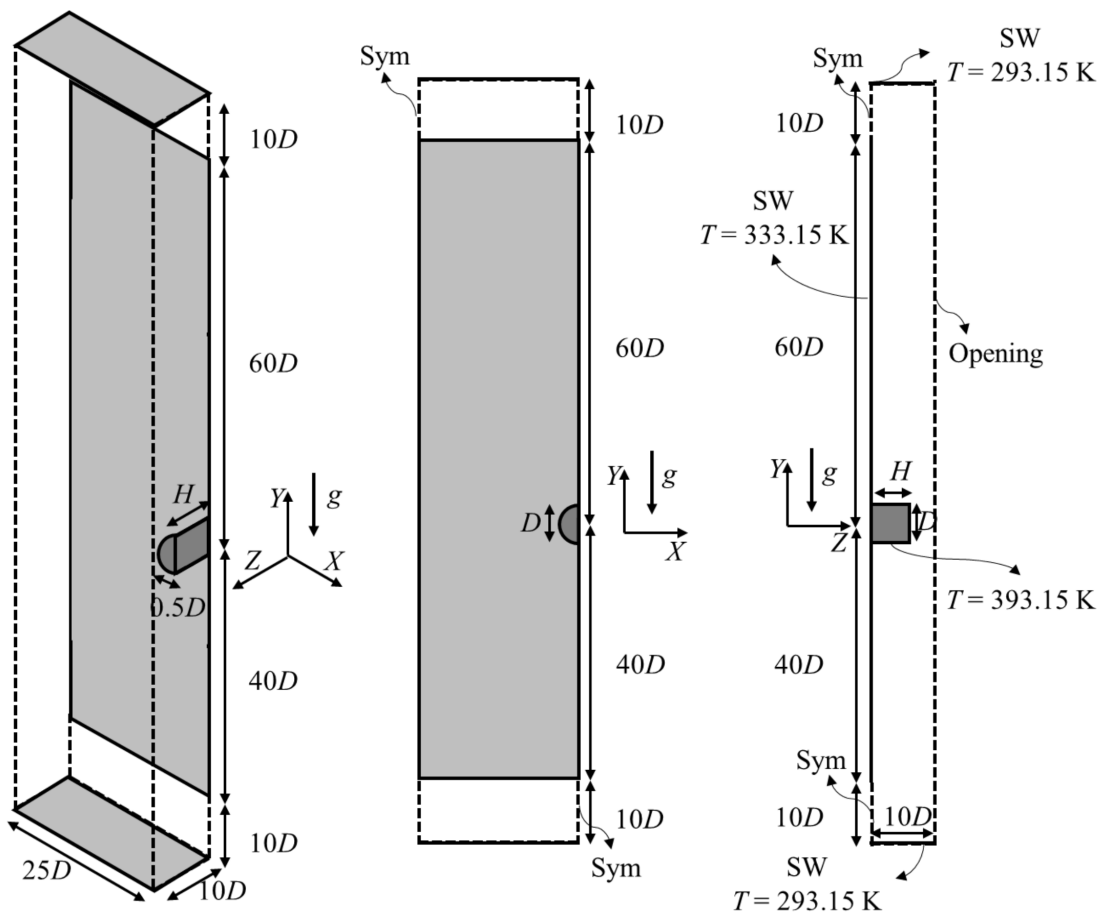


Рис. 1. Геометрия расчетной области при численном моделировании:  
 $H$ ,  $D$  – высота и диаметр цилиндра,  $g$  – ускорение свободного падения,  $T$  – температура, Sym – симметрия, SW – твердые стенки (показаны серым фоном), Opening – проницаемая граница

между детальной сеткой в окрестности цилиндра и менее детализированной внешней областью служат для выравнивания формы и размера ячеек. Такая конфигурация подобластей выбрана для того, чтобы обеспечить эффективное измельчение сетки в

интересующей нас области без образования сильно скошенных или вытянутых ячеек, что могло бы произойти при использовании единой структуры сетки для всей расчетной области. Результирующая сетка в плоскости пластины состоит примерно из

Таблица 1

Рассматриваемые конфигурации и режимы обогрева

Вариант расчета	Безразмерная высота цилиндра ( $H/D$ )	Температура поверхности цилиндра, °C
В-1-60	1	60
В-1-120	1	120
В-5-60	5	60
В-5-120	5	120

50 тыс. ячеек. В плоскости  $YZ$  сгущение сетки в окрестности цилиндра выполнялось таким образом, чтобы размер ячейки в области образования подковообразного вихря был в 50 раз меньше диаметра цилиндра  $D$ . В направлении нормали к пластине сетка состоит из 73 ячеек со сгущением к пластине и торцу цилиндра. Трехмерные сетки получены трансляцией исходной сетки по направлению нормали к пластине. Размер пристенной ячейки составлял  $0,014D$ , и 31 ячейка попадает внутрь невозмущенного цилиндром пограничного слоя. Размер ячеек во внутреннем блоке внутри области образования ПВ составляет  $(0,014 - 0,040)D$ . Размеры ячеек по всей расчетной области не превышают  $0,3D$  по любому из направлений. Размерность результирующей трехмерной сетки – около 3,6 млн. ячеек.

В работе для проведения расчетов применялся коммерческий пакет ANSYS FLUENT 16.2 [7]. Решение уравнений Навье – Стокса и энергии разыскивалось с использованием совмещенного (coupled) алгоритма. Дискретизация определяющих уравнений производилась со вторым порядком точности для всех пространственных производных.

Трудности, возникающие при моделировании свободно-конвективных течений,

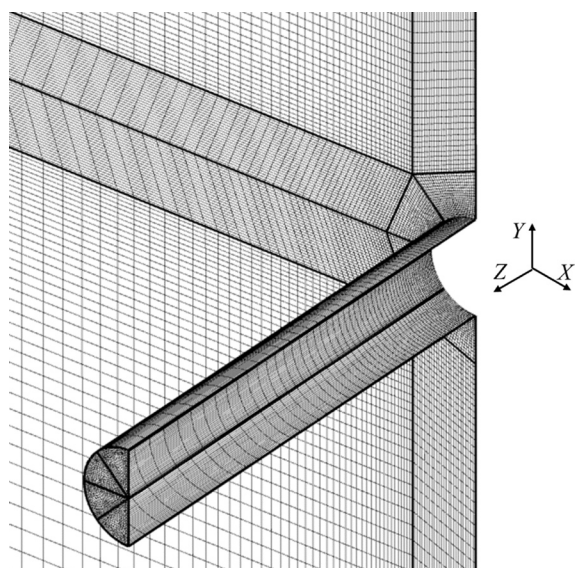


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки вблизи цилиндра

обусловлены прежде всего относительно небольшими скоростями движения и необходимостью совместного решения уравнений движения и энергии, поэтому численная модель менее стабильна, чем при расчете вынужденной конвекции. При расчетах малая инерция потока и тесная связь уравнений движения и энергии приводят к необходимости выполнять большее количество итераций для получения сошедшегося решения. В представленных расчетах число итераций составляло от 1350 до 1600, а балансы сводились с точностью до  $10^{-6}$ .

### Результаты и их анализ

В результате расчетов получены стационарные решения для четырех вариантов, перечисленных в табл. 1. Особый интерес представляют результаты в окрестности закрепленного на пластине цилиндра. Наличие этого цилиндра полностью разрушает набегающий поток и превращает двумерный свободно-конвективный пограничный слой в трехмерное течение, что, в конечном итоге, оказывает существенное влияние на теплообмен.

В случае вынужденной конвекции структура течения в целом предписана параметрами набегающего потока, а теплообмен в рамках модели несжимаемой жидкости не оказывает влияния на поле течения. В то же время в условиях свободной конвекции течение возникает под действием силы плавучести, интенсивность которой зависит от локального перепада температуры. Для оценки степени воздействия цилиндра на разрушение набегающего двумерного свободно-конвективного пограничного слоя и образования в результате обширной области трехмерного вихревого течения, анализ результатов целесообразно начать с определения границ температурной неоднородности в окрестности цилиндра. С этой целью для каждого варианта расчета в различных продольных сечениях  $YZ$  ( $X = \text{const}$ , выбирается) определена 2%-я толщина области с температурными неоднородностями, которую в дальнейшем будем называть пристенной областью. Под этой толщиной, далее обозначаемой  $\delta$ , подразумевается координата на плоскости

Таблица 2

Результаты оценки ширины области возмущения

Вариант расчета	Ширина области возмущения ( $X/D$ )
В-1-60	2,25
В-1-120	2,25
В-5-60	2,50
В-5-120	2,40

$YZ$ , в которой локальная температура отличается от температуры на внешней границе расчетной области на 2 %.

Путем сравнения полученных результатов с соответствующей толщиной невозмущенного пограничного слоя, была определена протяженность области влияния цилиндра на двумерный пограничный слой. В частности, в табл. 2 приведены размеры области влияния цилиндра на уровне горизонтальной линии  $Y = 0$ , вдоль оси  $X$  от поверхности цилиндра.

Из табл. 2 следует, что увеличение температуры поверхности короткого цилиндра не влияет на ширину области возмущения поля температуры (варианты В-1-60 и В-1-120), но приводит к уменьшению этой области в случае длинного цилиндра (В-5-60, В-5-120). Можно также заметить, что увеличение высоты цилиндра приводит к расширению области возмущения независимо от нагрева цилиндра.

На рис. 3 сопоставлены 2%-е толщины невозмущенного двумерного пограничного слоя с их величиной при наличии возмущения (цилиндра) вдоль пластины на линии симметрии ( $X = 0$ ). Отметим, что максимальная расчетная толщина температурного пограничного слоя, который развивается на вертикальной нагретой пластине без препятствия, составляет примерно 0,022 – 0,025 м.

При анализе графиков, представленных на рис. 3, можно отметить следующее:

эффект препятствия распространяется довольно далеко вверх по потоку, уже на

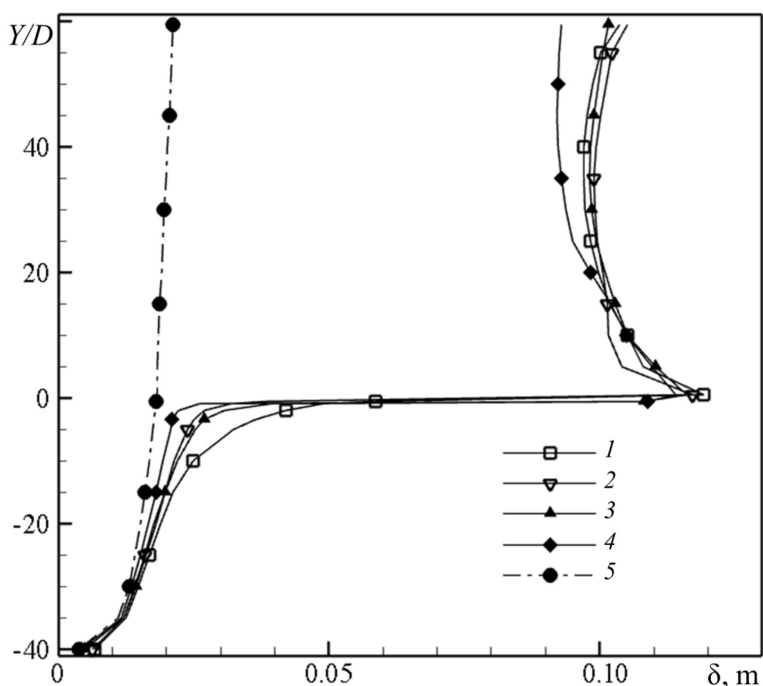


Рис. 3. Расчетные зависимости 2%-й толщины пристенной области  $\delta$  от координаты  $Y/D$ , полученные для разных вариантов: В-1-60 (1), В-1-120 (2), В-5-60 (3), В-5-120 (4) (см. табл. 1); представлена также зависимость для случая отсутствия цилиндра (5)

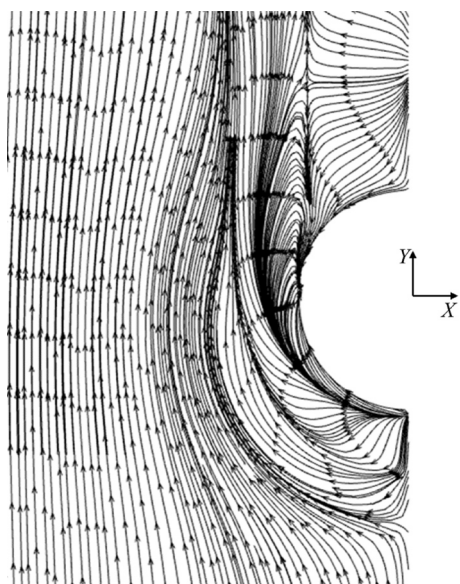


Рис. 4. Донные линии тока на пластине для варианта В-1-60 (см. табл. 1)

расстоянии  $Y/D = -35$  заметно влияние цилиндра на толщину пристенного слоя, причем это влияние больше в случае короткого цилиндра;

увеличение температуры цилиндра слегка уменьшает степень влияния на течение вверх по потоку;

в области за цилиндром значения толщины пристенного слоя практически одинаковы для всех вариантов, за исключением варианта В-5-120, для которого наблюдается некоторое уменьшение толщины. Причина подобного поведения, возможно, связана с тем, что длинный нагретый цилиндр, выступая за пределы пристенного слоя, инициирует собственный свободноконвективный поток, тем самым оказывая влияние на течение вблизи поверхности.

Проанализируем подробнее поле течения в области стыковки цилиндра и поверхности. Донные линии тока на по-

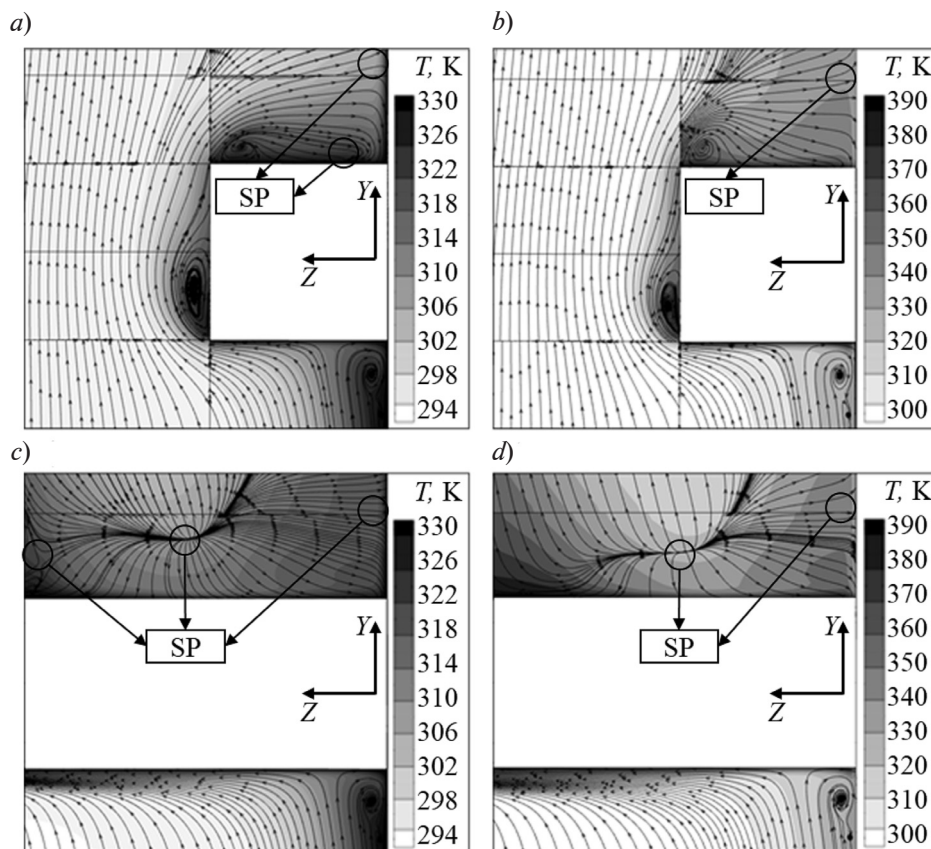


Рис. 5. Линии тока и температурные поля (в виде градаций серого) в плоскости симметрии  $YZ$  для вариантов расчета В-1-60 (а), В-1-120 (б), В-5-60 (с), В-5-120 (д) (см. табл. 1); SP – особые точки

верхности пластины вблизи цилиндра для варианта В-1-60 показаны на рис. 4. Подобная картина, являясь «отпечатком» образовавшихся вихревых структур, позволяет идентифицировать линию разделения (отрыва пограничного слоя) выше по потоку от цилиндра, внутри которой расположены подковообразные вихри, опоясывающие препятствие. Вблизи цилиндра видны отпечатки зарождающегося перед ним углового вихря и развитие всей структуры в следе за препятствием.

Фрагменты картин линий тока на фоне температурных полей (в виде градаций серого) показаны на рис. 5 в плоскости симметрии  $YZ$  ( $X = 0$ ). Сравнение разных режимов позволяет проанализировать влияние высоты цилиндра и его перегрева относительно среды на размеры ПВ. На каждом рисунке в угловой области сочленения цилиндра и пластины различимы вихри: основной (более интенсивный) и вторичный (слабый) ПВ; вторичный расположен выше по потоку от основного, образовавшегося в результате отрыва подходящего вдоль пластины свободно-конвективного пограничного слоя. Размеры ПВ близки для всех вариантов расчета. Для случаев обтекания короткого цилиндра (рис. 5, *a, b*) виден вихрь, образующийся на торце цилиндра. Его ось сдвигается вверх по потоку (к цилиндру) при увеличении температуры его поверхности. В следе за препятствием образуется сложная вихревая структура: для короткого цилиндра это концентрированный вихрь (рециркуляционный пузырь). Закрученные течения внутри вихрей перемешивают и рассеивают прогретый воздух, изменяя теплоотдачу на поверхности пластины и закрепленного на ней цилиндра.

В области после цилиндра для всех четырех рассмотренных случаев имеется несколько особых точек (SP – singular points, см. рис. 5), наличие которых позволяет провести аналогию с торнадо [8]. Указанные сингулярности «затягивают» частицы жидкости вверх, вдоль пластины; они сдвигаются вниз при увеличении температуры поверхности цилиндра и его высоты. На рис. 6 показаны вихри в виде торнадо для варианта В-5-120. При увеличении высоты

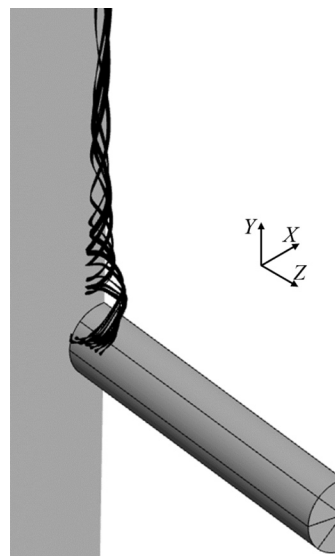


Рис. 6. Линии тока в кормовой части цилиндра (вариант В-5-120)

цилиндра и уменьшении температуры его поверхности основание воронки вихря отодвигается от плоскости симметрии цилиндра вдоль оси  $x$ .

Основной и вторичный подковообразные вихри сливаются друг с другом и образуют единую структуру, которая медленно движется по направлению к цилиндру, и, в конце концов, способствует образованию системы ПВ [9] (рис. 7).

На рис. 7 для визуализации трехмерных вихревых структур используется  $Q$ -критерий [10], который определяют следующим образом:

$$Q = \frac{1}{2}(\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij}), \quad (2)$$

где  $\Omega_{ij}$ ,  $S_{ij}$  – антисимметричная и симметричная части второго инварианта тензора градиента скорости, соответственно.

Согласно работе [10], вихревые структуры могут определяться в областях, где  $Q > 0$ , когда локальная скорость вращения превышает скорость деформации. Если сравнивать распределения  $Q$ -критерия вблизи поверхности цилиндра и в области сочленения цилиндра с пластиной для каждого варианта расчетов (рис. 7), то можно получить информацию о топологии и уровне интенсивности вихревых структур.



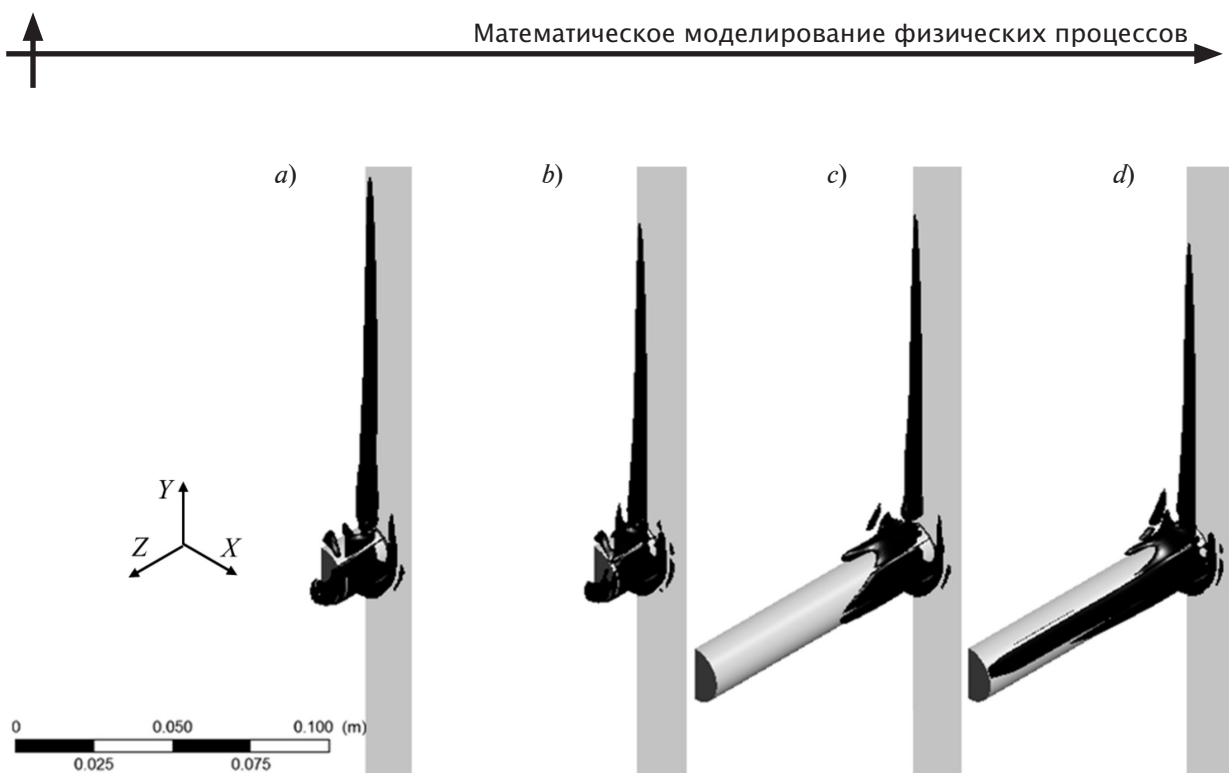


Рис. 7. Визуализация вихревой структуры потока вокруг цилиндра с использованием изоповерхностей  $Q$ -критерия для вариантов В-1-60 (а), В-1-120 (б), В-5-60 (с), В-5-120 (д)

Заметим, что системы ПВ, которые сформировались в расчетах при совпадающей высоте цилиндра, одинаковы по форме, но имеют разный размер ветви основного ПВ и различную интенсивность, а для четвертого варианта наблюдается увеличение  $Q$ -критерия по всей высоте цилиндра. Независимо от высоты цилиндра, при увеличении его температуры изоповерхность  $Q$ -критерия вытягивается вдоль всей высоты цилиндра, охватывая полностью его боковую поверхность, что соответствует интенсификации вихревых структур. Ветви основного ПВ за цилиндром уменьшаются с увеличением температуры поверхности цилиндра и его высоты.

Краткий анализ течения в окрестности стыка цилиндра с пластиной и в следе за цилиндром свидетельствует о формировании весьма сложной вихревой структуры, благодаря которой осуществляется интенсивное перемешивание холодного и горячего воздуха, что, безусловно, оказывает существенное влияние на теплообмен в этой области. Для анализа влияния на теплоотдачу трехмерного вихревого течения удобно воспользоваться коэффициентом теплопередачи  $\alpha$ , который определяют сле-

дующим образом:

$$\alpha = q / \Delta T,$$

где  $q$  – тепловой поток от стенки,  $\Delta T$  – перепад температур между стенкой и внешней средой.

Распределения коэффициента теплопередачи вдоль ломаной линии пересечения плоскости симметрии и твердых стенок показаны для всех вариантов расчетов на рис. 8. Последний состоит из трех отдельных пространственно связанных графиков, на каждом из которых приведены одно или два семейства кривых.

На нижнем графике показаны два семейства кривых. Первое из них – распределение величины  $\alpha (Y/D)$  вдоль участка пластины под цилиндром (выше по потоку от него); координатной служит вертикальная ось графика, а значения  $\alpha$  отложены по горизонтали. Для разных вариантов расчета эти распределения совпадают друг с другом, величина  $\alpha$  монотонно снижается по мере развития пограничного слоя на пластине, вплоть до области непосредственно перед цилиндром ( $Y/D > -1$ ), где образуется подковообразный вихрь, при этом монотонность нарушается.

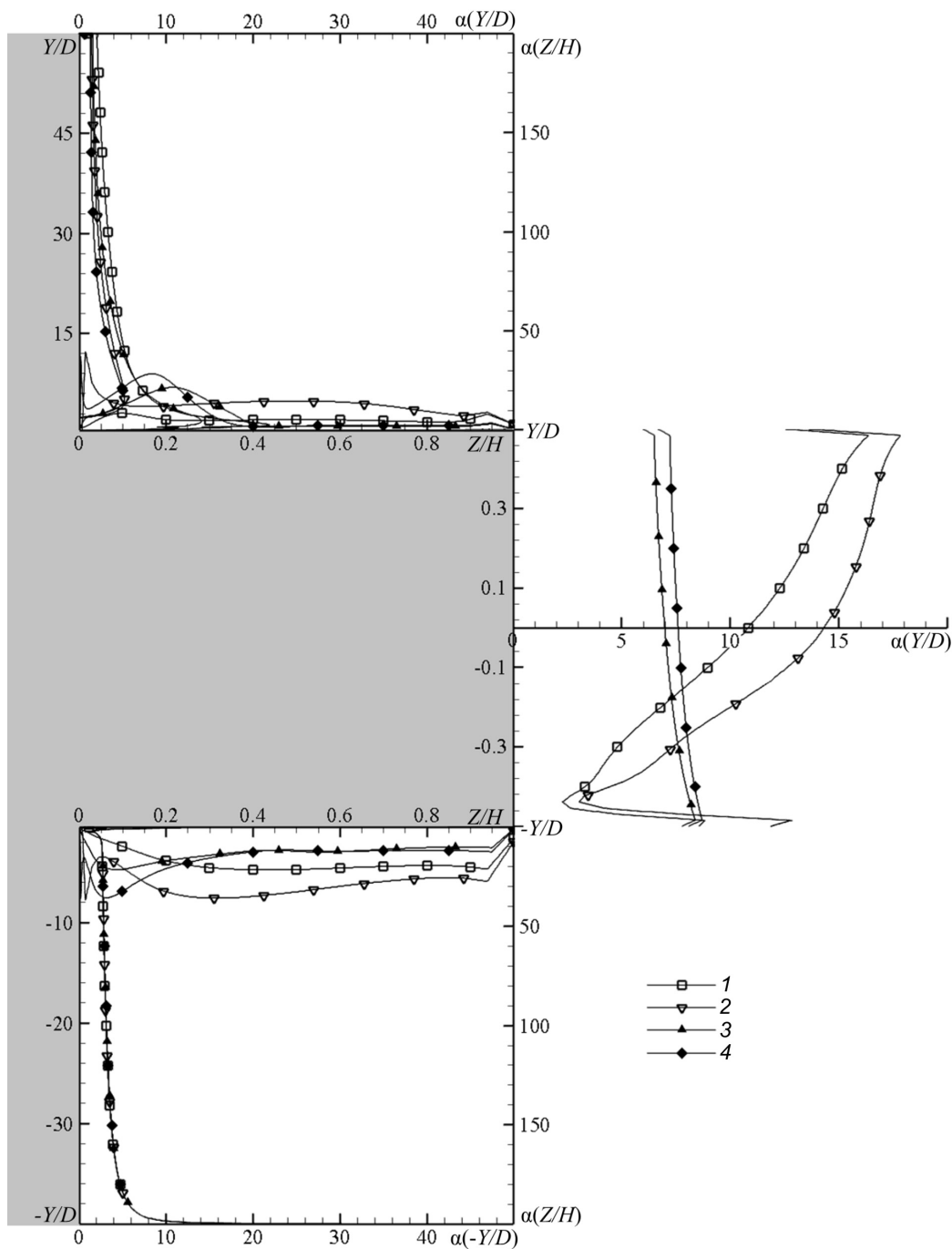


Рис. 8. Распределения коэффициента теплопередачи  $\alpha$  вдоль линии пересечения плоскости симметрии ( $YZ$ ) и твердых поверхностей для вариантов расчета В-1-60 (1), В-1-120 (2), В-5-60 (3), В-5-120 (4) (см. табл. 1)

Следует отметить, что полученные в расчетах распределения коэффициента теплопередачи в области выше по течению от цилиндра, вдали от него (т. е. в области невозмущенного свободно-конвективного

пограничного слоя), согласуются с литературными данными. Критериальная зависимость локального числа Нуссельта от локального числа Грасгофа имеет вид степенной функции с показателем, близким к



общепринятому значению  $1/4$  для ламинарного режима течения вблизи вертикальной нагретой пластины [11].

Второе семейство кривых на нижнем графике соответствует распределению коэффициента теплопередачи по высоте цилиндра, вдоль его передней кромки: оси координат меняются местами в соответствии с ориентацией в пространстве. На боковой поверхности цилиндра коэффициент теплопередачи почти не меняется вдоль него, при этом средний уровень коэффициента  $\alpha$  для короткого цилиндра слегка растет с увеличением температуры поверхности.

Следует отметить, что для цилиндров разной высоты повышение температуры поверхности приводит к ярко выраженному немонотонному изменению коэффициента  $\alpha$  в окрестности стыка цилиндра и пластины. Данное обстоятельство, безусловно, есть следствие интенсивного развития вихревой структуры в этой области. Заметим, что подобное поведение коэффициента теплопередачи характерно и для распределения  $\alpha$  по линии вдоль задней кромки цилиндра (см. верхний график, зависимости  $\alpha$  ( $Z/H$ )).

На среднем графике показаны распределения величины  $\alpha$  по диаметру верхнего торца цилиндра. Можно отметить общую тенденцию к росту коэффициента теплопередачи с увеличением температуры поверхности цилиндра. Однако, если для длинного цилиндра коэффициент  $\alpha$  практически постоянен, то для короткого, полностью погруженного в пограничный слой, коэффициент теплопередачи увеличивается в несколько раз в направлении вниз по потоку. В области после цилиндра, вдоль поверхности пластины (верхний график, зависимость  $\alpha$  ( $Y/D$ )), распределения коэффициента теплопередачи для разных вариантов имеют сходный вид, демонстрируя медленное, почти монотонное снижение

теплоотдачи по мере удаления от цилиндра. Уровень значений величины  $\alpha$  снижается при увеличении как температуры поверхности цилиндра, так и его высоты.

### Заключение

По результатам численного моделирования взаимодействия свободно-конвективного пограничного слоя с трехмерным препятствием (цилиндром) можно сделать следующие выводы:

предположение об образовании сложной вихревой структуры в составе с подковообразным вихрем в передней зоне цилиндра, расположенного на плоской вертикальной пластине, подтвердилось и в случае свободно-конвективного течения;

высота цилиндра оказывает существенное влияние на формирование вихревой зоны, если она соизмерима с толщиной пограничного слоя;

перегрев цилиндра по отношению к температуре пластины слабо влияет на течение вверх по потоку, но оказывает заметное воздействие на течение в следе за цилиндром;

влияние перегрева цилиндра возрастет, по-видимому, еще сильнее в случае преобладания высоты цилиндра над толщиной пограничного слоя, так как в этом случае цилиндр будет самостоятельным источником свободно-конвективного потока, который при определенных условиях может оказывать заметное влияние на течение в следе;

и, наконец (возможно, это самый важный практический вывод), теплообмен поверхности (в совокупности с цилиндром) с окружающим воздухом в значительной степени определяется вихревой структурой течения около этой поверхности, а, следовательно, успех расчета теплообмена во многом зависит от качества предсказания динамической структуры течения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anderson C.D., Lynch S.P. Time resolved stereo-PIV measurements of the horseshoe vortex system in a low aspect ratio pin-fin array // AIAA Propulsion and Energy Forum. Orlando, FL, USA, 2015. P. 3733.

2. Ballio F., Bettoni C., Franzetti S. A survey of time-averaged characteristics of laminar and turbulent horseshoe vortices // ASME Journal of Fluids Engineering. 1998. Vol. 120. No. 2. Pp. 233–242.

3. **Apsilidis N., Diplas P., Dancy C.L., Bouratsis P.** Time-resolved flow dynamics and Reynolds number effects at a wall-cylinder junction // *Journal of Fluid Mechanics*. 2015. Vol. 776. Pp. 475–511.

4. **Visbal M.R.** Structure of laminar juncture flows // *AIAA Journal*. 1991. Vol. 29. No. 8. Pp. 1273–1282.

5. **Левченя А.М.** Численное моделирование трехмерного потока, обтекающего круговой цилиндр в области его сочленения с гладкой стенкой // *Всероссийский семинар по аэрогидродинамике, посвященный 90-летию со дня рождения С.В. Валландера: избранные труды всероссийского семинара*. СПб.: Изд. СПбГУ, 2008. С. 64–69.

6. **Polidori G., Padet J.** Flow visualization and free convection heat transfer at the junction of short cylinders mounted on a heated wall // *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. 2003. Vol. 10. Pp. 13–26.

7. ANSYS Academic Research Mechanical,

Release 16.2, Help System, Fluent User Guide, ANSYS, Inc. 2015.

8. **Kirkil G., Constantinescu G.** Effects of cylinder Reynolds number on the turbulent horseshoe vortex system and near wake of a surface-mounted circular cylinder // *Physics of Fluids*. 2015. Vol. 27. No. 7. P. 075102.

9. **Tala J.V.S., Russeil S., Bougeard D., Harion J.L.** Investigation of the flow characteristics in a multirow finned-tube heat exchanger model by means of PIV measurements // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013. Vol. 50. Pp. 45–53.

10. **Hunt J.C.R., Wray A.A., Moin P.** Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows // *Center for Turbulence Research Report (CTR-S88)*. 1988. Pp. 193–208.

11. **Кузьмицкий В.А., Чумаков Ю.С.** Анализ характеристик течения при ламинарно-турбулентном переходе в свободноконвективном пограничном слое // *Теплофизика высоких температур*. 1999. Т. 37. № 2. С. 239–246.

*Статья поступила в редакцию 06.11.2017, принята к публикации 05.12.2017.*

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЧУМАКОВ Юрий Сергеевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры гидроаэродинамики, горения и теплообмена Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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

**ЛЕВЧЕНЯ Александр Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры гидроаэродинамики, горения и теплообмена Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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

**МАЛАХ Хамид** – аспирант кафедры гидроаэродинамики, горения и теплообмена Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
hamid.malah@gmail.com

#### REFERENCES

[1] **C.D. Anderson, S.P. Lynch**, Time resolved stereo-PIV measurements of the horseshoe vortex system in a low aspect ratio pin-fin array, *AIAA Propulsion and Energy Forum*. Orlando, FL, USA (2015) 3733.

[2] **F. Ballio, C. Bettoni, S. Franzetti**, A survey of time-averaged characteristics of laminar and turbulent horseshoe vortices, *ASME Journal of Fluids Engineering*. 120 (2) (1998) 233–242.

[3] **N. Apsilidis, P. Diplas, C.L. Dancy, P. Bouratsis**, Time-resolved flow dynamics and

Reynolds number effects at a wall-cylinder junction, *Journal of Fluid Mechanics*. 776 (2015) 475–511.

[4] **M.R. Visbal**, Structure of laminar juncture flows, *AIAA Journal*. 29 (8) (1991) 1273–1282.

[5] **A.M. Levchenya**, Chislennoye modelirovaniye trekhmernogo potoka, obtekeyushchego krugovoy tsilindr v oblasti yego sochleneniya s gladkoy stenкой [Numerical simulation of a 3D flow around a circular cylinder in its overlapping area with a smooth wall], In: *Vserossiyskiy seminar po aerogidrodinamike, posvyashchenny 90-letiyu so*



dnya rozhdeniya S.V. Vallandera: izbrannyye trudy vserossiyskogo seminar [The All-Russian seminar on aerodynamics on the occasion of 90<sup>th</sup> anniversary of S.V. Vallander: Selecta from The All-Russian seminar] , St. Petersburg, SPbSU (2008) 64–69.

[6] **G. Polidori, J. Padet**, Flow visualization and free convection heat transfer at the junction of short cylinders mounted on a heated wall, *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. 10 (2003) 13–26.

[7] ANSYS Academic Research Mechanical, Release 16.2, Help System, Fluent Theory Guide, ANSYS, Inc. 2015.

[8] **G. Kirkil, G. Constantinescu**, Effects of cylinder Reynolds number on the turbulent horseshoe vortex system and near wake of a surface-

mounted circular cylinder, *Physics of Fluids*. 27 (7) (2015) 075102.

[9] **J.V.S. Tala, S. Russeil, D. Bougeard, J.L. Harion**, Investigation of the flow characteristics in a multirow finned-tube heat exchanger model by means of PIV measurements, *Experimental Thermal and Fluid Science*. 50 (2013) 45–53.

[10] **J.C.R. Hunt, A.A. Wray, P. Moin**, Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows, Center for Turbulence Research Report (CTR-S88). (1988) 193–208.

[11] **V.A. Kuzmitskii, Yu.S. Chumakov**, Analysis of characteristics of flow under conditions of laminar-to-turbulent transition in a free-convection boundary layer, *High Temperature*. 37(2) (1999) 247–253.

*Received 06.11.2017, accepted 05.12.2017.*

#### THE AUTHORS

##### **CHUMAKOV Yuri S.**

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

##### **LEVCHENYA Alexander M.**

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

##### **MALAH Hamid**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation  
hamid.malah@gmail.com