

DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-3
УДК 533.6:621.65.01

© Онохин Д.А., Сабуров Э.Н., 2018

Онохин Дмитрий Алексеевич
Аспирант, Северный (Арктический)
федеральный университет
им. М.В. Ломоносова
(Архангельск, Россия)
E-mail: onokhin-arh@yandex.ru

Onokhin Dmitrii Alekseevich
Post-graduate student, Northern (Arctic)
Federal University
named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: onokhin-arh@yandex.ru

Сабуров Эдуард Николаевич
Доктор технических наук, профессор,
Северный (Арктический) федеральный
университет им. М.В. Ломоносова
(Архангельск, Россия)
E-mail: saburov@narfu.ru

Saburov Eduard Nikolaevich
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russia)
E-mail: saburov@narfu.ru

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ОТНОСИТЕЛЬНО ДЛИННОЙ ЦИКЛОННОЙ КАМЕРЕ

ON SOME PECULIARITIES OF THE STRUCTURE OF THE FLOW IN THE RELATIVELY LONG CYCLONE CHAMBER

Аннотация. Проведено исследование основных аэродинамических характеристик потока в относительно длинной циклонной камере. Опыты выполнены при помощи трехканального цилиндрического зонда по стандартной методике. Приведены профили осевой и тангенциальной скоростей. Установлены новые особенности формирования потока в рабочем объеме относительно длинных циклонных камер. Установлено определяющее влияние характеристик ядра потока на его структуру в длинных камерах. Получены расчетные соотношения для основных аэродинамических характеристик относительно длинных циклонных камер. Предложенные соотношения могут быть использованы для практических расчетов.

Abstract. The main aerodynamic characteristics of the flow in a relatively long cyclone chamber were studied. The experiments were performed using a three-channel cylindrical probe according to a standard procedure. The profiles of axial and tangential velocities are presented. New features of flow formation in the working volume of relatively long cyclone chambers are established. The determining influence of the flow core characteristics on its structure in relatively long chambers is established. The calculated ratios for the main aerodynamic characteristics of relatively long cyclone chambers are obtained. Suggested correlation can be used for practical calculations.

Ключевые слова: циклонная камера, аэродинамика, тангенциальная составляющая скорости потока, длина камеры, ядро потока

Keywords: cyclone chamber, aerodynamics, tangential component of the velocity of flow, length of the chamber, core of the flow

Введение

Циклонные вихревые камеры как генераторы закрученных рабочих потоков получили широкое распространение в промышленности [4], [5] в качестве топок, печей, сепараторов, рекуператоров и других энерготехнологических устройств. Особенности организации рабочих процессов в них определяются, прежде всего, аэродинамикой. Большое количество исследований аэродинамики циклонных камер выполнено на их моделях сравнительно небольшой относительной длины $\bar{L}_k = L_k / D_k$

(L_k, D_k – длина и диаметр рабочего объема циклонной камеры) равной 1...2. Именно такие относительно короткие циклонно-вихревые камеры первоначально получили большое распространение в промышленности. Необходимость повышения производительности привела к увеличению длины их рабочего объема. В то же время рабочие процессы, имеющие место в камерах сравнительно большой относительной длины, до настоящего времени являются недостаточно изученными, что потребовало проведение соответствующих специальных исследований.

Основная часть

Первое систематическое исследование в широком диапазоне изменения относительной длины циклонной камеры $\bar{L}_k = 1...11,5$ выполнено в работе [3]. Исследование показало, что структура потока в рабочем объеме относительно длинных и коротких камер имеет существенные отличия. В длинных камерах уровень относительных тангенциальных скоростей потока $\bar{w}_\varphi = w_\varphi / v_{\text{вх}}$ (w_φ – тангенциальная составляющая вектора полной скорости потока; $v_{\text{вх}}$ – средняя скорость потока в шлицах на входе в камеру) ниже, чем в коротких. Меньшее значение имеет и коэффициент аэродинамического сопротивления камеры $\zeta_{\text{вх}} = 2\Delta P_\Pi / \rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2$ (ΔP_Π – перепад полного давления в камере; $\rho_{\text{вх}}$ – плотность воздуха в шлицах), ниже и аэродинамическая эффективность камеры, которая определяется коэффициентом вида $\zeta_{\varphi m} = 2\Delta P_\Pi / \rho_{\varphi m} w_{\varphi m}^2$ ($w_{\varphi m}, \rho_{\varphi m}$ – значения w_φ и ρ на радиусе $r_{\varphi m}$, где достигается максимальное значение w_φ). Уровень осевых скоростей $\bar{w}_z = w_z / v_{\text{вх}}$ в относительно длинных циклонных камерах также ниже, чем тангенциальных, поэтому в длинных камерах, как и в коротких, основным является вращательное движение потока. Ниже в относительно длинных камерах и общая интенсивность конвективного теплообмена. Однако с точки зрения технологического совершенства и производительности увеличение длины рабочего объема дает значительно больший экономический эффект, чем снижение показателей по уровню скоростей и конвективному теплообмену. Развитием этих результатов явились работы [1], [2].

Настоящая работа является продолжением и развитием ранее выполненных исследований. Анализируемые ниже опыты выполнены на циклонной камере с диаметром рабочего объема $D_k = 2R_k = 160$ мм. Ее относительная длина $\bar{L}_k$ варьировалась в пределах 1...17,25. Подвод воздуха в камеру производили тангенциально с диаметрально противоположных сторон двумя входными каналами (шлицами) размерами поперечного сечения 24×84 мм. Оси шлицев находились в одной поперечной плоскости на расстоянии $0,5D_k$ от глухого торца рабочего объема. Безразмерную площадь поперечного сечения входных каналов $\bar{f}_{\text{вх}} = 4f_{\text{вх}} / \pi D_k^2$ варьировали от 0,02 до 0,21. Вывод газов из рабочего объема камеры осуществляли с противоположного торца через отверстие круглой формы, соосное с осью камеры. Относительный диаметр выходного отверстия $\bar{d}_{\text{вых}} = d_{\text{вых}} / D_k$ составлял 0,2...1,0.

Температуру воздуха перед измерительной диафрагмой и на входе в камеру измеряли ртутными лабораторными термометрами. Определение избыточного статического давления на подводящем воздуховоде, во входных каналах и на боковой поверхности камеры производили через дренажные отверстия U-образными водяными дифманометрами и микроманометрами. Поля скоростей в рабочем объеме камеры исследовали трехканальным цилиндрическим зондом с диаметром насадка 2,6 мм по стандартной методике. Перемещение зонда осуществляли координатником, имеющим погрешность в определении угла вектора полной скорости $\pm 0,5^\circ$ и радиального

перемещения $\pm 0,025$ мм. Исследование полей проводили в поперечных сечениях камеры с продольными безразмерными координатами $\bar{z} = z/D_k = 0,5; 2; 6,5; 12,25; 16,5$ с диаметрально противоположных сторон. Продольная координата $\bar{z}$ отсчитывалась от глухого торца камеры вдоль ее оси.

Распределения безразмерных тангенциальных $\bar{w}_\varphi$ и осевых $\bar{w}_z$ скоростей потока по безразмерному радиусу $\bar{r} = r/R_k$ в камере с различной относительной длиной $\bar{L}_k$ показали, что в длинных камерах, как и в коротких, ввод газов с диаметрально противоположных сторон в сечении ввода обеспечивает осесимметричность поля скоростей независимо от длины рабочего объема камеры.

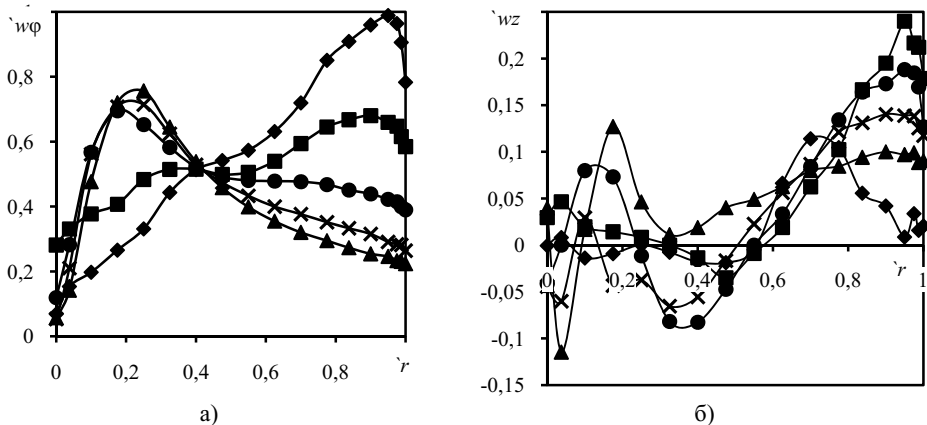


Рис. 1. Распределения $\bar{w}_\varphi$ (а) и $\bar{w}_z$ (б) в циклонной камере с $\bar{L}_k = 17,25$ в сечениях:

♦ – $\bar{z} = 0,5$; ■ – $2,0$; ● – $6,5$; × – $12,25$; ▲ – $16,5$

Из представленных на рис. 1 распределений $\bar{w}_\varphi(\bar{r})$ видно, что в рабочем объеме камеры существует область осесимметричного ядра, ограниченного цилиндрической поверхностью с радиусом $\bar{r}_я = r_я/R_k$. Значение $\bar{r}_я$ является внешней границей ядра потока – границей периферийной зоны течения. Радиус $\bar{r}_я$ практически не изменяется по длине рабочего объема. Значение тангенциальной составляющей скорости $\bar{w}_\varphi$ на радиусе $\bar{r}_я$ характеризуется величиной $\bar{w}_{\varphi я}$.

Перестройка профиля $\bar{w}_\varphi(\bar{r})$ происходит, начиная с области малых $\bar{z}$, где распределение $\bar{w}_\varphi$ определяется профилем струи, выходящей из шлицев, ее взаимодействием с криволинейной боковой поверхностью рабочего объема, уже вращающимся потоком и продолжается по мере продвижения потока к выходному торцу. В связи с истечением газов в выходное отверстие происходит дальнейшее изменение распределения $\bar{w}_\varphi$. Оно все больше приобретает особенности сильно закрученного осесимметричного потока, характерного для коротких циклонно-вихревых камер. Появляется максимум тангенциальной скорости $\bar{w}_{\varphi м} = w_{\varphi м}/v_{вх}$ в приосевой зоне, начинают формироваться зоны «квазипотенциального» и «квазитвердого» вращения.

Для разработки методики расчета аэродинамики и конвективного теплообмена относительно длинных циклонных камер особый интерес представляет периферийная зона течения газов, радиальные размеры которой определяются величиной $\bar{r}_я$.

На рис. 2 представлены значения $\bar{r}_я$ и $\bar{w}_{фя}$ в камерах различной относительной длины.

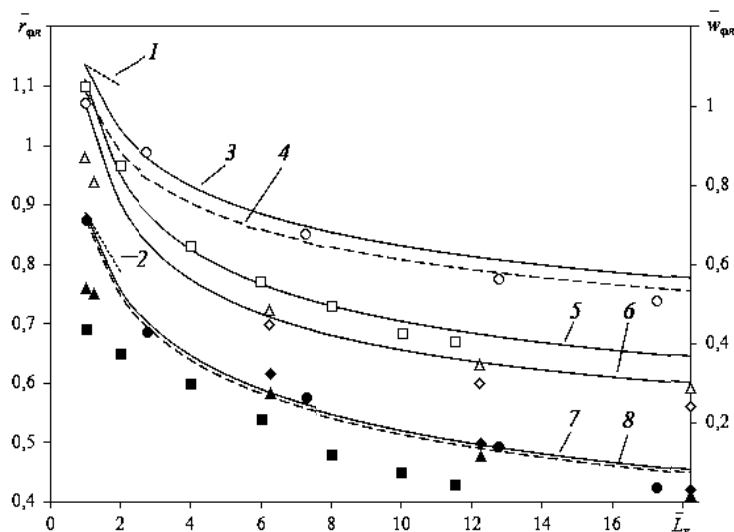


Рис. 2. Значения безразмерных радиуса и вращательной скорости на границе ядра потока в циклонных камерах различной длины. Обозначения:

темные значки – опытные данные $\bar{r}_я$; светлые – $\bar{w}_{фя}$; $\circ$ – опытные данные авторов;

Δ – [2]; $\diamond$ – [1]; $\square$ – [3]; линии: 1, 2 – зависимости для камер с $\bar{L}_к \leq 2$ [4];

3–8 – зависимости авторов для длинных камер

На рис. 2 полученные в работе опытные данные сравниваются с результатами ранее выполненных исследований.

В работе [3] камера имела диаметр 93 мм, относительную площадь входа $\bar{f}_{вх} = 0,052$, относительный диаметр выходного отверстия $\bar{d}_{вых} = 0,4$ и $\bar{L}_к = 1...11,5$. Продолжением этих исследований явились опыты [1], [2] на камере с $D_k = 160$ мм, $\bar{f}_{вх} = 0,04$, $\bar{d}_{вых} = 0,43$, $\bar{L}_к = 1...21,5$.

Из рис. 2 видно, что граница ядра потока, определяемая значением $\bar{r}_я$, зависит главным образом от длины камеры. Другие характеристики камеры практически не оказывают влияния на значение $\bar{r}_я$. Различие в уровне вращательных скоростей на границе ядра $\bar{w}_{фя}$ зависит от длины камеры и площади входа потока. Влияние $\bar{d}_{вых}$ меньше.

Опытные данные, полученные авторами при $\bar{f}_{вх} = 0,08$ и $\bar{d}_{вых} = 0,43$ в диапазоне $\bar{L}_к = 1...17,25$, вполне удовлетворительно можно описать следующими степенными зависимостями вида:

$$\bar{r}_я = 0,96 \bar{L}_к^{-0,24} \bar{f}_{вх}^{0,03}, \quad (1)$$

$$\bar{w}_{фя} = 6,23 \bar{L}_к^{-0,24} \bar{f}_{вх}^{0,76} \bar{d}_{вых}^{-0,18}. \quad (2)$$

Уравнения (1), (2) могут быть использованы для расчетов в диапазоне $\bar{L}_k = 1 \dots 21,5$; $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,02 \dots 0,21$; $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,2 \dots 1,0$.

С точки зрения исследования конвективного теплообмена на боковой поверхности рабочего объема длинных циклонных камер важное значение имеет пристенная область периферийной зоны течения. Граница пристенной зоны может быть определена из условия устойчивости равновесия вращающейся жидкости (условие Релея). Если пренебречь влиянием вторичных (осевых) течений, условие устойчивости можно записать в виде [6]:

$$\frac{d\rho(w_\phi r)^2}{dr} = 0,$$

или

$$\frac{1}{(w_\phi r)^2} \frac{d(w_\phi r)^2}{dr} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dr} = 0.$$

Для потока, близкого к изотермическому, условие устойчивости можно упростить, приняв $d\rho/dr = 0$, тогда

$$\frac{d\rho(w_\phi r)^2}{dr} = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) определяет положение максимума циркуляции скорости. Полученные в опытах относительные максимальные значения циркуляции тангенциальной составляющей скорости $\bar{\Gamma}_m = \bar{w}_\phi \bar{r}_{\Gamma m}$ и радиусы, на которых они наблюдаются $\bar{r}_{\Gamma m}$, могут быть определены по уравнениям:

$$\begin{aligned} \bar{\Gamma}_m &= 4,107 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,656} \bar{z}^{-0,394}; \\ \bar{r}_{\Gamma m} &= 0,93 \bar{f}_{\text{вх}}^{-0,015} \bar{d}_{\text{вых}}^{0,009} \bar{z}^{-0,004}. \end{aligned}$$

Полученные результаты позволяют отметить, что при $\bar{r} > \bar{r}_{\Gamma m}$ имеются благоприятные условия для появления неустойчивости течения, возникновения вторичных течений, различных по структуре, конфигурации, воздействию на основной поток и интенсивность теплоотдачи.

Выводы

1. В относительно длинной циклонной камере определяющими ее аэродинамику характеристиками являются радиус границы ядра потока или периферийной зоны и тангенциальная скорость на этом радиусе.
2. Радиус цилиндрической поверхности, ограничивающей ядро потока, относительно слабо зависит от геометрических характеристик относительно длинных камер. Определяющее влияние оказывает длина камеры.
3. Вращательная скорость на границе ядра, помимо длины камеры, зависит от условий входа потока в камеру.

4. Полученные расчетные соотношения для определения радиуса ядра $\bar{r}_я$ и тангенциальной скорости $\bar{w}_{фя}$ на его границе могут быть рекомендованы для расчетов аэродинамики относительно длинных циклонных камер.

Литература

1. Зайцева М.Л., Орехов А.Н., Сабуров Э.Н. О некоторых особенностях аэродинамики циклонных камер большой относительной длины // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. № 4. Т. 2. С. 11–15.
2. Орехов А.Н., Сабуров Э.Н. Некоторые особенности аэродинамики недифрагмированной циклонной камеры // Известия вузов и энергетических объединений СНГ: Энергетика. 2007. № 3. С. 70–77.
3. Сабуров Э.Н. О влиянии относительной длины циклонно-вихревых нагревательных камер на аэродинамику греющего потока // Кузнечно-штамповочное производство. 1968. № 3. С. 35–38.
4. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом. Архангельск: Северо-Западное книжное издательство, 1995. 341 с.
5. Сабуров Э.Н., Карпов С.В. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве. М.: Экология, 1993. 368 с.
6. Шукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М.: Машиностроение, 1980. 240 с.

References

1. Zaytseva M.L., Orekhov A.N., Saburov E.N. O nekotorykh osobennostiakh aerodinamiki tsiklonnykh kamer bol'shoi otnositel'noi dliny [On Some Features of Aerodynamics of Cyclone Chambers of Great Relative Length]. *Vestnik cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2013, vol. 2, no. 4, pp. 11–15.
2. Orekhov A.N., Saburov E.N. Nekotorye osobennosti aerodinamiki nediafragmirovannoi tsiklonnoi kamery [Some Features of Aerodynamics of a Non-Diaphragmed Cyclone Chamber]. *Izvestiia vuzov i energeticheskikh ob"edinenii SNG: Energetika* [News of Universities and Power Associations of the CIS: Energy], 2007, no. 3, pp. 70–77.
3. Saburov E.N. O vliianii otnositel'noi dliny tsiklonno-vikhrevykh nagrevatel'nykh kamer na aerodinamiku greiushchego potoka [On the Influence of the Relative Length of Cyclone-Vortex Heating Chambers on the Heating Flow Aerodynamics]. *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo* [Forging and Stamping Production], 1968, no. 3, pp. 35–38.
4. Saburov E.N. *Tsiklonnyye nagrevatel'nyye ustroystva s intensifitsirovannym konvektivnym teploobmenom* [Cyclone Heating Devices with Intensified Convective Heat Transfer]. Arkhangelsk: North-West Book Publ., 1995. 341 p.
5. Saburov E.N. (ed.), Karpov S.V. *Tsiklonnyye ustroystva v derevoobrabatyvayushchem i tsellyulozno-bumazhnom proizvodstve* [Cyclone Devices in Woodworking and Pulp-and-Paper Industry]. Moscow: Ecology Publ., 1993. 368 p.
6. Shchukin V.K. *Teploobmen i gidrodinamika vnutrennikh potokov v poliakh massovykh sil* [Heat Exchange and Hydrodynamics of Internal Flows in the Fields of Mass Forces]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 1980. 240 p.

Для цитирования: Онохин Д.А., Сабуров Э.Н. О некоторых особенностях структуры потока в относительно длинной циклонной камере // Вестник Череповецкого государственного университета. 2018. №2(83). С. 25–30. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-3

For citation: Onokhin D.A., Saburov E.N. On some peculiarities of the structure of the flow in the relatively long cyclone chamber. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, no. 2 (83), pp. 25–30. DOI 10.23859/1994-0637-2018-1-83-3