

УДК 532.5

## ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОРОСТИ ПОТОКА В ЦИКЛОННЫХ КАМЕРАХ БОЛЬШОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ

Канд. техн. наук, доц. ОРЕХОВ А. Н.,  
докт. техн. наук, проф. САБУРОВ Э. Н.

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова*

Работа выполнена в рамках программы имени Леонарда Эйлера на стенде, созданном совместно сотрудниками кафедры теплотехники САФУ имени М. В. Ломоносова и лаборатории лазерной техники Университета прикладных наук г. Эмдена<sup>1</sup> (Германия).

Основой измерительного комплекса экспериментальной установки являлся двухлучевой лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) фирмы Daptec Measurement Technology A/S. Для трассирования воздушного потока при измерениях использовали силиконовую жидкость, образующую при диспергировании в генераторе Safex Fog Generator микроскопические частицы тумана размером около 1 мкм. Они имели практически одинаковую с воздухом плотность и при вводе в рабочий объем циклонной камеры перемещались со скоростью потока, не оказывая влияния на его характеристики.

В работе производили измерения распределений пульсационных и осредненных тангенциальной и аксиальной скоростей турбулентного циклонного потока. Модель циклонной камеры (рис. 1) была выполнена из органического стекла и состояла из закручивателя 1, шлицев 2, глухого торца 3, сменных секций рабочего объема 4 и выходного пережима 5. Внутренний диаметр закручивателя и секций рабочего объема камеры  $D_k = 2R_k = 179$  мм. Закручиватель длиной 124 мм имел два тангенциальных шлица прямоугольного сечения общей площадью  $f_{вх} = 2 \cdot 13 \cdot 39$  мм<sup>2</sup>. В относительном виде  $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх} / \pi D_k^2 = 0,04$ , а высота шлицев  $\bar{h}_{вх} = h_{вх} / R_k = 0,0726$ . Относительный диаметр выходного отверстия пережима  $\bar{d}_{вых} = d_{вых} / D_k = 0,43$ . Закручиватель со сменными секциями позволял собирать циклонные камеры с относительной длиной  $\bar{L}_k = L_k / D_k = 1,55; 6,30; 11,88$  и  $17,48$ .

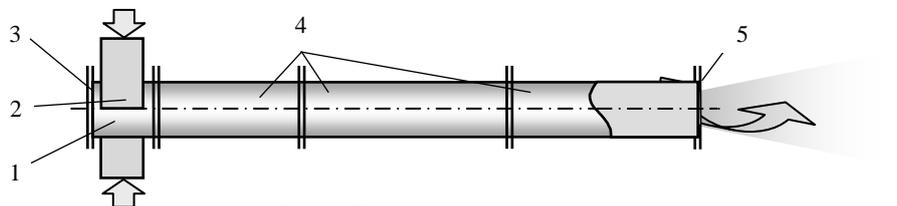


Рис. 1. Схема циклонной камеры

Воздух в экспериментальную установку подавали от центробежного вентилятора с плавной регулировкой производительности. Эвакуацию смеси воздуха с аэрозолем осуществляли из пережима в систему вытяжной

<sup>1</sup> На отдельных этапах работы участие в ней принимал проф. В. Гарен.

вентиляции. Измерения полей осредненных и пульсационных скоростей потока производили в распределенных по длине рабочего объема сечениях при различных числах Рейнольдса. Координаты измерительных сечений  $\bar{z} = z/D_k$  в осевом направлении отсчитывали от глухого торца камеры. Их значения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Координаты измерительных сечений

$\bar{L}_k$	$\bar{z}$
1,55	1,00 – – –
6,30	1,00; 2,50; 6,05 –
11,88	1,35; 5,85; 11,63 –
17,48	1,35; 5,85; 11,63; 17,23

Поскольку в экспериментах использовали двухлучевую лазерную систему, для измерения тангенциальной  $w_\varphi$  и осевой  $w_z$  компонент скорости в каждом сечении замеры производили дважды: с вертикальной и горизонтальной ориентацией плоскости пересечения лазерных лучей.

Полученные в работе распределения безразмерной тангенциальной  $\bar{w}_\varphi = w_\varphi/w_{вх}$  и осевой  $\bar{w}_z = w_z/w_{вх}$  компонент скорости подтвердили известные представления о потоке в относительно коротких циклонных камерах, особенности его вихревой структуры, выводы об его приближенной автомодельности относительно критерия Рейнольдса  $Re_{вх} = w_{вх}D_k/\nu_{вх}$  ( $w_{вх}$  – скорость потока во входных каналах;  $\nu_{вх}$  – кинематический коэффициент вязкости) при высоких входных скоростях [1, 2]. Распределения тангенциальных скоростей условно можно разделить на зоны: внутреннюю и внешнюю (квазипотенциальную), считать их практически осесимметричными. Однако с увеличением  $\bar{L}_k$  установленные ранее схемы вихревых потоков продолжают наблюдаться лишь в средних сечениях рабочего объема, а распределения тангенциальных скоростей начинают существенно меняться по его длине. В средней части камеры появляются профили, значительную радиальную часть которых можно приближенно описать уравнением  $\bar{w}_\varphi(\bar{r}) \approx \text{const}$  [3], где  $\bar{r} = r/R_k$ . Распределения тангенциальной и аксиальной скоростей в циклонной камере с  $\bar{L}_k = 17,48$  при различных  $\bar{z}$  и среднем значении числа Рейнольдса, а также при  $\bar{z} = 5,85$  и изменении  $Re_{вх} \cdot 10^{-4}$  от 4,38 до 27,32 приведены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, распределения  $\bar{w}_\varphi$  в общем случае зависят от входного числа Рейнольдса; их значения незначительно увеличиваются с ростом последнего. Влияние  $Re_{вх}$  на распределение осевой скорости более значительно проявляется в приосевой зоне течения при  $\bar{r} < 0,2$ .

При  $\bar{r} > 0,2$  значения  $\bar{w}_z$  практически не зависят от  $Re_{вх}$ . В целом полученные данные позволяют сделать заключение о приближенной автомо-

дальности циклонного потока в рассмотренном диапазоне  $Re_{\text{вх}}$  и в относительно длинных камерах.

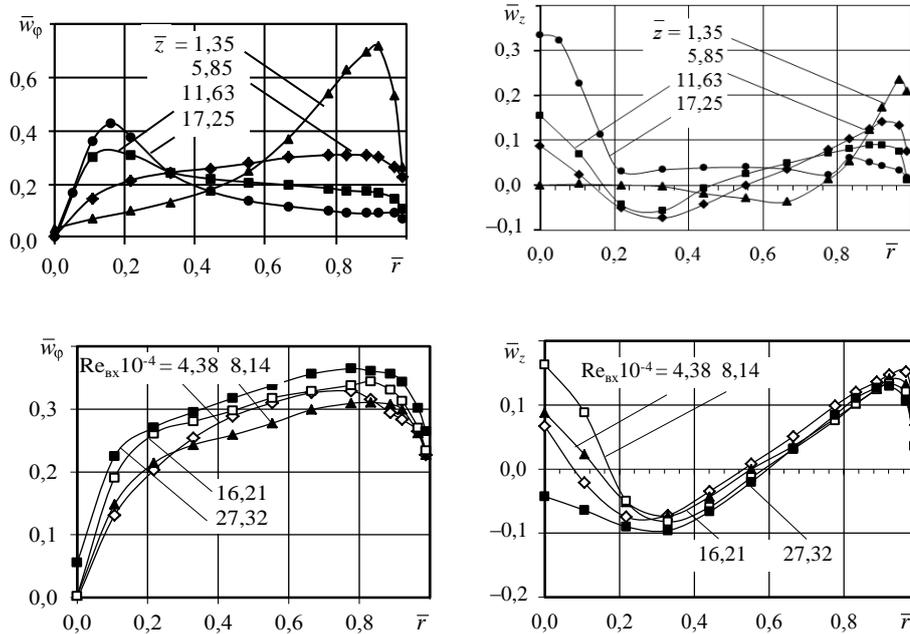


Рис. 2. Распределения  $\bar{w}_\varphi$  и  $\bar{w}_z$  в циклонной камере с  $\bar{L}_к = 17,48$  при различных  $\bar{z}$  и  $Re_{\text{вх}}$

Распределения среднеквадратичных пульсаций тангенциальной и осевой компонент скорости  $\sqrt{w_\varphi'^2}$  и  $\sqrt{w_z'^2}$  и составляющие относительной интенсивности их пульсаций  $\varepsilon_\varphi = \sqrt{w_\varphi'^2} / \bar{w}$  и  $\varepsilon_z = \sqrt{w_z'^2} / \bar{w}$  приведены на рис. 3, где  $\bar{w}$  – осредненное значение модуля вектора скорости в точке замера. На рис. 3 использованы те же обозначения, что и на рис. 2. Из представленных данных видно, что в циклонных камерах большой относительной длины, как и в относительно коротких [1], имеет место высокий уровень интенсивности пульсаций компонент вектора скорости потока.

В большинстве сечений изменения относительных интенсивностей пульсаций  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$  вдоль радиуса камеры качественно одинаковы. На радиусах  $\bar{r}$  от 0,2 до 0,9 значения  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$  составляют около 10 %. В пристеночной области течения интенсивность пульсационного движения начинает возрастать и в нескольких миллиметрах от поверхности достигает 20 % и более. Аналогичное еще более сильное возрастание интенсивности турбулентности наблюдается при приближении к оси циклонной камеры. Особенно заметно это проявляется во входном ее сечении с  $\bar{z} = 1,35$ . Заметим, что в сечении ввода потока в камеру распределения  $\bar{w}_\varphi$ ,  $\bar{w}_z$ ,  $\sqrt{w_\varphi'^2}$  и  $\sqrt{w_z'^2}$  имеют особый, отличный от других сечений рабочего объема, характер.

Рост  $\varepsilon_\varphi$  и  $\varepsilon_z$  вблизи оси и стенки циклонной камеры в определенной мере объясняется и тем, что в рассматриваемых областях снижение осред-

ненного значения модуля вектора скорости до нуля происходит значительно интенсивнее, чем нарастание  $\overline{w}'_{\varphi}$  и  $\overline{w}'_z$ . С продвижением потока к выходному отверстию уровень среднеквадратичных пульсаций компонент вектора скорости снижается и достигает наименьших значений в области стока. Опыты показали, что в относительно длинных циклонных камерах наблюдается приближенная автомодельность не только осредненных, но и турбулентных характеристик течения относительно критерия Рейнольдса в рассмотренном диапазоне его изменения.

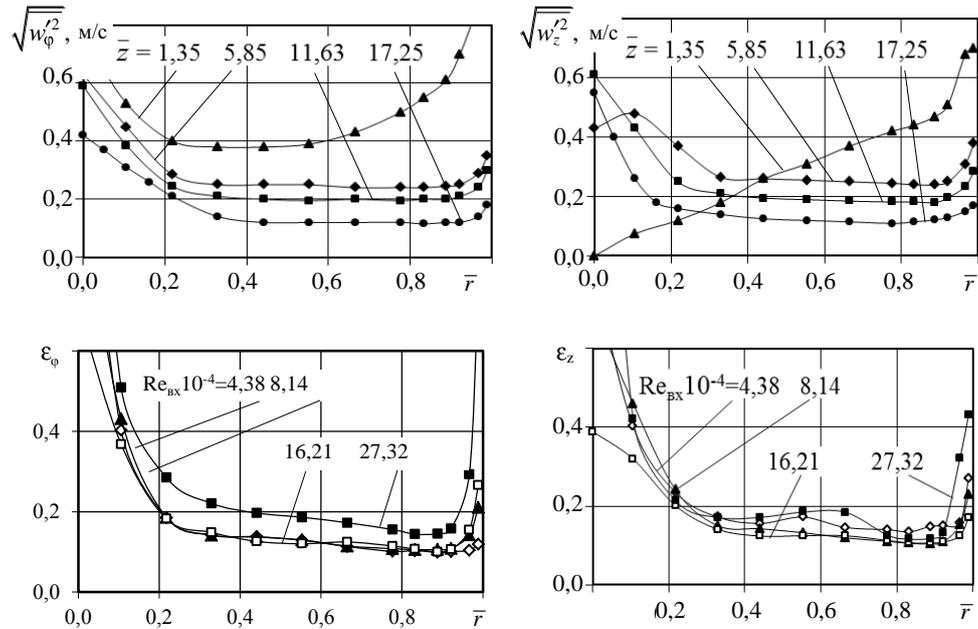


Рис. 3. Распределения среднеквадратичных пульсаций тангенциальной и осевой скоростей и относительные интенсивности их пульсаций в циклонной камере с  $\overline{L}_k = 17,48$  при различных  $\overline{z}$  и  $Re_{вх}$

Значения вышерассмотренных турбулентных характеристик на определенных характерных радиусах циклонного потока в сечении с  $\overline{z} = 5,85$  приведены в табл. 2. Верхняя строка в столбцах значений для каждого из рассмотренных  $\overline{r}$  соответствует минимальному, а нижняя – максимальному значению чисел  $Re_{вх}$ , имевших место в опытах. В табл. 2 приведена также степень турбулентности потока, вычисленная по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\overline{w}'_{\varphi}{}^2 + \overline{w}'_z{}^2}{\sqrt{\overline{w}_{\varphi}^2 + \overline{w}_z^2}}.$$

Значения характерных радиусов выбраны по распределениям  $\overline{w}_{\varphi}$ . Так, радиус  $\overline{r} = 0,1$  примерно соответствует среднему радиусу «кваситвердой» зоны течения,  $\overline{r} = 0,2$  и  $0,8$  – границам квазипотенциальной зоны течения,  $\overline{r} = 0,9$  – границе пристенной зоны течения на боковой поверхности камеры.

Из табл. 2 и рис. 3 следует, что степень турбулентности  $\varepsilon$ , тангенциальная и аксиальная составляющие относительной интенсивности пульсаций

в квазипотенциальной зоне практически не зависят от  $Re_{вх}$ . Минимальные значения среднеквадратичных пульсаций тангенциальной и осевой компонент скорости (11–15 %) наблюдаются при  $\bar{r} = 0,8$ . При уменьшении  $\bar{r}$  до 0,2 среднеквадратичные пульсации возрастают до 20–22 % и продолжают увеличиваться в «квазитвердой» зоне вращения, достигая при  $\bar{r} = 0,1$  значений 0,4 и более.

Таблица 2

Значения турбулентных характеристик

$\bar{r}$	$\sqrt{w_{\phi}^2}$ , м/с	$\sqrt{w_z^2}$ , м/с	$\epsilon_{\phi}$	$\epsilon_z$	$\epsilon$
0,1	0,16	0,20	0,40	0,40	0,40
	1,10	0,93	0,37	0,32	0,35
0,2	0,15	0,19	0,20	0,22	0,21
	0,68	0,75	0,20	0,21	0,20
0,8	0,13	0,17	0,11	0,15	0,14
	0,54	0,54	0,12	0,13	0,13
0,9	0,12	0,18	0,11	0,16	0,14
	0,50	0,52	0,12	0,13	0,10

О высокой турбулентности и сложности потока в циклонной камере свидетельствуют и результаты его визуализации. Через прозрачную боковую стенку при  $\bar{L}_к = 11,88$  можно было наблюдать, как две струи с аэрозолем, истекающие из шлицев, перевивались около оси камеры друг с другом, образуя колеблющийся жгут радиусом 20–25 мм ( $\bar{r} = 0,25–0,35$ ). На наружном радиусе жгута концентрация силиконовых частичек была намного больше, чем на оси. Ось вращения жгута практически совпадала с осью камеры.

## ВЫВОДЫ

1. В циклонных камерах большой относительной длины, как и в сравнительно небольшой (близкой к единичной), общий уровень интенсивности пульсаций скорости значительно превышает наблюдаемый в камерах аналогичного назначения с незакрученным теплоносителем.

2. Величина пульсаций компонент скорости слабо снижается по мере продвижения закрученного потока к выходному отверстию камеры.

3. В сечении ввода потока в камеру (в области формирования его закрутки) распределения осредненных скоростей и среднеквадратичных пульсаций компонент вектора скорости имеют особый характер, отличный от других зон рабочего объема.

4. Радиальные распределения среднеквадратичных пульсаций тангенциальной и осевой компонент и относительных интенсивностей их пульсаций имеют в основной части рабочего объема циклонной камеры (за исключением зоны в окрестности входного сечения) единообразный качественный характер – практически постоянное значение в квазипотенциаль-

ной зоне, возрастание в приосевой «квазитвердой» зоне и в пристеночной области течения.

5. В достаточно длинных циклонных камерах наблюдается приближенная автомодельность не только осредненных, но и пульсационных скоростей относительно критерия Рейнольдса в рассмотренном диапазоне его изменения ( $Re_{вх} = 4,38 \cdot 10^4 - 27,32 \cdot 10^4$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Устименко, Б. П. Процессы турбулентного переноса во вращающихся течениях / Б. П. Устименко. – Алма-Ата: Наука, 1977. – 231 с.
2. Сабуров, Э. Н. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных нагревательных устройствах / Э. Н. Сабуров. – Л.: ЛГУ, 1982. – 240 с.
3. Сабуров, Э. Н. Аэродинамика циклонной камеры большой относительной длины / Э. Н. Сабуров, А. Н. Орехов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1995. – № 3–4. – С. 82–87.

Представлена кафедрой  
теплотехники

Поступила 15.05.2013

УДК 621.311.22

### **АНАЛИЗ ПРИВЛЕЧЕНИЯ ТЭЦ, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ТЕПЛОВОМУ ГРАФИКУ, К ПРОХОЖДЕНИЮ ПРОВАЛОВ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

**Кандидаты техн. наук, доценты НАЗАРОВ В. И., ТАРАСЕВИЧ Л. А.,  
магистрант НАЗАРОВ П. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

Структура генерирующих мощностей объединенной энергетической системы (ОЭС) Республики Беларусь весьма неблагоприятна для суточного и недельного регулирования, особенно в отопительный период, так как доля ТЭЦ в этой структуре составляет 50 %. В результате в настоящее время имеют место трудности, особенно с прохождением ночных и недельных минимумов, что хорошо видно из графиков нагрузки, приведенных на рис. 1, 2. Здесь диапазон регулирования в рабочий день  $\Delta N_{\text{рег}} = 2000$  МВт, а в выходной  $\Delta N_{\text{рег}} = 1600$  МВт. Причем коэффициент неравномерности графика нагрузки  $K_n$  составляет: для рабочего дня – 1,5, а для выходных – 1,4 при уровне загрузки оборудования  $K_y$  соответственно 0,67 и 0,71. Необходимо отметить, что базовая зона графика в отопительный период покрывается за счет ТЭЦ, так как подавляющее большинство ТЭЦ принимает весьма ограниченное участие в регулировании мощности в ОЭС.