

Ю.Л. Леухин<sup>1</sup>, Э.Н. Сабуров<sup>1</sup>, В. Гарен<sup>2</sup>, И.А. Усачев<sup>1</sup>

Архангельский государственный технический университет, Россия (1)

Университет прикладных наук, Эмден, Германия (2)

## ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА, СМЕЩЕННОГО С ОСИ ЦИКЛОННОГО ПОТОКА

### АННОТАЦИЯ

Анализируются физические особенности гидродинамического взаимодействия циклонного потока с цилиндром, ось которого смещена с его аэродинамической оси.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Обтекание круглых цилиндров, смещенных с аэродинамической оси закрученного потока, является сложным гидродинамическим процессом, зависящим от совокупного влияния их диаметра, длины, величины смещения, геометрических характеристик генерирующего закрученный поток циклонного устройства и числа Рейнольдса [1]. Задача представляет не только теоретический, но и практический интерес с точки зрения дальнейшего изучения аэродинамики и конвективного теплообмена в вертикальных циклонных нагревательных устройствах для группового нагрева заготовок.

### 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования выполнены на экспериментальном стенде [2], созданном авторами в лаборатории прикладной лазерной техники (Institut für Angewandte Lasertechnik) университета прикладных наук г. Эмден (Германия). Стенд включает циклонную камеру, измерительный комплекс лазерной установки LDA и комплект оборудования для исследования конвективного теплообмена.

Циклонная камера была выполнена из оргстекла, имела внутренний диаметр  $D_k = 2R_k = 179$  мм и длину  $L_k = 272$  мм. Подвод воздуха в камеру осуществлялся тангенциально внутренней поверхности с двух диаметрально противоположных сторон через каналы с высотой 13 мм и длиной, размер по образующей, равной 40 мм. Безразмерная суммарная площадь входа потока  $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх}/\pi D_k^2$  равнялась  $4,13 \cdot 10^{-2}$ . Отвод воздуха из циклонной камеры производился через осесимметричное с рабочим объемом отверстие в верхнем торце. Относительный диаметр выходного отверстия  $\bar{d}_{вых} = d_{вых}/D_k$  составлял 0,4.

Распределения осредненных и пульсационных значений тангенциальной и осевой составляющих вектора скорости исследовались LDA в среднем поперечном сечении циклонной камеры при  $\bar{z} = 0,670$  ( $\bar{z} = z/D_k$  – безразмерная координата, совпадающая с осью камеры и отсчитываемая от ее глухого торца) по методике подробно описанной в

работе [2].

Цилиндр имел длину 231,5 мм и диаметр  $d = 61,5$  мм, что соответствовало параметру  $\bar{d} = d/D_k = 0,344$ . Торцы цилиндров отстояли от торцов камеры на расстоянии 23 мм, что исключало непосредственное воздействие на их боковую поверхность радиальных приторцевых перетечек. Величина относительного смещения  $\bar{e} = e/R_k$  цилиндра равнялась 0,190 (17 мм).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Смещенный с аэродинамической оси закрученный поток цилиндра и боковая поверхность рабочего объема циклонной камеры образуют по направлению движения потока как бы замкнутый криволинейный канал типа конфузур – диффузур – конфузур и т.д. На рис.1 приведены распределения безразмерной тангенциальной скорости ( $\bar{w}_\varphi = w_\varphi/V_{вх}$ ,  $V_{вх}$  – средняя скорость потока во входных шлицах циклонной камеры), линий тока, а также изотах тангенциальной и осевой ( $\bar{w}_z = w_z/V_{вх}$ ) скоростей при обтекании цилиндра. На рис.1 обозначены:  $\varphi$  – угол с вершиной на оси камеры, отсчитываемый в направлении движения потока от радиуса, по которому осуществлено смещение цилиндра;  $\varphi_d$  – угол, отсчитываемый в поперечном сечении камеры от линии смещения цилиндра, с вершиной на его оси. По мере перемещения потока в конфузурной части течения и приближения его к наиболее стесненному проходному сечению  $\varphi = 0^\circ$  происходит увеличение уровня тангенциальных скоростей их перестройка ее профиля. Максимум  $\bar{w}_\varphi$  приближается к поверхности цилиндра и увеличивается по величине. Поток перемещается здесь под влиянием отрицательного градиента давления, способствующего его разгону. В диффузурной части поперечного сечения ( $\varphi > 0^\circ$ ), положительный градиент давления препятствует продвижению потока у поверхности цилиндра и приводит к его отрыву в точке 2. С противоположной стороны цилиндра наблюдается вихрь. О размерах вихря можно судить по положению нулевой линии тока, которая замыкается между точками 1 и 2.

Граница разделения прямого и обратного течений в вихре (изотаха нулевого значения тангенциальной скорости) на рис. 1, в показана штриховой линией и берет начало в точке 1. Попятный вихревой поток срывается с поверхности цилиндра в точке 3. Между точками 3 и 4 расположена область срав-

нительно небольшого обратного течения по направлению, совпадающего с циклонным. В результате вероятно возникновение небольшой вихревой циркуляционной зоны. У поверхности цилиндра от точки 4 поток перемещается в направлении точки 2. На поверхности цилиндра существуют две критические точки: передняя 1 (лобовая), расположенная в месте разделения набегающего на цилиндр потока при  $\varphi_d \approx 250^\circ$ , и задняя (кормовая) 2 при  $\varphi_d \approx 45^\circ$  – точка стока.

Распределения изотак осевой скорости (рис. 1, г) показывают, что в вихре наблюдается интенсивный сток газа в направлении выходного отверстия. Осевые скорости в этой области соизмеримы с тангенциальными. Характер изменения изотак  $w_z$  в остальной части поперечного сечения также является сложным и не осесимметричным. Смещение цилиндра с аэродинамической оси циклонного потока приводит к появлению значительных вторичных (осевых) течений.

Предположение о слабой зависимости распределений скорости циклонного потока от продольной

координаты и практически плоском характере его течения при обтекании смещенного с оси цилиндра, как ранее считалось [1], является приближенным. Этот вывод подтверждают также и результаты математического моделирования, выполненные авторами с использованием программного комплекса CFX-5.7. На рис. 2 представлены результаты численного моделирования обтекания того же цилиндра и расположенного в циклонной камере также, как в вышерассмотренных опытах и при той же входной скорости потока  $V_{вх}$ . В опытах число Рейнольдса  $Re_{вх} = V_{вх} D_k / \nu_{вх}$  равнялось  $18,7 \cdot 10^4 \dots 25,8 \cdot 10^4$ . В расчетах использована модель турбулентности Shear Stress Transport  $k-\omega$ . Картина обтекания цилиндра, полученная в результате численного моделирования, представленная в виде распределений векторов и изотак полной скорости, расположение характерных точек 1 – 4 (рис. 2), хорошо согласуется с опытными данными (рис. 1). На рис. 2, б, г приведены распределения осевой скорости в виде контуров ее изотак в поперечном сечении циклонной камеры. На рис. 2, б хорошо видны вихри, су-

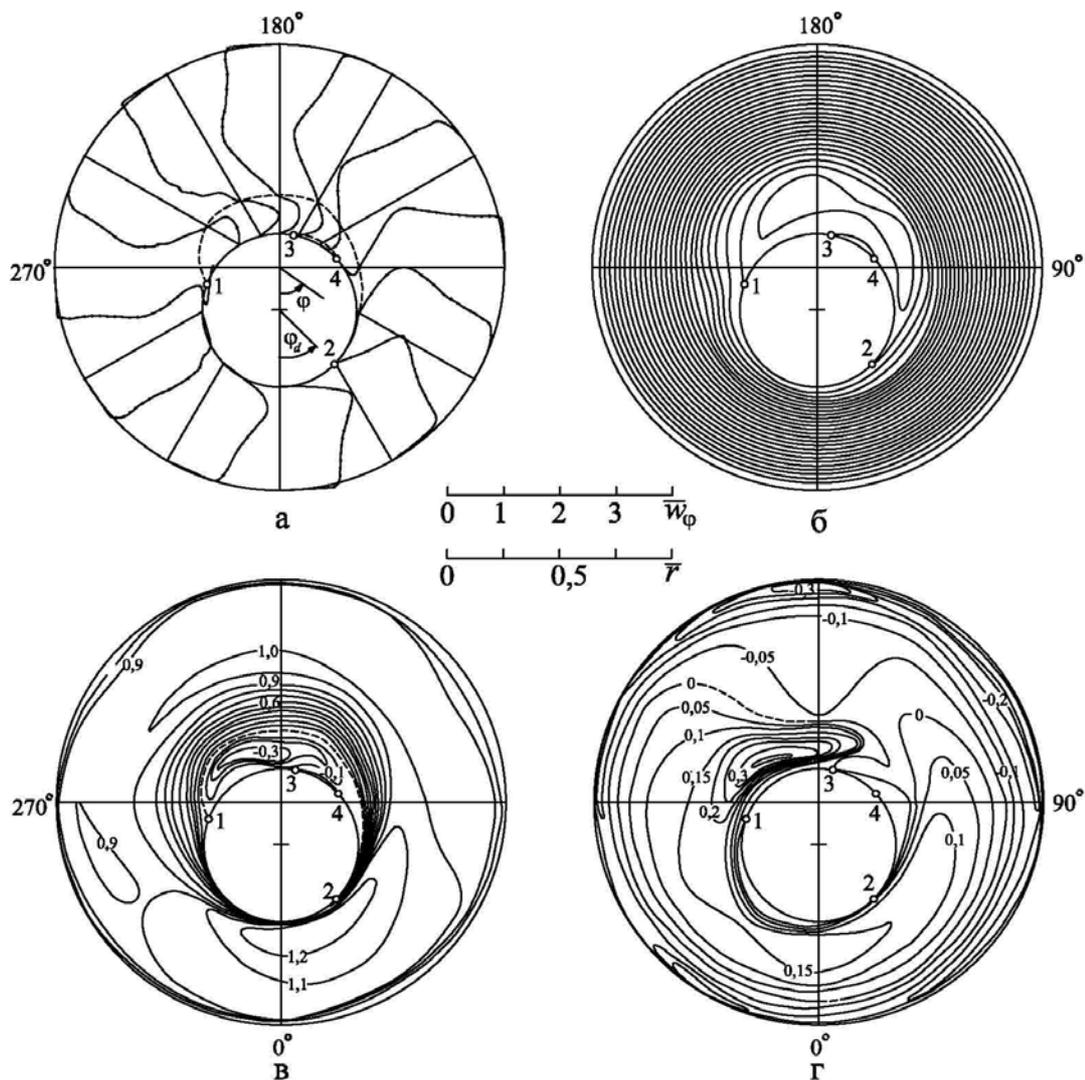


Рис. 1. Распределения тангенциальной скорости, линий тока, изотах тангенциальной и осевой скоростей

ществующие в ее рабочем объеме.

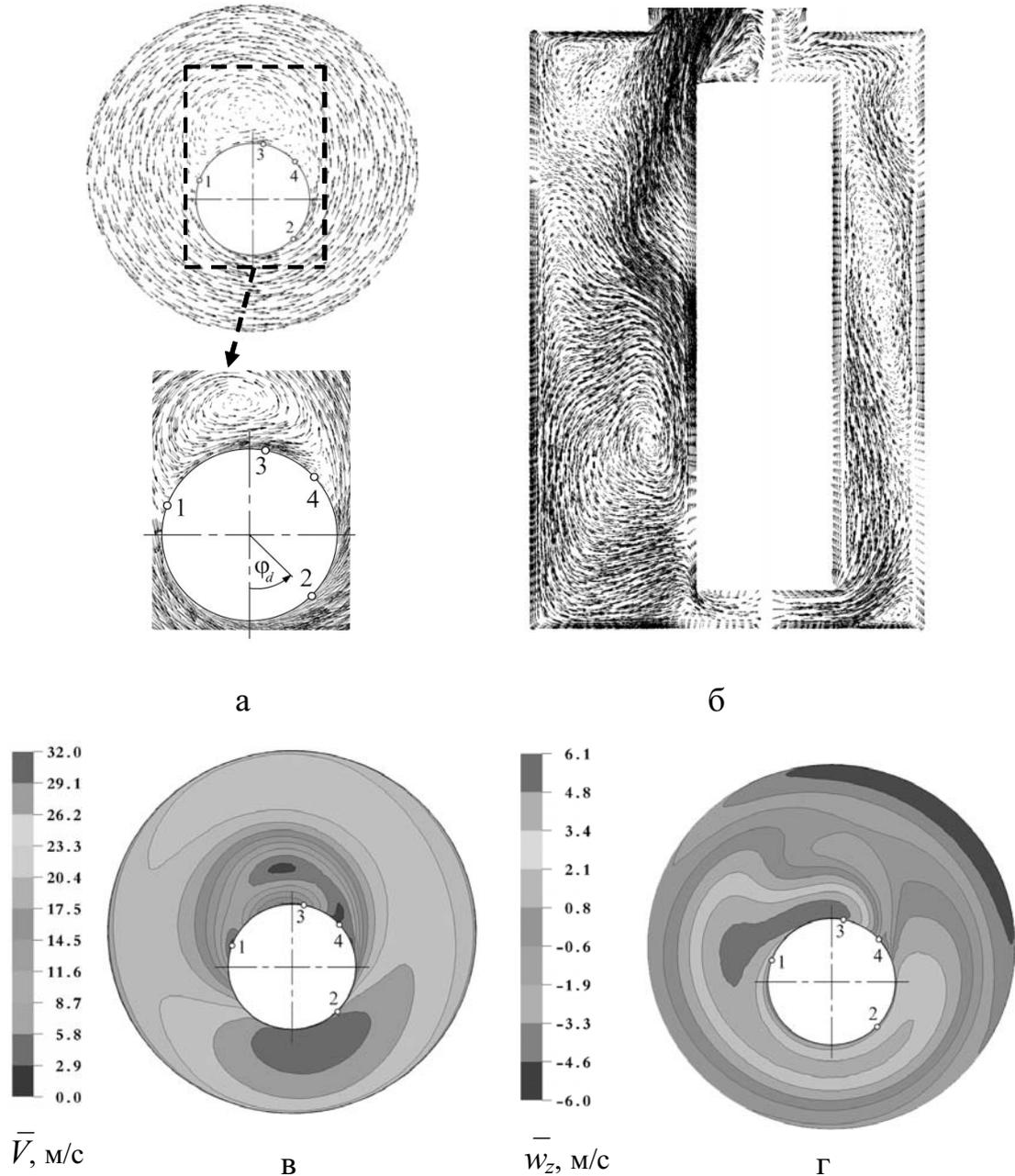


Рис. 2. Распределения тангенциальной (а) и осевой (б) скоростей, изотях полной (в) и осевой (г) скоростей

Сравнение распределений тангенциальной и осевой скоростей в поперечном сечении циклонной камеры полученных численным и экспериментальным методами показывает их вполне удовлетворительное совпадение.

Большое значение с точки зрения изучения и анализа закономерностей гидродинамики и теплообмена имеет исследование микроструктуры закрученного потока в циклонных нагревательных устройствах при сложных и нестандартных условиях течения теплоносителя.

Установлено [1], что при расположении цилиндра в центре циклонной камеры наблюдается осевая симметрия распределений не только осредненных параметров потока, но и интенсивности пульсаций

тангенциальной  $\varepsilon_\varphi = \sqrt{w_\varphi'^2} / V$  и осевой  $\varepsilon_z = \sqrt{w_z'^2} / V$  ( $V$  – осредненное значение полной скорости в данной точке) составляющих скорости. Радиус, соответствующий минимальным значениям интенсивности пульсаций скорости, практически совпадает с  $r_{\varphi m}$  – радиусом, характеризующим местоположение максимума тангенциальной составляющей (практически и полной) скорости потока. Распределения  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$  по радиусу определяются совокупным влиянием на турбулентность потока массовых сил и пограничных слоев, которые образуются на стенке циклонной камеры и поверхности цилиндра. При смещении цилиндра, вероятно, из-за

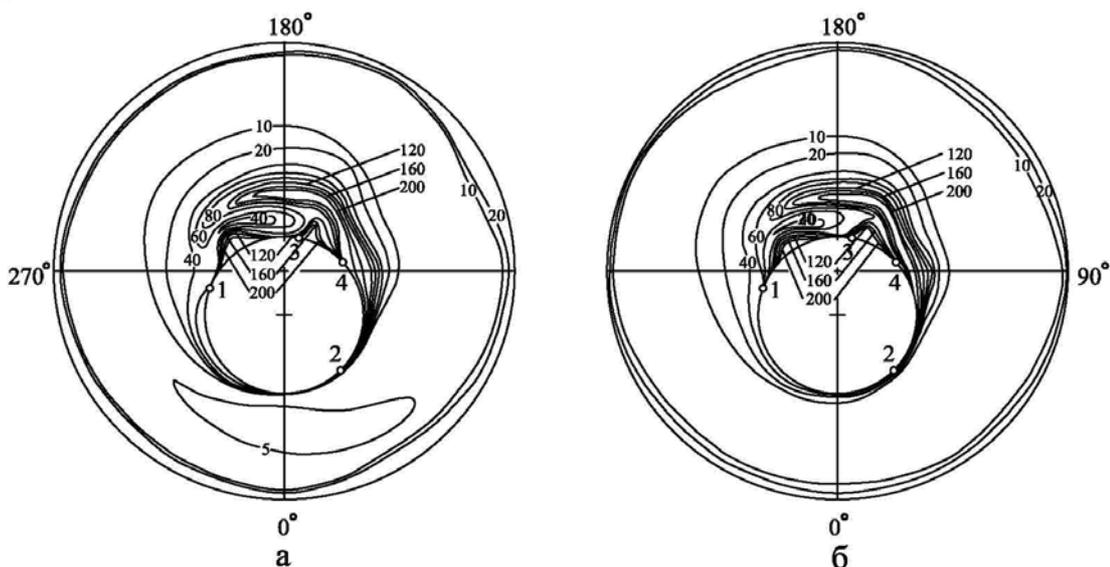


Рис. 3. Распределения  $\varepsilon_\varphi$  (а) и  $\varepsilon_z$  (б) в поперечном сечении циклонной камеры

консервативного воздействия массовых сил на турбулентность происходит снижение  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$  от 10...15% вблизи поверхности цилиндра до 2...3% в области  $\bar{r}_{\varphi m}$ . При активном же влиянии массовых сил (при  $\bar{r} > \bar{r}_{\varphi m}$ ) наблюдается увеличение интенсивности пульсаций скорости в направлении внешней стенки до 6...7%.

При исследованном смещении цилиндра с оси циклонного потока наблюдается нарушение осевой симметрии в распределениях  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$ , происходит их увеличение не только около цилиндра, но также и на периферии потока. Изменяется характер распределений  $\varepsilon_\varphi$ ,  $\varepsilon_z$  и вдоль линий тока (траекторий) циклонного потока (рис. 3). В конфузурной части течения наименьшие их значения 4...5,5% наблюдаются на радиусе равном  $\bar{r}_{\varphi m}$  при  $\varphi = 0^\circ$ . В области  $\bar{r} > \bar{r}_{\varphi m}$  при увеличении радиуса интенсивность пульсаций возрастает до 10...20%. В диффузорной части поперечного сечения, минимальные значения  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$  перемещаются к боковой поверхности рабочего объема на радиус равный примерно 0,9 и увеличиваются до 6...7% при  $\varphi = 180^\circ$ . С уменьшением радиуса, при  $\bar{r} < \bar{r}_{\varphi m}$ , в этой области течения происходит резкое увеличение  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$ . Наиболее высокие значения  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$  (до 200% и более) достигаются в центре вихря, на изотахе нулевого значения тангенциальной скорости, и в начале его образования у поверхности цилиндра за лобовой точкой 1 (при  $\varphi_d = 200^\circ \dots 220^\circ$ ), а также за точками отрыва потока 2 и 3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленные закономерности гидродинамики циклонного потока, омывающего цилиндр, смещенный с его аэродинамической оси, дают возможность выполнить физически обоснованный анализ теплоотдачи этого цилиндра.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$D_k, L_k$  – диаметр и длина циклонной камеры;  
 $d$  – диаметр цилиндра, мм;  
 $e$  – величина смещения оси цилиндра с оси циклонной камеры, мм;  
 $w$  – скорость потока, м/с;  
 $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости, м<sup>2</sup>/с;  
 $r, \varphi, z$  – цилиндрические координаты, м;  
 $Re$  – число Рейнольдса.  
 Индексы:  
 вх – параметры потока на входе в циклонную камеру;  
 $\varphi, z$  – параметры для тангенциальной и осевой составляющей вектора скорости;  
 $m$  – максимальное значение параметра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леухин Ю.Л., Сабуров Э.Н., Васильев Д.В. Особенности обтекания цилиндра, смещенного с аэродинамической оси циклонного потока // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений). 1999. № 3. С.56–62.
2. Разработка экспериментального стенда и исследование с помощью LDA аэродинамики циклонного нагревательного устройства / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, И.А. Усачев, В. Гарен // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: Сб. науч. тр.: АГТУ, 2004. Вып. IX. С. 136–143.