УДК 533.697

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

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ АЭРОДИНАМИКИ ЦИКЛОННЫХ КАМЕР БОЛЬШОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ. Руководитель проекта – профессор Э.Н. Сабуров

Установлены новые особенности формирования потока в рабочем объеме относительно длинных циклонных камер. Получены расчетные соотношения для основных аэродинамических характеристик относительно длинных циклонных камер в диапазоне $\overline{L}_к = 6,25...18,25$.

Циклонная камера, аэродинамика, безразмерная тангенциальная составляющая скорости потока, ядро потока, длина камеры.

New features of flow formation in the working volume of relatively long cyclone chambers are found. The calculated ratios for the basic aerodynamic characteristics of relatively long cyclone chambers in the range $\overline{L}_к = 6,25...18,25$ are obtained.

Cyclone chamber, aerodynamic, dimensionless tangential component of the velocity of flow, core of the flow, length of the camera.

В настоящее время выполнено большое количество исследований аэродинамики циклонно-вихревых камер сравнительно небольшой относительной длины $\overline{L}_к = L_к/D_к$ ($L_к$, $D_к = 2\ R_к$ – длина и диаметр рабочего объема камеры) равной 1…2. Связано это с тем, что наибольшее распространение в промышленности они получили первоначально в качестве циклонных топок и энерготехнологических устройств [2], [5] – [7]. По мере использования циклонно-вихревых камер для других целей, а также для повышения их производительности появилась необходимость применения циклонных камер с большей относительной длиной.

Результаты первого систематического исследования аэродинамики циклонной камеры в широком диапазоне изменения $\overline{L}_к$ ($\overline{L}_к = 1…11,5$) выполнено в работе [4]. Камера имела диаметр рабочего объема $D_к = 93$ мм. Ввод газа в камеру производился двумя соплами с диаметром 15 мм, расположенными с диаметрально противоположных сторон в одной поперечной плоскости, отстоящей от глухого торца рабочего объема на расстоянии $\overline{z} = z/D_к = 0,5$, где z – продольная координата, совпадающая с осью рабочего объема. Относительная площадь входа $\overline{f}_{вх} = 4f_{вх} / \pi D^2_к$, где $f_{вх}$ – суммарная площадь сопел, равнялась 0,052. Вывод газов производился через центральное выходное отверстие в противоположном торце рабочего объема, относительный диаметр отверстия $\overline{d}_{вых} = d_{вых} / D_к = 0,4$. Поля скоростей в рабочем объеме камеры исследовались трехканальным цилиндрическим зондом с диаметром насадка 2,6 мм по обычной методике. Камера имела технически гладкую поверхность рабочего объема.

Выполненные исследования показали, что аэродинамика относительно длинных камер имеет определенные отличия от коротких. Уровень относительных вращательных (тангенциальных) скоростей потока $\overline{w}_φ = w_φ / v_{вх}$ ($w_φ$ – тангенциальная компонента полной скорости потока, $v_{вх}$ – средняя скорость потока во входных каналах-соплах) в рабочем объеме длинных камер ниже, чем в коротких и убывает с ростом $\overline{L}_к$. Соответственно, ниже и коэффициент сопротивления камеры $\xi_{вх} = 2\ \Delta P_п / \rho_{вх}\ v^2_{вх}$ ($\Delta P_п$ – перепад полного давления в камере, $\rho_{вх}$ – плотность потока во входных каналах). Ниже при этом и аэродинамическая эффективность камеры, определяемая коэффициентом сопротивления вида $\xi_{φm} = 2\ \Delta P_п / \rho_{φm}\ w^2_{φm}$ ($w_{φm}$, $\rho_{φm}$ – значения $w_φ$ и ρ на радиусе $r_{φm}$, где достигается максимальное значение тангенциальной скорости потока) [4]. В длинных камерах сложнее схема осевых и радиальных потоков.

Однако полученные данные не позволили полностью ответить на все вопросы, возникающие при проектировании относительно длинных камер. Это вызвало необходимость расширения диапазона значений $\overline{L}_к$. Данная задача была поставлена в настоящей работе, которую следует рассматривать как продолжение раннее выполненных исследований.

Опыты проводились на экспериментальном стенде, основным элементом которого являлась технически гладкостенная циклонная камера с диаметром рабочего объема $D_к = 160$ мм. Передвижные секции рабочего объема камеры позволяли изменять ее относительную длину. В опытах $\overline{L}_к$ равнялась 6,25; 11,25 и 18,25. 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 $0,5D_к$. Относительная высота шлицев $\overline{h}_{вх} = h_{вх} / D_к = 0,075$, относи-

тельная площадь входа $\bar{f}_{вх} = 0{,}04$. Вывод воздуха из камеры производили через плоский пережим, установленный с противоположном от закручивателя торце рабочего объема. Относительный диаметр соосного с рабочим объемом выходного отверстия $\bar{d}_{вых} = 0{,}43$.

Воздух в камеру подавали воздуходувкой В10/1250 номинальной производительностью 10000 м^3/ч и располагаемым напором 12,5 кПа. Изменение расхода производили как регулировочной заслонкой, так и числом оборотов воздуходувки. Расход измеряли по перепаду давления в сужающем устройстве с помощью дифференциального микроманометра. В качестве сужающего устройства использовали нормальную диафрагму, тарированную в мерных сечениях воздуховода по полю скоростей. Температуру воздуха перед диафрагмой и на входе в циклонную камеру определяли ртутными лабораторными термометрами. Измерение статического давления во входных каналах и на боковой поверхности камеры производили микроманометрам.

На рис. 1 приведены основные интегральные характеристики рассмотренных циклонных камер в зависимости от их относительной длины. На рис. 1 использованы следующие дополнительные обозначения: $\bar{w}_{фя} = w_{фя} / v_{вх}$ – безразмерная тангенциальная составляющая скорости на границе ядра потока; $\bar{w}_{фm} = w_{фm} / v_{вх}$ – безразмерная максимальное тангенциальная скорость; $\bar{r}_{фя} = r_{фя} / R_к$ – безразмерный радиус ядра потока. Светлые значки относятся к характеристикам камеры с $D_к = 93$ мм, темные – к камере с $D_к = 160$ мм. В дальнейшем камеру с $D_к = 93$ мм обозначаем № 1, с $D_к = 160$ мм – № 2.

Представленные данные позволяют отметить, что характер изменения рассматриваемых характеристик от $\bar{L}_к$ практически одинаковый для обеих камер. Они снижаются эквидистантно с увеличением $\bar{L}_к$ в диапазоне общих значений $\bar{L}_к$, несмотря на имеющиеся различия параметров входа $\bar{f}_{вх}$. Сопоставление полученных данных при малых значениях относительной длины с расчетными данными, представленными в работе [6], полученными в результате обобщения большого количества опытных данных различных авторов, показало их вполне удовлетворительную сходимость. Удовлетворительное соответствие опытных и расчетных данных при $\bar{L}_к = 1$ и 2 наблюдается и для относительной скорости на границе ядра потока.

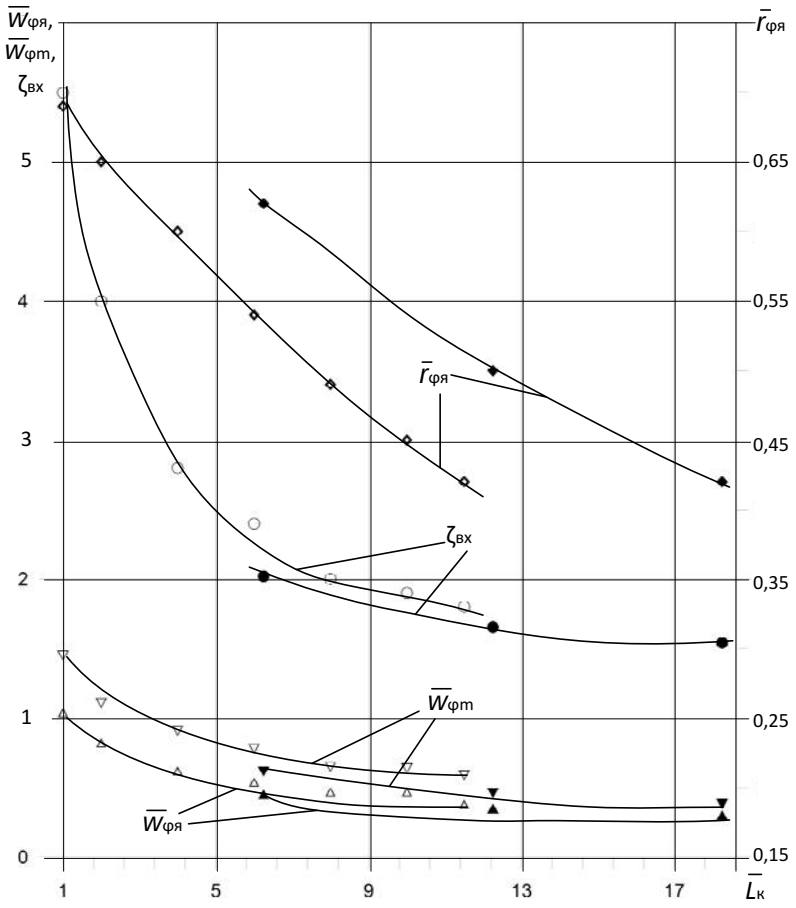


Рис. 1. Основные интегральные характеристики исследованных циклонных камер в зависимости от $\bar{L}_к$

Полученные новые опытные данные могут быть аппроксимированы следующими расчетными формулами:

$$\xi_{вх} = 3,5L_к^{-0,3}; \quad (1)$$

$$\overline{w}_{фя} = 0,9L_к^{-0,38}; \quad (2)$$

$$\overline{r}_{фя} = 1,2L_к^{-0,36}; \quad (3)$$

$$\overline{w}_{фm} = 1,4L_к^{-0,45}. \quad (4)$$

Формулы (1) – (4) применимы при $\overline{L}_к$ = 6,25…18,25.

На рис. 2, 3 приведены распределения безразмерных тангенциальной $\overline{w}_\varphi\left(\overline{r}\right)$ и осевой $\overline{w}_z\left(\overline{r}\right) = w_z / v_{вх}$ составляющих скорости по длине рабочего объема циклонной камеры № 2 с наибольшей из рассмотренных относительных длин $\overline{L}_к$ = 18,25. Здесь $\overline{r} = r / R_к$.

В рассматриваемом случае в камере существует, как это и отмечалось ранее [6], прямой периферийный вихрь, выходной и кольцевой обратный вихри. У выходного торца поток полностью устремлен на выход из камеры.

В приосевой области рабочего объема существует практически осесимметричное ядро с радиусом $\overline{r}_{фя}$ и скоростью на внешней границе $\overline{w}_{фя}$. Радиус $\overline{r}_{фя}$ фактически является радиусом цилиндрической поверхности, разделяющей прямой периферийный поток и ядро, определяющий зону их взаимодействия. В результате происходит перестройка потока от распределений скоростей, имеющих характерные особенности для входных сечений рабочего объема (т.е. сечений вблизи входа в рабочий объем струй газа из сопел) до выходных сечений в области выходного отверстия. В процессе перестройки на определенном расстоянии $\overline{z}_c$ от глухого торца камеры и в интервале безмерных радиусов примерно от 0,08 до 0,88 безмерная тангенциальная скорость потока имеет

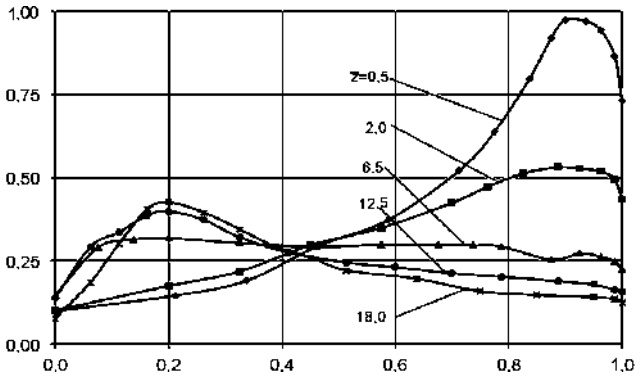


Рис. 2. Распределения безразмерной тангенциальной составляющей скорости по длине циклонной камеры с $\overline{L}_к$ = 18,25

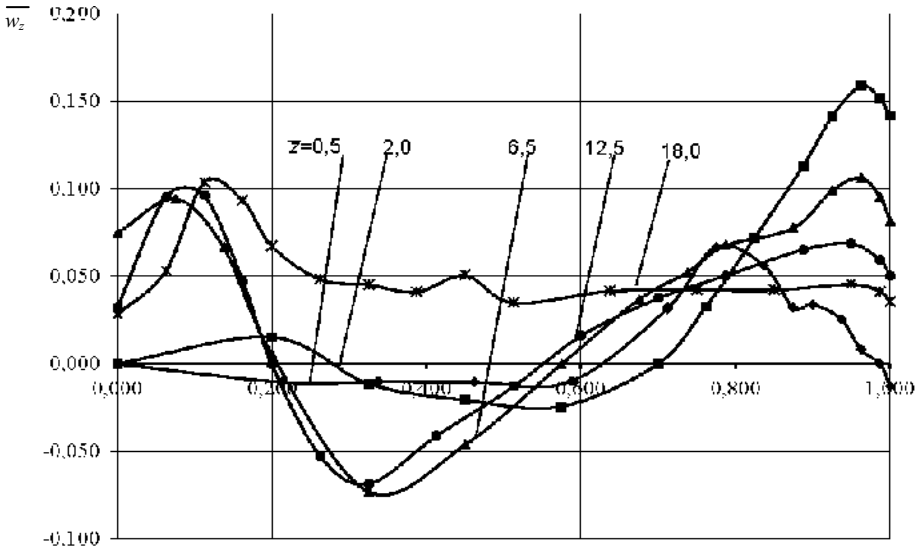


Рис. 3. Распределения осевой составляющей скорости по длине циклонной камеры с $\overline{L}_к$ = 18,25

постоянное значение. В рассматриваемом случае $\bar{z}_c$ равно примерно 6,5. Ниже этого сечения в общем случае поток сохраняет свойства струйного, выше под влиянием истечения в выходное отверстие, в частности преобразования в выходном отверстии статического давления в скоростной напор приобретает свойства циклонно-вихревого. Радиальными границами этого сечения в рассматриваемом случае являются струйные пограничные слои в приосевой области и на боковой поверхности камеры.

Полученные в работе данные позволяют отметить, что протяженность этой радиальной области убывает с уменьшением $\bar{L}_к$, и, вероятно, практически ликвидируется в коротких камерах (заметим, что впервые о существовании такой зоны было обращено внимание в работе [3]). Месторасположение рассматриваемого характерного участка, которое может быть определено координатой $\bar{z}_c$, можно рассчитать по следующей эмпирической формуле

$$\bar{z}_c = 0{,}375\,\bar{L}_к - 0{,}26. \qquad (5)$$

Зависимость (5) получена для диапазона $\bar{L}_к =$ = 6,25…18,25.

Таким образом, с точки зрения распределения скоростей, весь рабочий объем циклонной камеры большой относительной длины в радиальном направлении может быть разделен на ядро потока, ограниченного радиусом $\bar{r}_я$, и периферийную зону, в осевом – на зоны, имеющие особенности струйного потока и циклонно-вихревого, которые разделены поперечным сечением с практически неменяющимся значением тангенциальной скорости.

Подтверждением вывода является и то, что распределения безразмерной тангенциальной скорости вида $\bar{w}(\eta)$, где $\bar{w} = w_\varphi / w_{\varphi m}$, $\eta = r / r_{\varphi m}$ в зоне циклонно-вихревого потока вполне удовлетворительно описываются упрощенным аппроксимациями, использованными в работе [6] для описания распределений $\bar{w}$ в квазитвердой и потенциальной частях профиля $\bar{w}(\eta)$. В квазитвердой (внутренней зоне ядра) распределение $\bar{w}$ приближенно аппроксимируется уравнением

$$\bar{w} = \frac{2\eta}{1+\eta},$$

а в квазипотенциальной (в рассматриваем случае практически при $1 \le \eta \le \eta_к$, где $\eta_к = R_к / r_{\varphi m}$) формулой

$$\bar{w} = \frac{2}{1+\eta},$$

Значения $\bar{w}_{\varphi m}$ и $\bar{r}_{\varphi m}$ на рис. 2 равны соответственно 0,53 – 0,535 и 0,2.

В зоне с особенностями струйного пристенного потока для аппроксимации распределений тангенциальной (полной) составляющей скорости может быть использована формула Абрамовича-Шлихтинга [1], [8]:

$$\frac{w_\varphi - v_{\varphi 0}}{w_{\varphi\delta} - v_{\varphi 0}} = \left[1 - \left(\frac{y-\delta}{\delta_0 - \delta}\right)^{\frac{3}{4}}\right]^2,$$

где $\delta_0 = R_к - r_я$, $v_{\varphi 0} = w_{\varphi я}$, $y = R_к - r$, δ – толщина пристенного гидродинамического пограничного слоя.

Уровень осевых скоростей значительно ниже тангенциальных, максимальное значение $\bar{w}_z = w_z / v_{вх}$ в приосевом выходном вихре составляет 0,095 – 0,105.

Таблица 1

Избыточное статическое давление $\bar{P}_{с.к.}$

$z/L_к$	Камера № 1 ($L_к$ = 11,5)	Камера № 2 ($L_к$ = 18,25)
0,2	0,68	0,26
0,3	0,65	0,24
0,4	0,63	0,22
0,5	0,63	0,22
0,6	0,62	0,21
0,7	0,62	0,21
0,8	0,61	0,20

Безразмерное избыточное статическое давление $\bar{P}_{с.к.} = 2\,P_{с.к.}/\rho_{вх}v^2_{вх}$ имеет максимальное значение, как обычно, на боковой поверхности рабочего объема. В отличие от коротких камер оно более заметно снижается вдоль рабочего объема от глухого торца к выходному. В табл. 1 приведены значения $\bar{P}_{с.к.}$, полученные по показаниям зонда у боковой поверхности рабочего объема. В окрестности оси камеры в головных сечениях существует разрежение. Минимальное значение избыточного статического давления находится на оси. Зона разрежения ограничена радиусом, примерно равным 0,25. В приосевой области у глухого торца камеры наблюдается небольшое положительное давление, величина которого в диапазоне $\bar{r} \approx 0\ldots0{,}4$ практически неизменна.

Особый интерес представляет распределение характеристик потока в сечении с $\bar{z} = \bar{z}_c$, т.е. в сечении котором $\bar{w}_\varphi$ в определенном диапазоне $\bar{r}$ сохраняет постоянное значение, и завершается перестроение потока. В табл. 2 приведены распределения безразмерных тангенциальной составляющей скорости $\bar{w}_\varphi$, статического давления $\bar{P}_с = 2\,P_с/\rho_{вх}v^2_{вх}$, полного давления $\bar{P}_п = 2\,P_п/\rho_{вх}v^2_{вх}$, циркуляции тангенциальной скорости $\bar{w}_\varphi\,\bar{r}$, угловой скорости $\bar{w}_\varphi/\bar{r}$ и центробежного ускорения $\bar{w}^2_\varphi/\bar{r}$ потока в этом сечении.

Таблица 2

Характеристики потока в сечение $\bar{z} = \bar{z}_c \approx 6,5$ **в камере с** $\bar{L}_к = 18,25$

$\bar{r}$	$\bar{w}_\varphi$	$\bar{P}_с$	$\bar{P}_п$	$\bar{w}_\varphi \bar{r}$	$\bar{w}_\varphi / \bar{r}$	$\bar{w}_\varphi^2 / \bar{r}$
0,0	0,15	-0,28	-0,26	0	-	-
0,2	0,32	-0,04	0,06	0,06	1,6	0,5
0,4	0,30	0,09	0,18	0,12	0,7	0,22
0,6	0,30	0,16	0,24	0,18	0,5	0,17
0,8	0,30	0,21	0,3	0,23	0,35	0,1
1,0	0,27	0,23	0,28	0,22	0,2	0,05

Как видно из табл. 2 распределения $\bar{w}_\varphi$ и $\bar{P}_с$ в сечение $\bar{z}_c$ соответствуют вышеприведенным данным. Значение $\bar{w}_\varphi / \bar{r}$ повышается, а $\bar{w}_\varphi \bar{r}$ снижается с уменьшением $\bar{r}$. Угловая скорость при малых $\bar{r}$ приобретает очень большую величину. В слабопроточной приосевой зоне у глухого торца угловая скорость имеет практически постоянное значение, что является признаком квазетвердого индуцированного вращения. При $\bar{r} = \bar{r}_я$ (при $\bar{w}_\varphi = \bar{w}_{\varphi я}$) независимо от $\bar{z}$ значение безразмерной угловой скорости и циркуляции равны соответственно 0,65 и 0,11.

Таким образом, в результате выполненных исследований

1. Установлены новые особенности формирования потока в рабочем объеме относительно длинных циклонных камер.

2. Получены расчетные соотношения для основных аэродинамических характеристик относительно длинных циклонных камер в диапазоне $\bar{L}_к =$ $= 6,25…18,25$.

Литература

1. *Абрамович, Г.Н.* Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М., 1960.

2. *Карпов, С.В.* Высокоэффективные циклонные устройства / С.В. Карпов, Э.Н. Сабуров. – Архангельск, 2002.

3. *Осташев, С.И.* Аэродинамика циклонных секционных нагревательных устройств / С.И. Осташев, Э.Н. Сабуров. – Архангельск, 2005.

4. *Сабуров, Э.Н.* О влиянии относительной длины циклонно-вихревых нагревательных камер на аэро-динамику греющего потока / Э.Н. Сабуров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – № 3. – С. 35 – 38.

5. *Сабуров, Э.Н.* Теория и практика циклонных сепараторов, топок и печей. / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов. – Архангельск, 2000.

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

7. *Сабуров, Э.Н.* Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов. – М., 1993.

8. *Шлихтинг, Г.* Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М., 1969.

УДК 681.05.015

Т.Н. Кочнева, А.В. Кожевников, Н.В. Кочнев

СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДВУХМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье разработана математическая модель системы управления двухмассовой электромеханической системы с использованием модального регулятора желаемой эталонной формы на примере электропривода рольганга широкополосного листового прокатного стана. Проведено исследование показателей качества переходных процессов при управлении автоматизированной нелинейной двухмассовой электромеханической системой традиционной структуры подчиненного регулирования и с модальным регулятором. Показана высокая эффективность использования модального управления электроприводами в металлургических агрегатах с нежесткой механикой по сравнению с традиционными регуляторами и способами управления.

Модальное управление, синтез модального регулятора, электропривод рольганга широкополосного стана, нелинейная двухмассовая электромеханическая система, исследование качества переходных процессов.

In this paper, a mathematical model of the two-mass electromechanical control systems with the use of modal controller of desired reference is developed on the example of the drive roller conveyor of broadband sheet rolling mill. The study of quality of transient processes in the management of automated non-linear two-mass electromechanical system of traditional structure of the subordinate regulation and with the modal controller is carried out. The high efficiency of using the modal control of electric drives in metallurgical aggregates with non-rigid mechanics compared to traditional controllers and control methods is presented in the paper.

Modal control the synthesis of modal controller, the drive roller conveyor wide-strip, non-linear two-mass electromechanical system, the study of the quality of transients.