



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 533.601

Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, И.А. Усачев, В. Гарен

Леухин Юрий Леонидович родился в 1953 г., окончил в 1975 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники Архангельского государственного технического университета. Имеет более 90 печатных работ в области аэродинамики и конвективного теплообмена в циклонных устройствах различного технологического назначения.



Сабуров Эдуард Николаевич родился в 1939 г., окончил в 1961 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники, проректор по научной работе Архангельского государственного технического университета, академик Российской и Международной инженерных академий, Российской академии естественных наук, заслуженный деятель науки и техники РФ. Имеет более 300 публикаций в области аэродинамики и конвективного теплообмена в сильно закрученных потоках, их использования для интенсификации процессов тепломассообмена в аппаратах различного технологического назначения.



Усачев Илья Александрович родился в 1980 г., окончил в 2003 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры теплотехники АГТУ. Имеет 9 печатных работ в области исследования аэродинамики циклонных устройств.



Вальтер Гарен родился в 1940 г., профессор Института прикладной лазерной техники Университета прикладных наук (г. Эмден) в области оптики, лазерной техники, испытания материалов. Имеет более 30 научных работ по физике потоков (газодинамика, ударные волны в газовой и жидкой средах), оптическим методам измерения потоков, лазерной анемометрии LDA, методам PIV, лазерной дифференциальной интерферометрии LDA, численным методам моделирования.

**ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА НА АЭРОДИНАМИКУ ЦИКЛОННОЙ ЗАГРУЖЕННОЙ КАМЕРЫ**

Проанализированы результаты экспериментального исследования циклонного потока, обтекающего цилиндр, смещенный с аэродинамической оси.

Ключевые слова: циклонная камера, циклонный поток, осредненные и турбулентные характеристики, число Рейнольдса.

Экспериментально установлено, что закономерности обтекания круглого цилиндра циклонным (сильно закрученным) потоком зависят не

только от его диаметра, длины, смещения с аэродинамической оси потока, геометрических характеристик генератора закрутки – циклонного устройства, но также и от величины числа Рейнольдса [2, 5]. Изучение этой зависимости представляет теоретический и практический интерес с точки зрения дальнейшего исследования аэродинамики и конвективного теплообмена в циклонных нагревательных и теплообменных устройствах.

Измерения распределений осредненных и пульсационных тангенциальной и осевой составляющих вектора скорости, а также сопротивления циклонной камеры при различных расходах газа (числах Рейнольдса) выполнены на экспериментальном стенде [5], созданном авторами в лаборатории прикладной лазерной техники Университета прикладных наук г. Эмден (Германия). Стенд включал вертикально расположенную циклонную камеру и измерительный комплекс лазерной установки LDA. Циклонная камера, изготовленная из оргстекла, имела внутренний диаметр $D_k = 2R_k = 179$ мм и длину $L_k = 272$ мм. Воздух в камеру подвели тангенциально внутренней поверхности с двух диаметрально противоположных сторон через каналы высотой 13 мм и длиной (размер по образующей) 40 мм. Входные каналы расположены в верхней части камеры, их ось – на расстоянии 60 мм от выходного торца. Безразмерная суммарная площадь входа потока $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх}/\pi D_k^2 = 4,13 \cdot 10^{-2}$. Воздух из циклонной камеры отводили через осесимметричное отверстие в верхнем торце. Относительный диаметр выходного отверстия $\bar{d}_{вых} = d_{вых}/D_k = 0,4$.

Обтекаемый закрученным потоком цилиндр имел длину 231,5 мм и диаметр $d = 61,5$ мм, что соответствовало параметру $\bar{d} = d/D_k = 0,344$. Торцы цилиндра отстояли от торцов камеры на расстоянии 23 мм, что исключало непосредственное воздействие на их боковую поверхность радиальных приторцевых перетечек. Относительное смещение цилиндра с оси циклонной камеры $\bar{e} = e/R_k = 0,190$ (17 мм). Скорость потока измеряли 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) через 90° по методике, подробно изложенной в работе [5]. При проведении опытов варьировали входное число Рейнольдса $Re_{вх} = V_{вх} D_k / \nu_{вх}$ ($V_{вх}$ и $\nu_{вх}$ – средняя скорость и кинематический коэффициент вязкости потока во входных каналах циклонного устройства) в диапазоне $(2,22 \dots 23,53) \cdot 10^4$.

Избыточное давление p на поверхности цилиндра измеряли через 10° по периметру в 8-ми равномерно расположенных по его длине поперечных сечениях через отверстия диаметром 0,5 мм [4]. Исследования выполнены при $Re_{вх} = (25,31 \dots 61,58) \cdot 10^4$.

На рис. 1 приведены распределения безразмерных тангенциальной $w_\phi = w_\phi / V_{вх}$ и осевой $w_z = w_z / V_{вх}$ составляющих вектора полной скорости по радиусу циклонной камеры при различных значениях $Re_{вх}$,

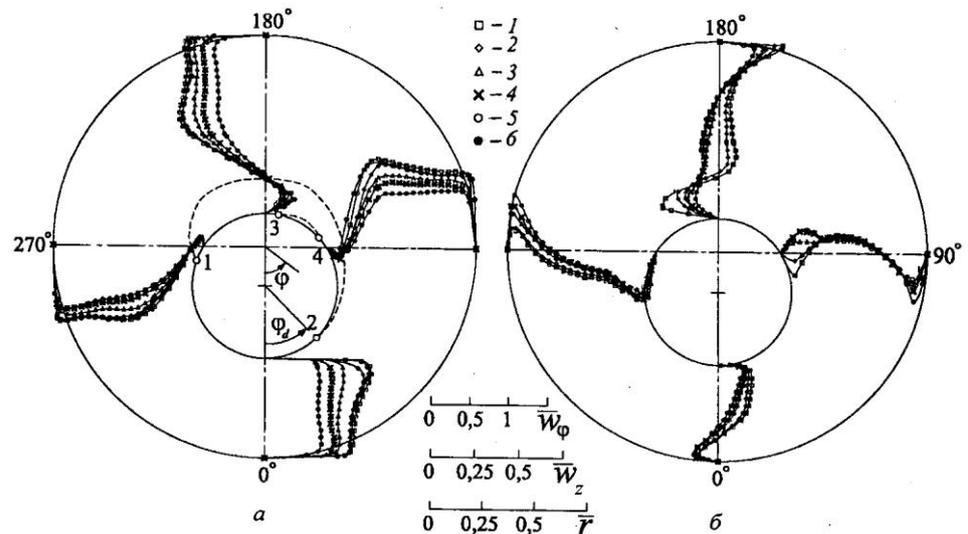
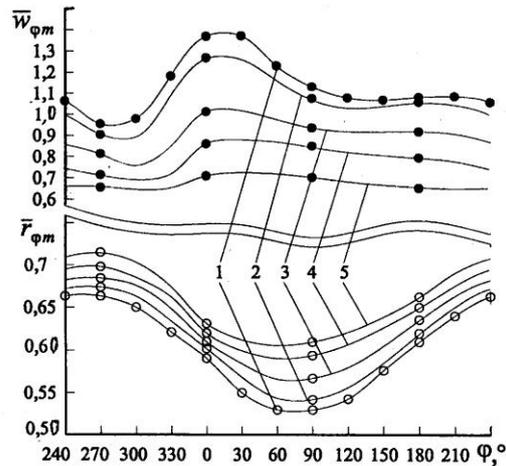


Рис. 1. Распределения \bar{w}_φ (а) и \bar{w}_z (б) по радиусу циклонной камеры при различных значениях $Re_{вх}$: 1 – $Re_{вх} \cdot 10^{-4} = 23,53$; 2 – 13,70; 3 – 6,46; 4 – 3,45; 5 – 2,22; 6 – 62,12 (точки 1 – 4 на поверхности цилиндра соответствуют картине обтекания смещенного цилиндра при $Re_{вх} = 23,53 \cdot 10^{-4}$; φ_d – угол, отсчитываемый в поперечном сечении камеры от линии смещения цилиндра, с вершиной на его оси)

полученные LDA, а также цилиндрическим трехканальным зондом по обычной методике [6] при $Re_{вх} = 62,12 \cdot 10^4$.

Течение закрученного потока, обтекающего смещенный с его аэродинамической оси цилиндр, в поперечном сечении камеры происходит как бы в замкнутом криволинейном канале типа конфузор – диффузор – конфузор и т.д., который образуют цилиндр и боковая поверхность рабочего объема циклонной камеры [9]. При перемещении потока в конфузорной части поперечного сечения и приближении его к наиболее стесненному проходному сечению $\varphi = 0^\circ$ (φ – угол с вершиной на оси камеры, отсчитываемый в направлении движения потока от радиуса, по которому смещается цилиндр) происходит увеличение тангенциальной скорости и перестройка ее профиля. В диффузорной его части ($\varphi > 0^\circ$) положительный градиент давления препятствует продвижению потока у поверхности цилиндра и приводит к его отрыву. С противоположной стороны цилиндра наблюдается вихрь с интенсивным стоком газа в направлении выходного отверстия циклонной камеры. Граница разделения прямого и обратного течений в вихре (изотаха нулевого значения тангенциальной скорости) на рис. 1, а показана штриховой линией, которая замыкается между критическими точками – передней (лобовой) 1 и задней (кормовой) 2. Попятный вихревой поток срывается с поверхности цилиндра в точке 3 и затем присоединяется к ней в точке 4. Область течения между точками 3 и 4, в которой генерируется

Рис. 2. Изменение $\bar{w}_{\varphi m}$ (черные точки) и $\bar{r}_{\varphi m}$ (светлые точки) по периметру поперечного сечения циклонной камеры при различных значениях $Re_{вх}$ (номера линий соответствуют обозначениям чисел $Re_{вх}$, принятым на рис. 1)



турбулентность потока высокой интенсивности, – «отрывной пузырь» [1]. У поверхности цилиндра от точки 4 поток перемещается в направлении точки 2.

Смещение цилиндра с аэродинамической оси циклонного потока приводит к значительному усложнению картины вторичных (осевых) течений во всем рабочем объеме циклонной камеры.

При обтекании цилиндра, смещенного с оси рабочего объема, как и при соосном его расположении [2], с понижением числа Рейнольдса меньше $Re_{вх}^{авт}$ ($Re_{вх}^{авт}$ определяет границу автомодельности течения [7]) происходит постепенная перестройка профилей тангенциальной и осевой составляющих скорости потока. Интенсивность вращательного движения в циклонном потоке и в вихре снижается. Циклонный поток принимает более осесимметричную и равномерную по периметру рабочего объема камеры форму. Уменьшаются значения максимума вращательной скорости $\bar{w}_{\varphi m} = w_{\varphi m}/V_{вх}$ и интенсивность его изменения от угла φ (рис. 2). Так, если при $Re_{вх} = 23,53 \cdot 10^4$ максимальное значение $\bar{w}_{\varphi m}$ (при $\varphi \approx 15^\circ$) на 44 % превышает минимальное (при $\varphi \approx 270^\circ$) в этом же поперечном сечении, то при $Re_{вх} = 2,22 \cdot 10^4$ превышение составляет только 11 %. Радиус $\bar{r}_{\varphi m} = r_{\varphi m}/R_k$, характеризующий положение $w_{\varphi m}$, увеличивается, т.е. максимальное значение $w_{\varphi m}$ смещается к боковой поверхности рабочего объема циклонной камеры, а изменение его по периметру уменьшается.

Распределение осевой скорости по периметру при уменьшении $Re_{вх}$ приобретает также значительно более равномерный характер. Наиболее существенно профиль \bar{w}_z перестраивается в широкой – диффузорной части поперечного сечения, где обратное течение оттесняется от цилиндра. В конфузорной части, наоборот, происходит некоторое расширение периферийного обратного тока. При $Re_{вх} = 2,22 \cdot 10^4$ изотакта нулевого значения осевой

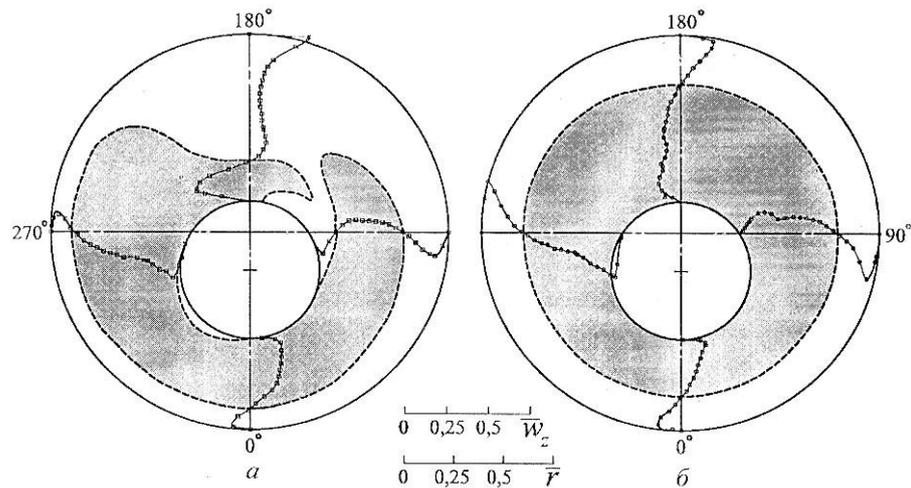


Рис. 3. Изменение \bar{w}_z по периметру поперечного сечения циклонной камеры при различных значениях $Re_{вх}$: $a - Re_{вх} = 23,53 \cdot 10^4$; $b - 2,22 \cdot 10^4$ (серым цветом выделена область положительного направления движения осевой скорости – в сторону выходного отверстия циклонной камеры)

скорости, изображенная на рис. 3 штриховой линией, становится практически осесимметричной с рабочим объемом окружности.

Изотахи осевой скорости, полученные в результате численного моделирования течения с использованием программного комплекса CFX, представлены на рис. 4. Сопоставление результатов численного моделирования (сплошные линии) и эксперимента (точки) для тангенциальной и осевой составляющих скорости, выполненные для сечений замеров с $\varphi = 0$ и 180° , показывает их хорошее совпадение. С уменьшением $Re_{вх}$ снижается интенсивность вторичных вихрей, возникающих в диффузорной части поперечного сечения. При $Re_{вх} = 2,22 \cdot 10^4$ изотаха нулевой осевой скорости в продольном сечении в области циклонного потока, ниже входных шлиц, приобретает практически осесимметричную цилиндрическую форму (рис. 4). Такой же вид имеет изотаха нулевой осевой скорости при обтекании потоком осесимметрично расположенного цилиндра. На границе раздела периферийного обратного и прямого выходного вихрей образуются вторичные вихревые образования, центры которых находятся на нулевых изотахах осевой скорости.

Распределения безразмерного избыточного давления $\bar{p} = 2p / \rho V_{вх}^2$ (ρ – плотность потока) по периметру цилиндра в его средней части представлены на рис. 5. Максимального значения p достигает в лобовой точке 1 при $\varphi_d \approx 250^\circ$, минимального – в области зажатого сечения (при $\varphi_d \approx 0^\circ$). В

конфузорной части поперечного сечения от боковой точки 1, по мере продвижения потока и увеличения его скорости, давление снижается,

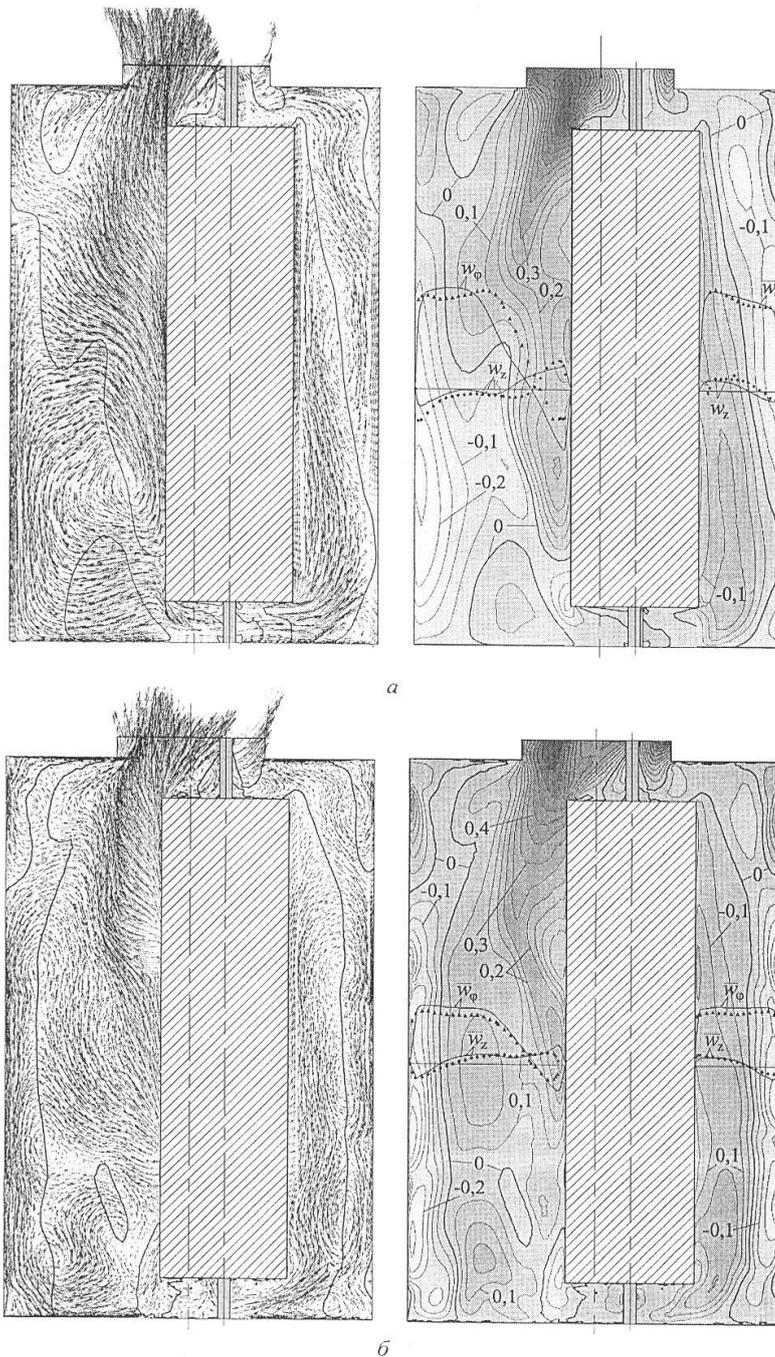
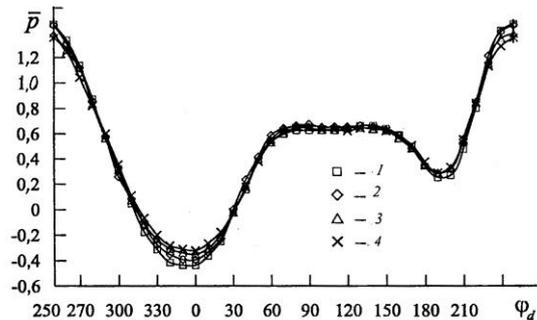


Рис. 4. Распределения векторов полной скорости (а, б) и изотях осевой скорости (б, з) в диаметральном сечении циклонной камеры

при различных значениях $Re_{вх}$: $a, б$ – $Re_{вх} = 23,53 \cdot 10^4$;
 $в, з$ – $2,22 \cdot 10^4$

Рис. 5. Распределения \bar{p} по периметру цилиндра при различных значениях $Re_{вх}$: 1 – $Re_{вх} \times 10^4 = 61,58$; 2 – 47,60; 3 – 34,84; 4 – 25,31



в диффузорной – сначала растет, а за точкой отрыва 2 постепенно выравнивается. Аналогичное изменение \bar{p} происходит в вихре от точки 1 до его отрыва в точке 3 при $\varphi_d \approx 170^\circ$. В кормовой области течения \bar{p} практически не изменяется. С уменьшением $Re_{вх}$, в диапазоне его изменения от $25,31 \cdot 10^4$ до $61,58 \cdot 10^4$, наблюдается снижение \bar{p} в лобовой точке на поверхности цилиндра и его увеличение в области зажатого сечения. Как показывают расчеты, выполненные с использованием CFX, при снижении $Re_{вх}$ до $2,22 \cdot 10^4$ происходит дальнейшее выравнивание давления на поверхности цилиндра, ликвидируется отрицательное избыточное давление в зажатом сечении. Лобовая точка 1 при этом несколько смещается по направлению движения потока в область больших значений угла φ_d , что, вероятно, можно объяснить перестроением профиля тангенциальной скорости – уменьшением $w_{\varphi m}$ и его смещением к стенке камеры (увеличением $r_{\varphi m}$).

Сложная аэродинамическая структура циклонного потока, обтекающего смещенный цилиндр, предопределяет характер изменения турбулентности и высокий ее уровень. На рис. 6 приведены распределения по радиусу 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 при исследованном смещении и различных значениях $Re_{вх}$. Приведенные данные хорошо согласуются с результатами исследований турбулентности закрученных потоков в незагруженных циклонных камерах и кольцевых каналах [3, 8].

Распределения ε_φ и ε_z при смещенном с оси циклонного потока положении цилиндра определяются совокупным влиянием на турбулентность не только массовых сил, пограничных слоев, образующихся на поверхности цилиндра и циклонной камеры, расположением точек отрыва потока [9], но и числом Рейнольдса. При наибольшем значении $Re_{вх}$ в конфузорной части течения (на рис. 6 при $\varphi = 0^\circ$) наименьшие значения ε_φ и ε_z , равные 4,0 ... 5,5 %,

отмечены на радиусе $\bar{r}_{\text{фм}}$, характеризующем местоположение максимума тангенциальной составляющей (практически и полной) скорости потока.

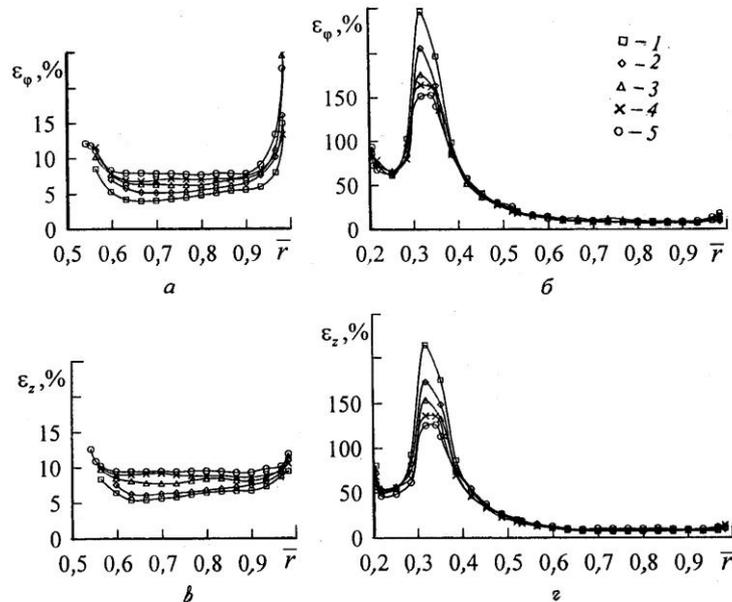


Рис. 6. Распределения ε_{φ} (а, б) и ε_z (в, г) по радиусу циклонного устройства в зависимости от $Re_{\text{вх}}$ при $\varphi = 0^\circ$ (а, в) и $\varphi = 180^\circ$ (б, г) (обозначения опытных данных соответствуют рис. 1)

В области $\bar{r} > \bar{r}_{\text{фм}}$ при увеличении радиуса интенсивность пульсаций возрастает до 6 ... 7 %. Резкое возрастание ε_{φ} и ε_z (до 10 ... 20 %) вблизи поверхности камеры и цилиндра объясняется генерацией турбулентности в пристенном пограничном слое. В диффузорной части поперечного сечения (при $\varphi = 180^\circ$) минимальные значения ε_{φ} и ε_z перемещаются к боковой поверхности рабочего объема на радиус, равный примерно 0,7 ... 0,8 (граница ядра потока [3]), и увеличиваются до 6 ... 7 %. С уменьшением радиуса при $\bar{r} < \bar{r}_{\text{фм}}$ в этой области течения происходит резкое увеличение ε_{φ} и ε_z . Наиболее высокие значения ε_{φ} и ε_z (до 250 %) достигнуты в центре вихря, на изотахе нулевого значения тангенциальной скорости, и в начале его образования у поверхности цилиндра за лобовой точкой 1 (при $\varphi_d = 200 \dots 220^\circ$), а также за точками отрыва потока 2 и 3 [9].

При уменьшении числа Рейнольдса, вероятно, из-за снижения уровня вращательной скорости и влияния массовых сил на турбулентность потока, распределения ε_{φ} и ε_z по радиусу в конфузорной части постепенно выравниваются и увеличиваются до 8,0 ... 9,5 %. В диффузорной части зависимость ε_{φ} и ε_z от величины $Re_{\text{вх}}$ более сложная. В циклонном потоке при $\bar{r} > 0,52 \dots 0,55$ происходит повышение ε_{φ} и ε_z (на границе ядра потока – до

9 ... 10 %), а в вихре, наоборот, интенсивность пульсаций обеих составляющих скорости значительно снижается.

Уменьшение уровня тангенциальных скоростей в рабочем объеме и вторичных вихреобразований в ядре потока, а также значительные перераспределения осевых токов с уменьшением числа $Re_{вх}$ в неавтомоделной области течения закрученного потока приводят к снижению такой важной характеристики циклонного устройства, как суммарный коэффициент сопротивления $\zeta_{вх} = 2\Delta p_{п} / \rho_{вх} V_{вх}^2$ ($\Delta p_{п}$ – разность полного давления потока на входе и выходе из циклонного устройства). Расчет коэффициента сопротивления при $Re < Re_{вх}^{авт}$ можно производить по уравнению

$$\frac{\zeta_{вх}}{\zeta_{вх}^{авт}} = \left(1,034 - 0,034 \frac{Re_{вх}^{авт}}{Re_{вх}} \right),$$

где $\zeta_{вх}^{авт}$ – коэффициент сопротивления циклонного устройства при автомоделном режиме течения [7].

Выводы

1. Установлены особенности влияния числа Рейнольдса на закономерности течения сильно закрученного циклонного потока, обтекающего цилиндр, смещенный с его аэродинамической оси.
2. Приведенные в статье данные по формированию пограничного слоя на поверхности смещенного цилиндра могут служить основой для физически обоснованного анализа особенностей его теплоотдачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жукаускас, А.А. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости [Текст] / А.А. Жукаускас, И.И. Жюгда. – Вильнюс: Мокслас, 1979. – 240 с.
2. Леухин, Ю.Л. Аэродинамика и конвективный теплообмен в вертикальном циклонном устройстве для нагрева круглых массивных заготовок [Текст] / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, И.А. Усачев, В. Гарен // Вестник АГТУ. Сер. Энергетика. – 2006. – С. 3–10.
3. Леухин, Ю.Л. Влияние числа Рейнольдса на аэродинамику кольцевого канала с закрученным потоком [Текст] / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, И.А. Усачев, В. Гарен // Лесн. журн. – 2004. – № 2. – С. 100–109. – (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Леухин, Ю.Л. Особенности обтекания цилиндра, смещенного с аэродинамической оси циклонного потока [Текст] / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, Д.В. Васильев // Энергетика. – 1999. – № 3. – С. 56–62. – (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Леухин, Ю.Л. Разработка экспериментального стенда и исследование с помощью LDA аэродинамики циклонного нагревательного устройства [Текст] / Ю.Л. Леухин, Э.Н. Сабуров, И.А. Усачев, В. Гарен // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. / АГТУ. – Архангельск, 2004. – Вып. IX. – С. 136–143.
6. Повх, И.Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении [Текст] / И.Л. Повх. – Л: Машиностроение, 1974. – 480 с.

7. *Сабуров, Э.Н.* Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом [Текст] / Э.Н. Сабуров. – Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. – 341 с.

8. *Устименко, Б.П.* Процессы турбулентного переноса во вращающихся течениях [Текст] / Б.П. Устименко. – Алма-Ата: Наука КазССР, 1977. – 228 с.

9. *Leuchin, J.L.* Experimentelle und theoretische Untersuchungen von Gaswirbelströmungen in Zyklonkammern mit Laser-Doppler-Anemometrie [Text] / J.L. Leuchin, I.A. Usatschjov, E.N. Saburov, W. Garen // 13 Fachtagung «Lasermethoden in der Stromungsmesstechnik». – Cottbus (Deutschland), 2005.

Архангельский государственный
технический университет

Университет прикладных наук
г. Эмден (Германия)

Поступила 25.09.2005

Yu.L. Leukhin, E.N. Saburov, I.A. Usachev, W. Garen
**Influence of Reynolds Number on Aerodynamics
of Cyclone Loaded Chamber**

The experimental research results of cyclone flow slipping the cylinder displaced from its aerodynamic axis are analyzed.

