ления электроприводами / [В.Б. Клепников и др.] // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 2 – 6.

4. *Кожевников, А.В.* Диагностирование приводов прокатных станов с помощью нейросетевой оценки / А.В. Кожевников // Металлургические процессы и оборудование. – № 3(33). – 2013. – С. 54 – 60.

5. *Макаров, И.М.* Интеллектуальные системы автоматического управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин. – М., 2001.

6. *Медведев, В.С.* Нейронные сети. MATLAB6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – М., 2002.

7. *Оссовский, С.* Нейронные сети для обработки информации / С. Оссовский; Пер. с польского И.Д. Рудинского. – М., 2002.

8. *Терехов, В.А.* Нейросетевые системы управления / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М., 2002.

9. *Терехов, В.М.* Системы управления электроприводов / В.М. Терехов, О.И. Осипов. – М., 2006.

10. *Хайкин, С.* Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М., 2006.

11. *Чернодуб, А.Н.* Обзор методов нейроуправления / А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба. – URL: http://ailen.org/.

УДК 533.697

М.Л. Зайцева, Н.И. Корнилов, Э.Н. Сабуров

СОПРОТИВЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНО ДЛИННЫХ ЦИКЛОННЫХ КАМЕР ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВВОДА И ВЫВОДА ГАЗОВ

Установлены характерные особенности зависимости суммарного коэффициента сопротивления относительно длинных циклонных камер в приближенно автомодельной области течения от величины относительного диаметра выходного отверстия и относительной площади входа камеры. Предложено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента сопротивления относительно длинных циклонных камер.

Относительно длинная циклонная камера, суммарный коэффициент сопротивления, площадь входа, диаметр выходного отверстия, число Рейнольдса.

The characteristic features of the dependence of the summary resistance coefficient of relatively long vortex chambers in approximately self-flow region from the relative diameter of the orifice and the relative area of the camera input are determined. An empirical equation to calculate the resistance of relatively long vortex chambers is proposed.

Relatively long vortex chamber, total coefficient of resistance, entrance area, the outlet diameter, the Reynolds number.

Сопротивление циклонной камеры любого технологического назначения в значительной степени определяет ее энерготехнологическое совершенство [1], [2]. Поэтому разработка рекомендаций по расчету их сопротивления представляет большой теоретический и практический интерес. Выполненные в настоящее время экспериментальные работы, связанные с определением сопротивления циклонных камер, в основном относятся к камерам сравнительно небольшой относительной длины $\overline{L_к} = L_к / D_к$ ($L_к$ – длина, $D_к$ – диаметр рабочего объема циклонной камеры) равной 0,8…2. Число исследований сопротивления циклонных камер большой относительной длины ($L_к > 2$) значительно меньше. Однако такие камеры имеют широкое использование в химической и целлюлозно-бумажной промышленности в качестве печей, рекуператоров, теплообменников, сепараторов и других устройств. Исследование, результаты которого приведены в настоящей работе, выполнено на экспериментальном стенде с циклонной камерой, имевшей относительную длину 12,75. Диаметр ее рабочего объема составлял 160 мм. Его поверхность была технически гладкой. Относительная площадь входа камеры $\overline{f_{вх}} = 4 f_{вх} / \pi D_к$ ($f_{вх}$ – суммарная площадь тангенциальных шлицев) варьировалась в диапазоне от 0,04 до 0,21. Относительный диаметр выходного отверстия $\overline{d_{вх}} = d_{вх} / D_к$ ($d_{вх}$ – размерный диаметр соосного с рабочим объемом выходного отверстия камеры) − от 0,2 до 1,0.

На рис. 1 представлены полученные в опытах при различных значениях параметра $\overline{d}_{вх}$ и числах Рейнольдса ($\mathrm{Re}_{вх} = \upsilon_{вх} D_к / \nu$, где ν – кинематический коэффициент вязкости потока при входных условиях) значения суммарного коэффициента сопротивления рассматриваемой камеры:

$$\zeta_{вх} = \frac{2\Delta P_п}{\rho \upsilon_{вх}^2},$$

где $\Delta P_п$ − перепад полного давления в камере – разность полных давлений в шлицах и на выходе из камеры; ρ – плотность потока на входе в камеру (в шлицах); $\upsilon_{вх}$ – среднерасходная скорость потока в шлицах.

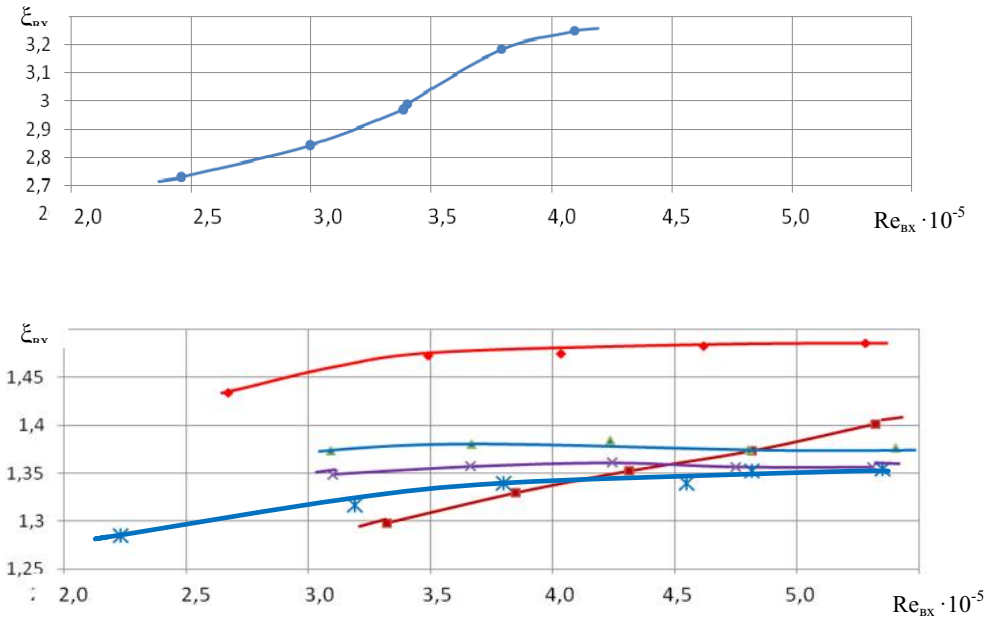


Рис. 1. Коэффициент сопротивления циклонной камеры при различных значениях числа $Re_{вх}$ и параметра $\overline{d}_{вх}$.
Обозначения: ● – $\overline{d}_{вх}$ = 0,2; ◆ – 0,43; ■ – 0,59; ▲ – 0,74; ╳ – 0,85; ✳ – 1

В представленном виде коэффициент $\xi_{вх}$ характеризует суммарные затраты напора в циклонной камере на закрутку потока, преодоление сопротивления входа, связанное с расширением выходящей из шлицев струи, ее взаимодействием с уже вращающимися газами и боковой поверхностью камеры, преодолением действия внутренних и внешних сил трения и сопротивление вывода газов из камеры через выходное отверстие. Причем последняя составляющая в относительно коротких камерах обычно имеет наибольшую величину и поэтому определяет главным образом общий характер изменения $\xi_{вх}$ в зависимости от ее геометрических и режимных характеристик. Представленные на рис. 1 данные позволяют отметить, что в относительно длинных циклонных камерах значения коэффициента сопротивления ниже, чем в относительно коротких при прочих близких условиях. Последнее связано главным образом с тем, что в них ниже уровень вращательных скоростей потока.

Как и в относительно коротких камерах, в длинных наблюдается явление приближенной автомодельности течения, характеризуемое практической независимостью коэффициента сопротивления $\xi_{вх}$ от входного числа Рейнольдса. Начало области автомодельного (точнее приближено автомодельного течения) определяется числом $Re_{вх}^{авт}$, величина которого в общем случае зависит от $\overline{d}_{вых}$.

По характеру изменения $\xi_{вх}$ в зависимости от параметра $\overline{d}_{вых}$ и его величине (см. рис. 2) можно разделить полученные данные на две области. Первая из них наблюдается при $0{,}2 \le \overline{d}_{вых} < 0{,}45$, а вторая – при $0{,}45 \le \overline{d}_{вых} \le 1$. В первой области $\xi_{вх}$ имеют более высокие значения и существенно различаются по величине в зависимости от $\overline{d}_{вых}$, монотонно повышаясь с уменьшением последнего. Число $Re_{вх}^{авт}$ в ней имеет более высокие значения. Во второй области (области больших значений $\overline{d}_{вых}$) $\xi_{вх}$ имеет существенно меньшие значения и изменяется в зависимости от $\overline{d}_{вых}$ в сравнительно узком диапазоне (в рассматриваемом случае примерно от 1,25 до 1,4). При полностью открытом выходном торце камеры ($\overline{d}_{вых} = 1$) $\xi_{вх}$ принимает промежуточное значение, равное 1,3.

Функция $\xi_{вх}(Re_{вх})$ при $\overline{d}_{вых}$ =0,59 (см. рис. 1) носит особый характер. При этом при $Re_{вх} > 4 \cdot 10^5$ в зависимости $\xi_{вх}$ от $\overline{d}_{вых}$ появляется небольшой максимум, а при $Re_{вх} < 4 \cdot 10^5$ – минимум. Величина экстремальных значений $\xi_{вх}$ зависит от величины $\overline{d}_{вых}$. Отмеченный характер функции $\xi_{вх}(\overline{d}_{вых}, Re_{вх})$ подтверждается данными представленными на рис. 1 и 2, и связан с изменением особенностей истечения газов из камеры при различных степенях диафрагмированности ее рабочего объема. Условия истечения газов, в свою очередь, определяются взаимодействием в области выходного отверстия выходного вихря, приторцевого радиального потока при его существовании на кольцевой поверхности выходного торца или просто радиального поворота пристенного прямого вихря при отсутствии радиального приторцевого потока, распределением тангенциальной и полной скоростей потока в рабочем объеме, существованием обратного приосевого течения (или практически застойной зоны) на срезе выходного отверстия, особенностей истечения газов в окружающую среду. Конечно, в перспективе все эти факторы требуют специального рассмотрения и анализа. Необходима

оценка выходной составляющей суммарного коэффициента сопротивления относительно длинных циклонных камер.

На рис. 3 и 4 представлены результаты исследования влияния на $\xi_{вх}$ относительной площади входа камеры. Из представленных данных видно, что сопротивление камеры повышается с увеличением площади входа, причем интенсивность роста зависит от диапазона рассматриваемых значений $\overline{f}_{вх}$.

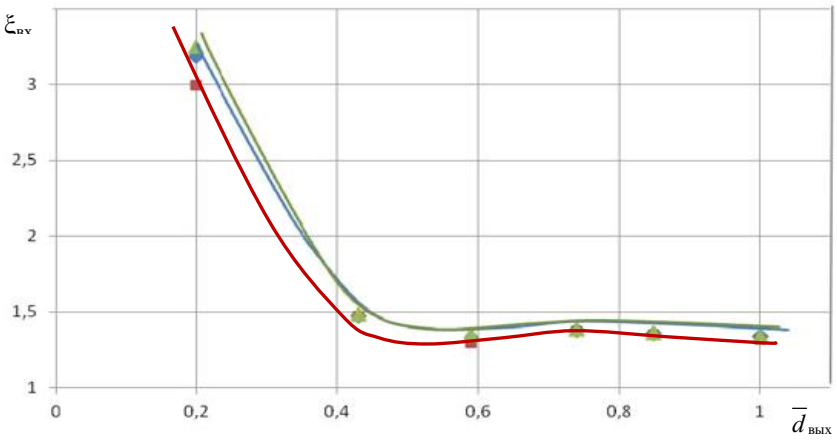


Рис. 2. Зависимость коэффициента сопротивления камеры от относительного диаметра выходного отверстия.
Обозначения: ■ – $Re_{вх} \cdot 10^{-5} = 3{,}2$; ◆ – 3,8; ▲ – 4,3

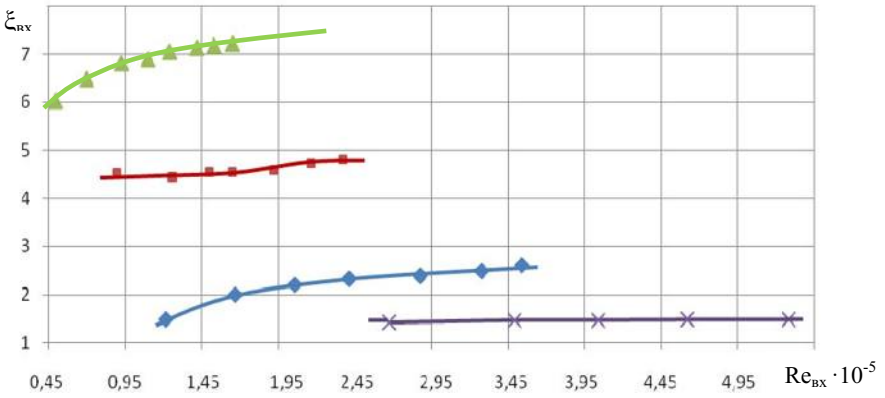


Рис. 3. Коэффициент сопротивления циклонной камеры при различных значениях $Re_{вх}$ и параметра $\overline{f}_{вх}$.
Обозначения: ▲ – $\overline{f}_{вх} = 0{,}21$; ■ – 0,12; ◆ – 0,08; ✕ – 0,04

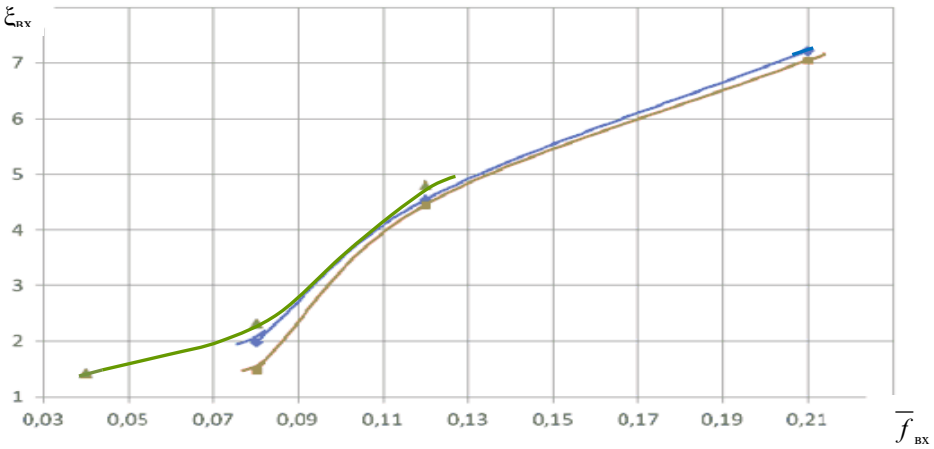


Рис. 4. Изменение коэффициента сопротивления циклонной камеры от относительной площади входа.
Обозначения: ■ – $Re_{вх} \cdot 10^{-5} = 1{,}25$; ◆ – 1,65; ▲ – 2,5

Полученные в работе данные позволяют для области приближенной автомодельности рекомендовать для расчета коэффициента сопротивления циклонных камер большой относительной длины уравнение:

$$\zeta_{\text{вх}}\left(1{,}05-\frac{0{,}033\ln\overline{d}_{\text{вх}}}{\overline{d}^{2}_{\text{вх}}}\right)\times$$

$$\times\left(-14-3745\overline{f}_{\text{вх}}-1005\overline{f}_{\text{вх}}\ln\overline{f}_{\text{вх}}-6930\overline{f}^{2}_{\text{вх}}\ln\overline{f}_{\text{вх}}\right).$$

Выводы.

1. Установлены характерные особенности зависимости суммарного коэффициента сопротивления относительно длинных циклонных камер в приближенно автомодельной области течения от величины относительного диаметра выходного отверстия и относительной площади входа камеры.

2. В результате обобщения опытных данных предложено эмпирическое уравнение для расчета коэффициента сопротивления относительно длинных циклонных камер, которое может быть использовано в инженерной практике при $\overline{d}_{\text{вых}} = 0{,}2\ldots1{,}0$; $\overline{f}_{\text{вх}} = 0{,}04\ldots0{,}21$; $\text{Re}_{\text{вх}} = 3{,}5\cdot10^{5}\ldots5{,}0\cdot10^{5}$.

Литература

1. *Зайцева, М.Л.* Исследование конвективного теплообмена в относительно длинных циклонных камерах / М.Л. Зайцева, А.Н. Орехов, Э.Н. Сабуров // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева (20 – 24 мая 2013 г., г. Орехово-Зуево). – М., 2013. – С. 148 – 151.

2. *Сабуров, Э.Н.* Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э.Н. Сабуров. – Архангельск, 1995.

УДК 621.3.036.273

М.Л. Зайцева, А.Н. Орехов, Э.Н. Сабуров

ТЕПЛООТДАЧА НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИКЛОННЫХ КАМЕР БОЛЬШОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ С ВВОДОМ ГАЗОВ ВБЛИЗИ ВЫХОДНОГО ТОРЦА

Получены уравнения, позволяющие рассчитать локальный коэффициент теплоотдачи на боковой поверхности рабочего объема относительно длинных циклонных камер с вводом газов вблизи выходного торца. Выявлено влияние шероховатости боковой поверхности камеры на интенсификацию теплообмена.

Циклонная камера, теплоотдача, коэффициент теплоотдачи, шероховатость, конвекция.

The equations to calculate the local heat transfer coefficient on the side of the working volume of relatively long cyclone chambers with the introduction of gases near the output end are obtained. The influence of the roughness of the side of the camera on the intensification of heat transfer is identified.

Vortex chamber, heat transfer, coefficient of heat transfer, roughness, convection.

Циклонные камеры нашли широкое промышленное применение в качестве различных энерготехнологических установок. Высокие технико-экономические характеристики, конструктивная простота, а также высокая интенсивность конвективного тепломассообмена определяют актуальность работ, посвященных исследованиям теплоотдачи на боковой поверхности их рабочего объема.

Опыты выполнены на экспериментальном стенде, основным элементом которого являлась циклонная камера (рис. 1) с внутренним диаметром $D_{\text{к}} = 2R_{\text{к}} =$ = 160 мм. Передвижные секции рабочего объема камеры позволяли изменять ее относительную длину $\overline{L}_{\text{к}} = L_{\text{к}}/D_{\text{к}}$. В опытах $\overline{L}_{\text{к}}$ равнялась 2,25; 3,75; 6,75; 9,75 и 12,75. Подвод воздуха в закручиватель камеры осуществляли тангенциально с диаметрально противоположных сторон двумя шлицами (входными каналами), имеющими размеры поперечного сечения 24×84 мм. Оси шлицев находились в одной поперечной плоскости на относительном расстоянии от торцов закручивателя, равном $0{,}5D_{\text{к}}$. Относительная высота шлицев $\overline{h}_{\text{вх}} = h_{\text{вх}}/D_{\text{к}}$ составляла 0,075. Вывод воздуха из камеры производили через отверстие в ближайшем от закручивателя торце рабочего объема. Относительный диаметр соосного с рабочим объемом выходного отверстия $\overline{d}_{\text{вых}} = d_{\text{вых}}/D_{\text{к}}$ в опытах составлял 0,43.

Шероховатость на боковой поверхности секций рабочего объема циклонной камеры создавали накаткой на токарном станке. При этом изменяли шаг накатки s (расстояние между выступами шероховатости) и высоту выступов шероховатости k. В относительном виде: высота выступов $\overline{k} = k / R_{\text{к}}$, шаг накатки $\overline{s} = s / R_{\text{к}}$. Увеличение площади поверхности теплоотдачи от накатки определялось параметром

$$\overline{S} = S_{\text{ш}} / S_{\text{гл}},$$