

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. Эмдена¹ (Германия).

Основой измерительного комплекса экспериментальной установки являлся двухлучевой лазерный доплеровский анемометр (ЛДА) фирмы Dantec 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 $f_{вх} = 2 \cdot 13 \cdot 39$ мм². 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 $17,48$.

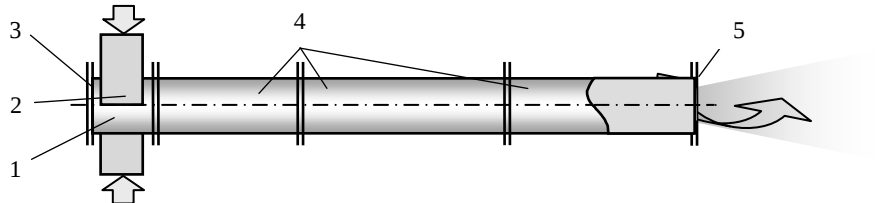


Рис. 1. Схема циклонной камеры

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

¹ 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_ϕ 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 $\bar{w}_\phi = w_\phi / w_{\text{вх}}$ и осевой $\bar{w}_z = w_z / w_{\text{вх}}$ компонент скорости подтвердили известные представления о потоке в относительно коротких циклонных камерах, особенности его вихревой структуры, выводы об его приближенной автомодельности относительно критерия Рейнольдса $Re_{\text{вх}} = w_{\text{вх}} D_k / \nu_{\text{вх}}$ ($w_{\text{вх}}$ – скорость потока во входных каналах; $\nu_{\text{вх}}$ – 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 $\bar{w}_\phi(\bar{r}) \approx \text{const}$ [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 $Re_{\text{вх}} \cdot 10^{-4}$ от 4,38 до 27,32 приведены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, распределения $\bar{w}_\phi$ в общем случае зависят от входного числа Рейнольдса; их значения незначительно увеличиваются с ростом последнего. Влияние $Re_{\text{вх}}$ 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 $Re_{\text{вх}}$. В целом полученные данные позволяют сделать заключение о приближенной автомо-

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

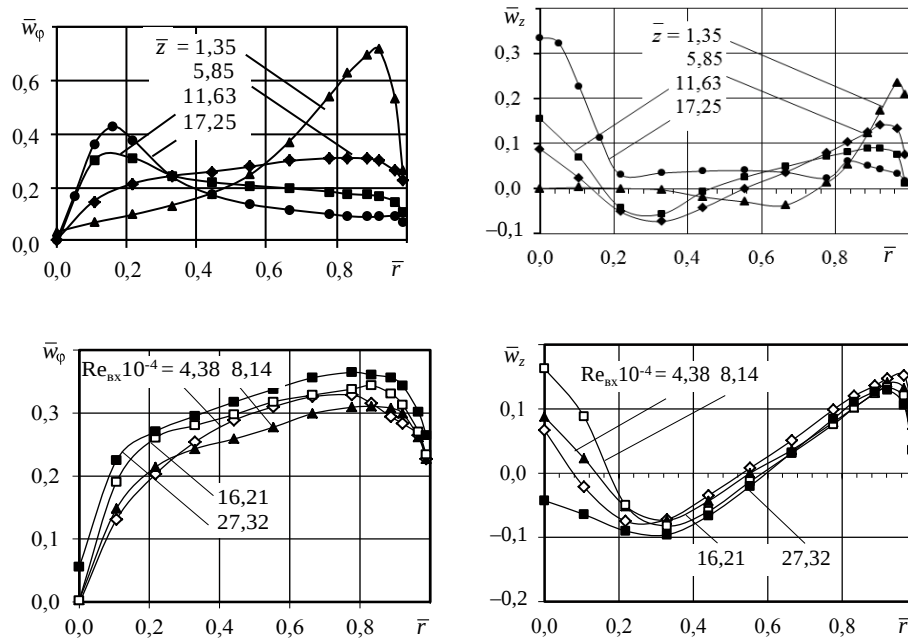


Рис. 2. Распределения $\bar{w}_\phi$ и $\bar{w}_z$ в циклонной камере с $\bar{L}_\kappa = 17,48$ при различных $\bar{z}$ и $Re_{\text{вх}}$

Распределения среднеквадратичных пульсаций тангенциальной и осевой компонент скорости $\sqrt{w_\phi'^2}$ и $\sqrt{w_z'^2}$ и составляющие относительной интенсивности их пульсаций $\epsilon_\phi = \sqrt{w_\phi'^2} / \bar{w}$ и $\epsilon_z = \sqrt{w_z'^2} / \bar{w}$ 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 ϵ_ϕ и ϵ_z вдоль радиуса камеры качественно одинаковы. На радиусах $\bar{r}$ от 0,2 до 0,9 значения ϵ_ϕ и ϵ_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 $\bar{w}_\phi$, $\bar{w}_z$, $\sqrt{w_\phi'^2}$ и $\sqrt{w_z'^2}$ имеют особый, отличный от других сечений рабочего объема, характер.

Рост ϵ_ϕ и ϵ_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 $\bar{w}'_\phi$ и $\bar{w}'_z$. 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.

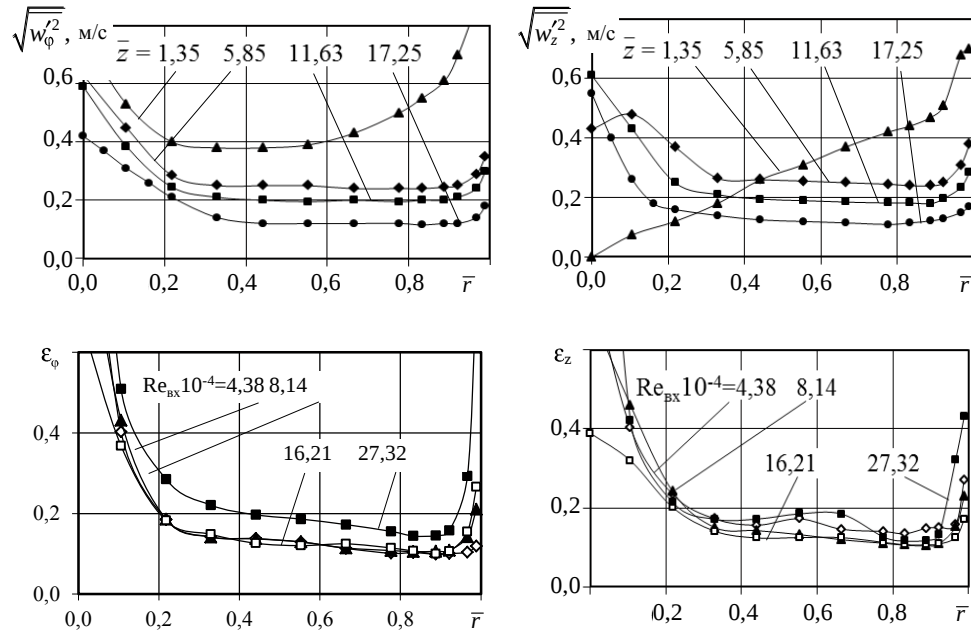


Рис. 3. Распределения среднеквадратичных пульсаций тангенциальной и осевой скоростей и относительные интенсивности их пульсаций в циклонной камере с $\bar{L}_k = 17,48$ при различных $\bar{z}$ и $Re_{вх}$

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

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{2} \bar{w}'_\phi{}^2 + \bar{w}'_z{}^2} / \sqrt{\bar{w}_\phi^2 + \bar{w}_z^2}.$$

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

Из табл. 2 и рис. 3 следует, что степень турбулентности ε , 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 «кваситвердой» зоне вращения, достигая при $\bar{r} = 0,1$ значений 0,4 и более.

Таблица 2

Значения турбулентных характеристик

$\bar{r}$	$\sqrt{w_{\phi}^{\prime 2}}$, м/с	$\sqrt{w_z^{\prime 2}}$, м/с	ε_{ϕ}	ε_z	ε
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 $\bar{L}_k = 11,88$ 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.