

УДК 536.244.45

С. И. ОСТАШЕВ, Э. Н. САБУРОВ

Архангельский государственный технический университет



Осташев Сергей Иванович родился в 1947 г., окончил в 1971 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры теплотехники Архангельского государственного технического университета. Имеет более 70 печатных трудов в области исследования 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 теплообмена в аппаратах различного технологического назначения.

О СОПРОТИВЛЕНИИ ЦИКЛОННЫХ ЭЛЛИПСНЫХ КАМЕР*

Приведены результаты экспериментального исследования сопротивления циклонных эллипсных камер и даны рекомендации для его расчета.

The results of experimental investigation on the resistance of cyclone ellipse chambers are given as well as the recommendations for its calculation.

Расчет сопротивления циклонных камер независимо от технологического назначения (сушильная установка, классификатор, топка и др.) является одной из важнейших задач их проектирования. Общее сопротивление камеры ΔP_n (ΔP_n – разность полных давлений на входе $P_{п.вх}$ и выходе $P_{п.вых}$) чаще всего определяют по суммарному коэффициенту сопротивления

$$\xi_{\Sigma} = \frac{2\Delta P_n}{\rho_{вх} v_{вх}^2} = \frac{2(P_{п.вх} - P_{п.вых})}{\rho_{вх} v_{вх}^2}, \quad (1)$$

где $\rho_{вх}$, $v_{вх}$ – плотность и средняя скорость потока во входных шлицах.

В обычных (круглых) циклонных камерах при вводе газа в рабочий объем через несколько шлицев одинакового размера $v_{вх}$ в каждом из них

* Работа выполнена по программе гранта 66Гр-98 в области фундаментальных исследований энергетики и электротехники.

практически одинакова, так как общее сопротивление циклонного устройства обычно является наибольшим в системе воздухообеспечения.

Иногда для анализа влияния различных факторов суммарный коэффициент сопротивления раскладывают на составляющие:

$$\zeta_{\text{ввх}} = \zeta_{\text{ввх}}^{\text{вх}} + \zeta_{\text{ввх}}^{\text{к}} + \zeta_{\text{ввх}}^{\text{ввх}}, \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{ввх}}^{\text{вх}}$ – входная составляющая коэффициента сопротивления,

$$\zeta_{\text{ввх}}^{\text{к}} = 2(P_{\text{п. вх}} - P_{\text{п1}}) / (\rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2);$$

$P_{\text{п. вх}}, P_{\text{п1}}$ – среднеинтегральные значения полного давления в шлицах и поперечном сечении камеры в плоскости ввода потока;

$\zeta_{\text{ввх}}^{\text{ввх}}$ – составляющая коэффициента сопротивления, учитывающая затраты напора на создание крутки и потери на внешнее и внутреннее трение (в эллипсных камерах к $\zeta_{\text{ввх}}^{\text{к}}$ следует отнести еще и потери напора, связанные с изменением радиуса кривизны боковой поверхности, особенно в вершинах эллипса на оси сжатия),

$$\zeta_{\text{ввх}}^{\text{к}} = 2(P_{\text{п2}} - P_{\text{п3}}) / (\rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2);$$

$P_{\text{п2}}, P_{\text{п3}}$ – среднеинтегральные значения полного давления в сечениях вблизи выходного и глухого торцов (на границах зон торцевых перетечек);

$\zeta_{\text{ввх}}^{\text{ввх}}$ – выходная составляющая коэффициента сопротивления,

$$\zeta_{\text{ввх}}^{\text{ввх}} = 2(P_{\text{п2}} - P_{\text{п. ввх}}) / (\rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2).$$

Конечно, такое разделение $\zeta_{\text{ввх}}$ весьма условно, однако в ряде случаев оказывается весьма полезным для качественной оценки изменения общего сопротивления.

Существуют приближенные аналитические методы определения сопротивления циклонных камер. Основные из них рассмотрены в работе [7]. Метод определения $\Delta P_{\text{п}}$ и $\zeta_{\text{ввх}}$, основанный на упрощенных аппроксимациях распределения тангенциальной составляющей скорости в рабочем объеме, разработан на кафедре теплотехники АГТУ [2, 3]. Однако для циклонных камер оригинальных конструкций, в том числе и эллипсных, основным методом нахождения $\Delta P_{\text{п}}$ и $\zeta_{\text{ввх}}$ пока все еще остается эксперимент.

Опыты выполнены нами на эллипсных циклонных камерах с двухсторонним тангенциальным вводом воздушного потока.

На рис. 1 показано расположение шлица на боковой поверхности одной из циклонных эллипсных камер и местоположение точек замера статического давления в нем. Для определения

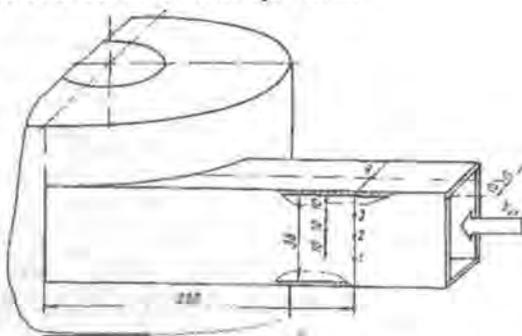


Рис. 1. Схема шлица циклонной эллипсной камеры

* В работе принимал участие инженер Ю. А. Власов.

статического давления в точках 1–4 стенки шлица имели отверстия диаметром 0,5 мм. Ось отверстий нормальна к поверхности стенки, кромки тщательно зачищены для исключения возможных выступов и заусенцев. Местоположение точек замера статического давления в обоих шлицах одинаковое. Воздух в шлицы подавали по индивидуальным трубопроводам, что позволяло иметь данные о его расходе через каждый из них. Площадь поперечного сечения шлица $f_{вх}$ составляла $38 \times 40 \text{ мм}^2$. Оси их расположены в одной поперечной плоскости. Специальными вкладышами, выполненными из текстолита, изменяли площадь входа шлицев. Их относительная суммарная площадь входа $\bar{f}_{вх} = 4 f_{вх} / \pi D_k^2$ (D_k – условный эквивалентный диаметр циклонной камеры, имеющей ту же площадь поперечного сечения, что и эллипсная) в опытах составляла $(2,00 \dots 4,77) \cdot 10^{-2}$. Газы из камеры выводили через соосное с рабочим отверстием отверстие, относительный диаметр которого $\bar{d}_{вых}$ ($\bar{d}_{вых} = d_{вых} / D_k$) варьировали от 0,2 до 0,7.

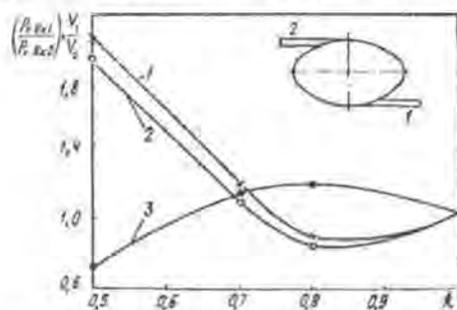


Рис. 2. Изменение соотношений избыточного статического давления в шлицах (1, 2) и расхода газа через них (3) в зависимости от коэффициента сжатия циклонной эллипсной камеры:

$$1 - (p_{c,вх1} / p_{c,вх2})_2; \quad 2 - (p_{c,вх1} / p_{c,вх2})_{ср}; \\ 3 - V_1 / V_2$$

1 — $(p_{c,вх1} / p_{c,вх2})_2$; 2 — $(p_{c,вх1} / p_{c,вх2})_{ср}$; 3 — V_1 / V_2

ковой поверхности шлицев ($p_{c,вх1} / p_{c,вх2}$) в зависимости от k . На рис. 2 эти данные представлены в двух вариантах обработки: по значениям избыточного статического давления в точке замера 2 на рис. 1 ($p_{c,вх1} / p_{c,вх2}$) и по средним значениям $p_{c,вх1}$ и $p_{c,вх2}$ в точках 1–4 ($p_{c,вх1} / p_{c,вх2}$)_{ср}. Изменение обеих характеристик полностью определяется особенностями аэродинамики циклонной эллипсной камеры, рассмотренными в работах [1, 4]. К ним прежде всего следует отнести смещение оси потока с оси рабочего объема и неравномерное истечение газа по периметру выходного отверстия. Можно предположить, что неравномерность раздачи воздуха по шлицам в эллипсных камерах, кроме k , зависит и от ее безразмерных геометрических характеристик: от координаты ввода газа по периметру рабочего объема $x_{вх} = x_{вх} / a$, диаметра выходного отверстия камеры $\bar{d}_{вых}$, площади входа $f_{вх}$ и

На рис. 2 показано изменение соотношения расходов воздуха через шлицы 1 и 2 (V_1 / V_2) в зависимости от коэффициента сжатия эллипса $k = b / a$ (a, b – полуоси эллипса). Из рис. 2 видно, что изменение соотношения V_1 / V_2 (кривая 3) в зависимости от k не монотонно, максимум ($V_1 / V_2 = 1,14$) наблюдается при $k \approx 0,8$. Равная раздача газа по шлицам имеет место в круглой ($k = 1,0$) и эллипсной ($k = 0,625$) камерах. В других случаях распределение воздуха по шлицам эллипсных камер неравномерное. Это подтверждается и изменением соотношения значений избыточного статического давления на бо-

длины камеры $\bar{L}_k = L_k / D_k$. Для выяснения влияния этих и других параметров на неравномерность раздачи газа по шлицам, вероятно, потребуется проведение специального исследования. Поэтому в данной работе коэффициент сопротивления $\zeta_{вх}$ и его составляющие определяли по общему расходу и среднеарифметическим значениям $p_{с.вх}$ для шлицев 1 и 2.

Значение коэффициента $\zeta_{вх}$ в значительной степени зависит от местоположения шлицев на образующей эллипсной камеры (рис. 3). В рассмотренных в работе вариантах подвода воздуха $x_{вх}$ соответственно составляет $-0,6; 0,0; 0,6; 1,0$ (варианты 1 - 4). Максимальное значение $\zeta_{вх}$ наблюдается при $x_{вх} \approx 0,1$, минимальное - при $x_{вх}$, близком 1. Входная составляющая $\zeta_{вх}^{вх}$ в процентах от $\zeta_{вх}$ для рассмотренных вариантов ввода воздуха соответственно равна 53; 19; 16; 44, выходная $\zeta_{вх}^{вых}$ - 37, 77, 83, 41. При упорядоченном течении (варианты 2 и 3), как и в обычных циклонных круглых камерах, выходная составляющая является наибольшей и лишь при наименее рациональном вводе воздуха ($x_{вх} \approx 1,0$) может быть несколько меньше. В варианте 2 площадь выхода потока из камеры примерно в два раза больше, чем в варианте 4. Величина входных потерь определяется возможностями расширения струи на входе в камеру и величиной статического давления в этой зоне. Наименьшие потери напора на входе в камеру имеют место при $x_{вх} \approx 0,4$. Потери в рабочем объеме камеры являются минимальными из всех составляющих общих потерь. Представленные на рис. 3 данные относятся к камере со следующими параметрами: $k = 0,75$; $\bar{L}_k = 2,11$; $f_{вх} = 4,84 \cdot 10^{-2}$; $\bar{d}_{вых} = 0,4$. Однако отмеченные особенности изменения составляющих $\zeta_{вх}$ в зависимости от $x_{вх}$, вероятно, сохраняются и при других их значениях.

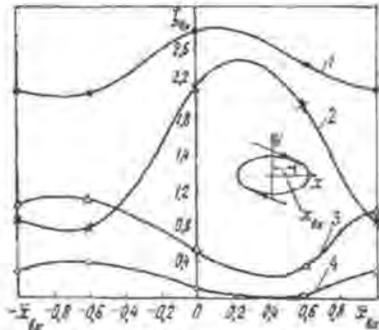


Рис. 3. Изменение суммарного коэффициента сопротивления камеры (1) и его составляющих (2 - 4) в зависимости от местоположения входных шлицев: 1 - $\zeta_{вх}$; 2 - $\zeta_{вх}^{вх}$; 3 - $\zeta_{вх}^{вых}$; 4 - $\zeta_{вх}^k$

На рис. 4 приведены опытные значения $\zeta_{вх}$ и его составляющих для камеры с $\bar{L}_k = 1,65$, $f_{вх} = 4,77 \cdot 10^{-2}$, $\bar{d}_{вых} = 0,4$ при различных значениях коэффициента сжатия эллипса k . Представленные данные подтверждают ранее установленную [4] особенность аэродинамики циклонной эллипсной камеры: циклонным (в обычном понимании) является течение в ней лишь при $0,7 < k < 1$. При $k < 0,7$ активной остается только зона течения у боковой поверхности рабочего объема, поток приобретает свойства струи, распространяющейся у поверхности с переменной по длине траектории кривизной. В этом случае коэффициент $\zeta_{вх}$ и его составляющие имеют сравнительно небольшие значения и практически не зависят от k . При циклонном движении в камере зависимость $\zeta_{вх}(k)$ не монотонна, а выходная составляющая коэф-

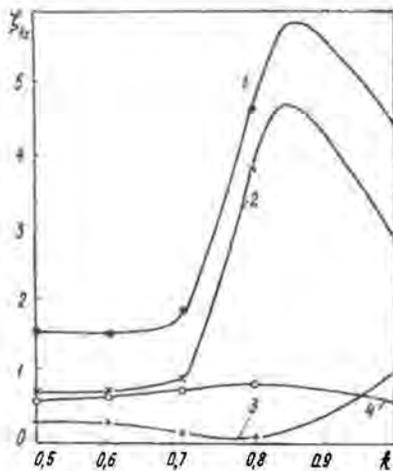


Рис. 4. Суммарный коэффициент сопротивления (1) и его составляющие (2-4) при различных значениях коэффициента сжатия эллипсной циклонной камеры (см. обозначения на рис. 3)

фициента $\zeta_{\text{вх}}$ является максимальной. Максимум $\zeta_{\text{вх}}$ и его выходной составляющей наблюдается при $k \approx 0,85$. Зависимость $\zeta_{\text{вх}}(k)$ имеет минимум при $k = 0,75$, а $\zeta_{\text{вх}}^k(k)$ – максимум при $k = 0,8$. Полученный характер изменения составляющей $\zeta_{\text{вх}}^k$ позволяет отметить, что на ее величину и соотношение с $\zeta_{\text{вх}}^{\text{вх}}$ существенное влияние оказывают потери напора, связанные с изменением радиуса кривизны боковой поверхности камеры по траектории движения потока.

Максимальное значение $\zeta_{\text{вх}}$ при одних и тех же значениях \bar{L}_k , $\bar{f}_{\text{вх}}$, $\bar{d}_{\text{вых}}$ и эквивалентном D_k зависит от коэффициента сопротивления круглой камеры $(\zeta_{\text{вх}})_{k=1}$. Его можно вычислить по формуле

$$(\zeta_{\text{вх}})^{\text{max}} = (\zeta_{\text{вх}})_{k=1} \left(0,79 + \frac{0,62}{\bar{f}_{\text{вых}}^{0,22}} \right) [1 + 4,64 (\bar{f}_{\text{вх}} - 0,02)^{0,91}]. \quad (3)$$

Наибольшие значения $\zeta_{\text{вх}}^{\text{max}}$ наблюдаются при

$$k = k_{\text{max}} = [0,89 - 0,051 (\bar{d}_{\text{вых}})^{1,61}] [1 + 0,26 (\bar{f}_{\text{вх}} - 0,02)^{0,33}]. \quad (4)$$

В таблице приведены значения $\zeta_{\text{вх}}$ для камеры с $L_k = 1,5$.

$\bar{d}_{\text{вых}}$	$\bar{f}_{\text{вх}} \cdot 10^2$	Коэффициент сопротивления при различных значениях k			
		0,5	0,7	0,8	1,0
0,2	2,00	2,58	3,90	6,60	4,80
0,4	2,00	2,09	2,44	3,22	2,45
0,6	2,00	2,06	2,19	2,51	1,88
0,7	2,00	2,06	2,13	2,48	1,75
0,6	3,00	1,91	2,16	2,53	2,37
0,6	4,77	1,40	1,93	2,41	3,15

Суммарный коэффициент сопротивления небольших по длине циклонных эллипсных камер при $0,7 < k \leq 1,0$ имеющих близкий к рациональному двухсторонний ввод газов, может быть определен по следующему эмпирическому уравнению:

$$\zeta_{\text{сж}} = \zeta_{\text{сж}}^{\text{max}} \left[\frac{100 \bar{d}_{\text{вх}} (k/k_{\text{max}})}{(100 \bar{d}_{\text{вх}} - 1)(k/k_{\text{max}})^m} \right]^n, \quad (5)$$

где $m = 37,6 \bar{d}_{\text{вх}}^{0,46}$,
 $n = 0,39 \bar{d}_{\text{вх}}^{-1,29}$.

Формула (5) получена при условии автомодельности течения потока в циклонной эллипсной камере, которая действительно имеет место в широком диапазоне геометрических и режимных характеристик камеры с $f_{\text{вх}} = 2 \cdot 10^{-2}$ (рис. 5). При этом число Рейнольдса $Re = v_{\text{вх}} D_k / \nu_{\text{вх}}$ (где $\nu_{\text{вх}}$ – коэффициент кинематической вязкости при параметрах потока в шлицах). При больших k в эллипсных, так же как и в круглых камерах [5, 6], может иметь место небольшая неавтомодельность течения (рис. 5), которой в технических расчетах можно пренебречь.

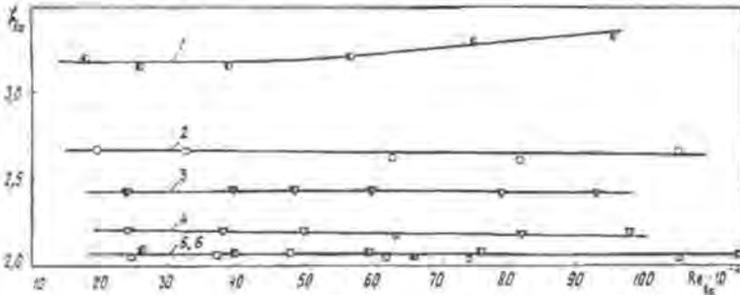


Рис. 5. Зависимость коэффициента сопротивления циклонной эллипсной камеры от входного числа Рейнольдса при различных значениях k и $\bar{d}_{\text{вх}}$: 1 – $k = 0,8$ и $\bar{d}_{\text{вх}} = 0,4$; 2 – $0,8$ и $0,6$; 3 – $0,6$ и $0,4$; 4 – $0,6$ и $0,6$; 5 – $0,5$ и $0,4$; 6 – $0,5$ и $0,6$

Выводы

1. Течение в циклонной эллипсной камере практически автомодельно.
2. Предложенная в работе формула для расчета суммарного коэффициента сопротивления циклонных эллипсных камер, учитывающая влияние коэффициента сжатия, относительной площади входа потока и диаметра выходного отверстия, может быть рекомендована для практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Власов Ю.А., Осташев С.И., Сабуров Э.Н. Влияние сжатия поперечного сечения на аэродинамику циклонной эллипсной камеры // Актуальные проблемы рационального использования природных и энергетических ресурсов Европейского севера: Сб. науч. тр. – АЛТИ, 1994. – С. 193 – 200. [2]. Карпов С.В., Сабуров Э.Н. Расчет аэродинамического сопротивления и выбор оптимальных параметров циклонов // Химия и хим. технология. – 1990. – Т. 33, вып. 9. – С. 103 – 107. [3]. Карпов С.В., Сабуров Э.Н. Расчет аэродинамического сопротивления циклонов // Актуальные проблемы комплексного использования лесных ресур-

сов на Европейском Севере: Сб. науч. тр. - АЛТИ, 1989. - С. 167 - 171. [4]. Сабуров Э.Н., Власов Ю.А., Осташев С.И. Экспериментальное исследование аэродинамики циклонной эллипсной камеры // Лесн. журн. - 1993. - № 1. - С. 123 - 129. - (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Сабуров Э.Н., Карпов С.В. О некоторых особенностях аэродинамики циклонных камер в неавтономной области течения потока // Энергетика. - 1974. - № 11. - С. 60 - 65. - (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Сабуров Э.Н., Карпов С.В. О сопротивлении циклонных камер в неавтономной области течения потока // Инж.-физ. журн. - 1975. - Т. 28. - С. 354 - 355. [7]. Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Осташев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. - 276 с.
