

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ КРУГЛОГО ЦИЛИНДРА, СМЕЩЁННОГО С АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОСИ СИЛЬНО ЗАКРУЧЕННОГО ЦИКЛОННОГО ПОТОКА

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

Архангельский государственный технический университет, Россия (1)  
Университет прикладных наук, Эмден, Германия (2)

## 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 генерирующей закрученный поток циклонной камеры 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, рекуператорах и т.д. [2].

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Физическое моделирование обтекания цилиндра выполнено на стенде, созданном в лаборатории прикладной лазерной техники (Institut für Angewandte Lasertechnik) университета прикладных наук г. Эмден (Германия). Стенд включал циклонную камеру и измерительный комплекс лазерной установки LDA (рис.1).

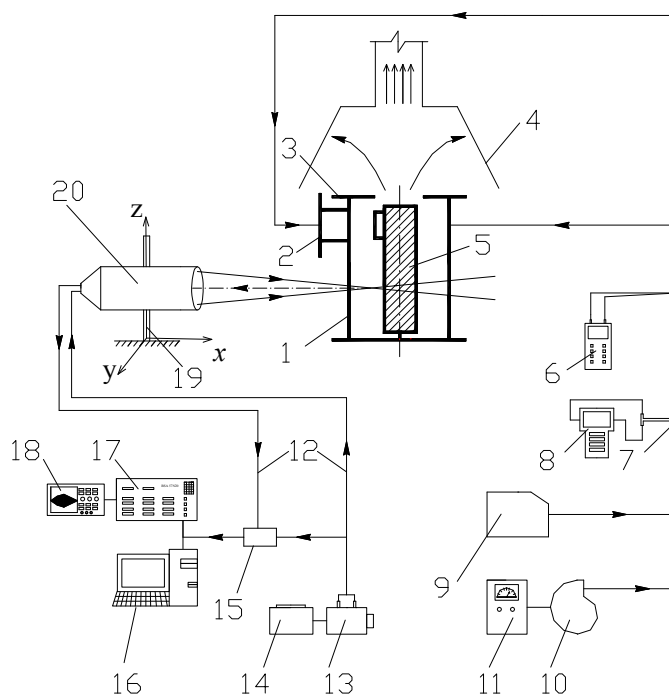


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – циклонная камера; 2 – входной канал; 3 – выходной торец; 4 – вытяжной зонт; 5 – цилиндр - заготовка; 6 – цифровой термометр; 7 – трубка Пито-Прандтля; 8 – цифровой микроманометр; 9 – генератор тумана; 10 – воздуходувка; 11 – блок управления напряжением воздуходувки; 12 – волоконные световоды; 13 – оптический коммутатор; 14 – лазер; 15 – фотомультиплекер; 16 – компьютер с программным обеспечением; 17 – контроллер-счетчик; 18 – осциллограф; 19 – система перемещения зонда; 20 – оптический зонд.

Циклонная камера изготовлена из оргстекла, имела внутренний диаметр  $D_k = 2R_k = 179$  мм и двухсторонний тангенциальный ввод потока. Относительные геометрические характеристики камеры: длина  $\bar{L}_k = L_k/D_k = 1,52$ ; суммарная площадь входа потока  $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх}/\pi D^2 = 4,13 \cdot 10^{-2}$ ; диаметр выходного отверстия  $\bar{d}_{вых} = d_{вых}/D = 0,4$ . 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). Цилиндр имел длину 231,5 мм и диаметр  $d = 61,5$  мм. Торцы цилиндра отстояли от торцов камеры на расстоянии 23 мм. Величина смещения цилиндра с оси камеры равнялась 17 мм. Исследования выполнены в диапазоне изменения числа Рейнольдса  $Re_{вх} = V_{вх} D_k / \nu_{вх}$  равном  $18,7 \cdot 10^4 \dots 25,8 \cdot 10^4$ .

На рис.2 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 изотак тангенциальной и осевой ( $\bar{w}_z = w_z / V_{вх}$ ) скоростей при обтекании цилиндра. На рис.2 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 и перестройка её 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 диффузорной 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 (изотак нулевого значения тангенциальной скорости) на рис.2в показана штриховой линией и берет начало в точке 1. Попытный вихревой поток срывается с поверхности цилиндра в точке 3. Между точками 3 и 4 расположена область сравнительно 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  $\varphi_d \approx 35^\circ$  - точка стока.

Распределения изотак осевой скорости (рис.2г) 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 неосесимметричным. Смещение цилиндра с аэродинамической оси циклонного потока приводит к появлению значительных вторичных (осевых) течений.

Полученная картина обтекания цилиндра, смещенного с аэродинамической оси циклонного потока, полностью подтверждается результатами исследования турбулентной структуры течения. Установлено [1], что при расположении цилиндра соосно с аэродинамической осью циклонного потока имеется 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 скоро-

сти, практически совпадает с  $\bar{r}_{\varphi m}$  - 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.

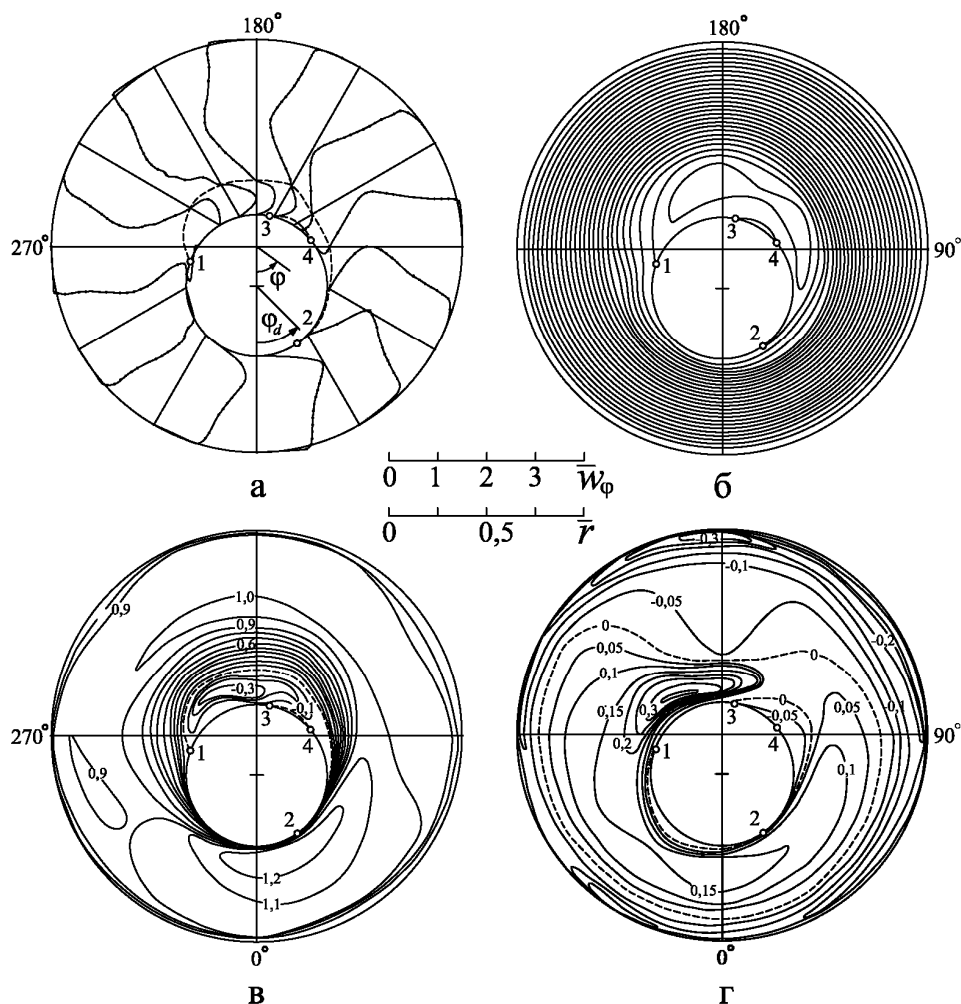


Рис. 2. Распределения тангенциальной скорости, линий тока, изотех тангенциальной и осевой скоростей

дра. При смещении цилиндра, вероятно, из-за 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  $r > \bar{r}_{\varphi m}$ ) наблюдается увеличение интенсивности пульсаций скорости в направлении внешней стенки до 6...7%.

При исследованном смещении цилиндра с оси циклонного потока имеется 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

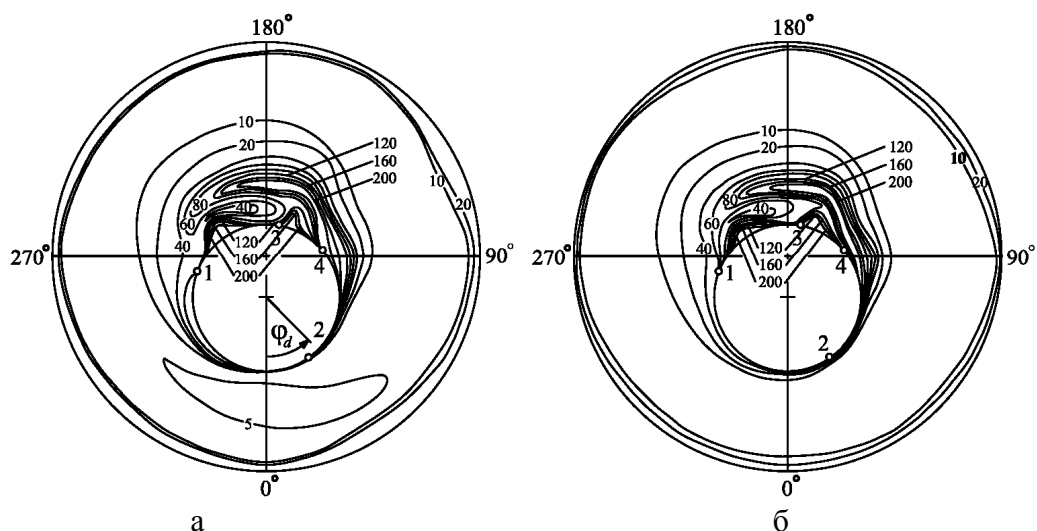
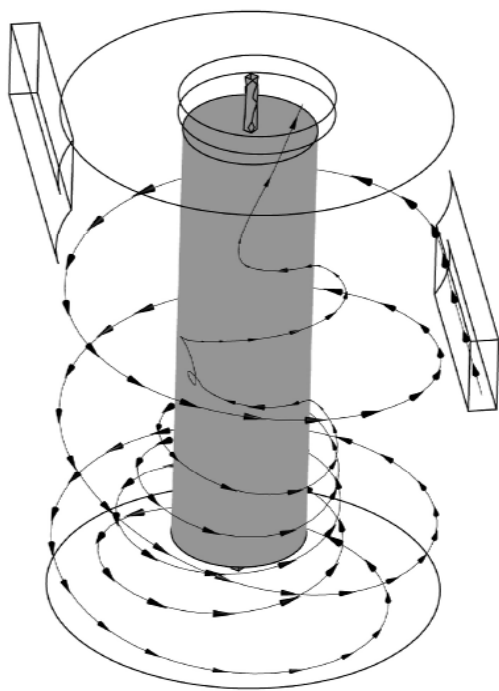


Рис. 3. Распределения  $\varepsilon_\varphi$  (а) и  $\varepsilon_z$  (б) в поперечном сечении циклонной камеры

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 изотaxe 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.

Численное моделирование обтекания цилиндра, расположенного в циклонной камере, выполнено с использованием программного комплекса CFX-5.7. В расчетах применена наиболее соответствующая рассматриваемой задаче двухпараметрическая модель турбулентности Shear Stress Transport  $k-\omega$ .

Одним из результатов расчёта является визуализация траекторий движения частиц, поступающих по осям входных каналов (при  $\bar{z}_{вх} = z_{вх}/D_k = 1,204$ ) циклонной камеры (рис.4).



На рис.5 приведены проекции распределений вектора скорости в её рабочем объёме на эти же диаметральные плоскости. Более жирными линиями на рисунке показаны изотaxe нулевого значения осевой скорости. Ориентировочное расположение характерных точек 1...4 (рис. 5а), хорошо согласуются с результатами измерений скорости, и опытными линиями тока (рис.2). На рис. 5б хорошо видны вихри, существующие в рабочем объёме циклонной камеры.

Картину обтекания цилиндра, дополняют распределения осевой скорости в виде контуров ее изотaxe (рис.6 а,б).

Рис. 4. Расчётная траектория движения частицы потока в объёме циклонной камеры

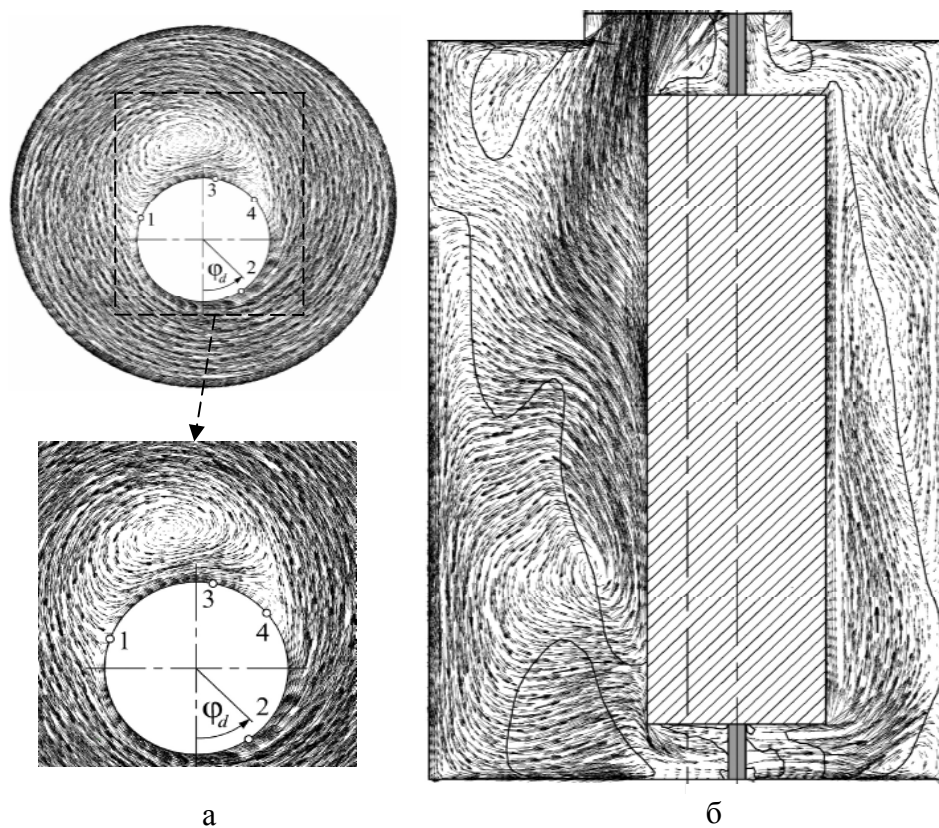


Рис.5. Расчётные проекции вектора скорости в поперечном (а) и продольном (б) сечении циклонной камеры

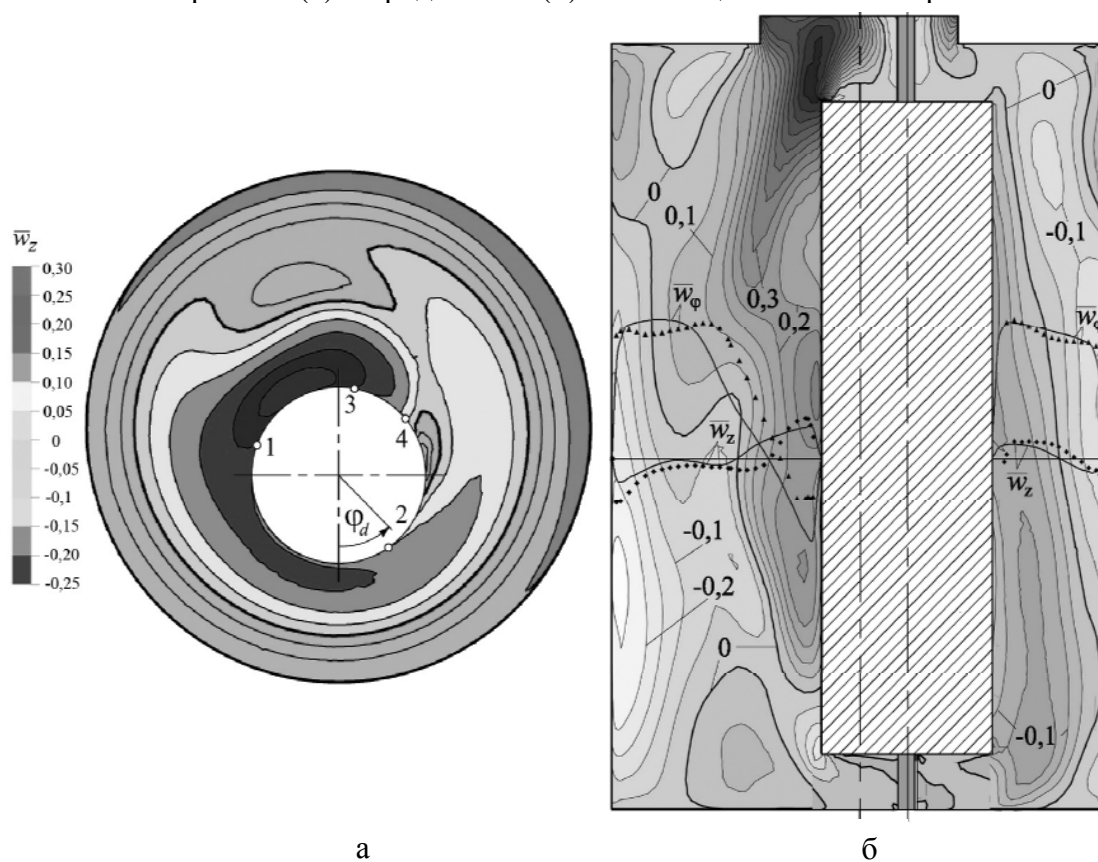


Рис.6. Распределения изотак осевой скорости в поперечном (а) и продольном (б) сечении циклонной камеры

Сравнение распределений тангенциальной и осевой составляющих скорости в поперечном сечении циклонной камеры (рис.6б), полученных численным и экспериментальным методами, показывает их вполне удовлетворительное совпадение. Последнее позволяет сделать вывод о надёжности результатов выполненного исследования закономерностей обтекания круглого цилиндра, смещённого с аэродинамической оси сильно закрученного циклонного потока

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Леухин, Ю.Л. Особенности обтекания цилиндра, смещенного с аэродинамической оси циклонного потока / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, Д.В. Васильев // Энергетика ...( Изв. высш. учеб. заведений ). 1999. № 3. С.56-62.
2. Сабуров, Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э.Н. Сабуров. - Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. - 341 с.