

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-527-538>

УДК 533.601

Аэродинамика и устойчивость потока в относительно длинных циклонных камерах

Э. Н. Сабуров¹⁾, Д. А. Онохин¹⁾

¹⁾Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
(Архангельск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. В статье приводятся и анализируются результаты экспериментального исследования аэродинамики потока в рабочем объеме циклонных камер большой относительной длины, значительно превышающей длину камер в ранее выполненных исследованиях. Подвод воздуха в закручиватель камеры осуществляли тангенциально с диаметрально противоположных сторон двумя входными каналами. Вывод воздуха из рабочего объема камеры производили с противоположного торца камеры через круглое осесимметричное отверстие. Значения площади входных каналов и диаметра выходного отверстия варьировали сменными вкладышами и пережимами. Опыты выполнены методом лазерной доплеровской анемометрии. В результате установлены новые особенности формирования потока в рабочем объеме относительно длинных циклонных камер. Определены основные характерные величины потока рабочего объема. В частности, установлено определяющее влияние характеристик ядра потока на его структуру в относительно длинных циклонных камерах. Подобраны расчетные соотношения для определения этих величин в зависимости от геометрических характеристик исследуемой камеры. Определена граница пристенной области течения, в которой создаются благоприятные условия для проявления неустойчивости потока. Проведено численное моделирование течения в программном комплексе ANSYS Fluent. По его результатам представлено сравнение показателей численного моделирования, расчетных зависимостей и экспериментальных данных. Сопоставление результатов показало вполне удовлетворительное совпадение. Полученные в процессе исследований данные и расчетные соотношения могут быть использованы в инженерной практике и представляют интерес с точки зрения дальнейшего изучения аэродинамики в сильно закрученном потоке циклонных устройств для совершенствования методик их теплового и аэродинамического расчетов.

Ключевые слова: циклонная камера, устойчивость потока, ядро потока, численное моделирование, ANSYS Fluent

Для цитирования: Сабуров, Э. Н. Аэродинамика и устойчивость потока в относительно длинных циклонных камерах / Э. Н. Сабуров, Д. А. Онохин // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 6. С. 527–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-527-538>

Адрес для переписки

Сабуров Эдуард Николаевич
Северный (Арктический) федеральный университет
имени М. В. Ломоносова
Набережная Северной Двины, 17,
163002, г. Архангельск, Российская Федерация
Тел.: +7 8182 21-61-71
saburov@narfu.ru

Address for correspondence

Saburov Eduard N.
Northern (Arctic) Federal University
named after M. V. Lomonosov
17, Embankment of the Northern Dvina
163002, Arkhangelsk, Russian Federation
Tel.: +7 8182 21-61-71
saburov@narfu.ru

Aerodynamics and Stability of the Flow in Relatively Long Cyclone Chambers

E. N. Saburov¹⁾, D. A. Onokhin¹⁾

¹⁾Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov (Arkhangelsk, Russian Federation)

Abstract. The article presents and analyzes the results of an experimental study of the aerodynamics of the flow in the working volume of cyclone chambers of a large relative length, significantly exceeding the length of the chambers that were used in the previous studies. Air supply to the chamber swirler was carried out tangentially from diametrically opposite sides by two inlet channels. The air discharge from the working volume of the chamber was made from the opposite end of the chamber through a round axisymmetric hole. The values of the area of the inlet channels and the diameter of the outlet were varied with replaceable incrustations and clamps. The experiments were performed with the use of laser Doppler anemometry. As a result, previously unknown features of flow formation in the working volume of relatively long cyclone chambers have been determined. The main characteristic values of the working volume flow have determined as well. In particular, the determining influence of the flow core characteristics on its structure in relatively long cyclone chambers has been discovered. The calculated ratios have been chosen to determine these values depending on the geometrical characteristics of the chamber under study. The boundary of the near-wall flow region, in which favorable conditions for the flow instability are created, is determined. Numerical simulation of the flow in the ANSYS Fluent software has been performed. Based on its results, a comparison of the results of numerical simulation, calculated dependencies and experimental data is presented. A comparison of the results demonstrated a completely satisfactory coincidence. Data obtained in the process of research and calculated ratios can be used in engineering practice and are of an interest from the point of view of further study of aerodynamics in a highly swirled flow of cyclone devices in order of to improving the methods of their thermal and aerodynamic calculations.

Keywords: cyclone chamber, flow stability, flow core, numerical simulation, ANSYS Fluent

For citation: Saburov E. N., Onokhin D. A. (2018) Aerodynamics and Stability of the Flow in Relatively Long Cyclone Chambers. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 61 (6), 527–538. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-527-538> (in Russian)

Введение

Одной из важнейших задач модернизации и развития промышленной теплоэнергетики является повышение производительности и энергоэффективности оборудования. Для ее решения успешное применение нашли закрученные высокотурбулентные потоки теплоносителей, в том числе и создаваемые в циклонных камерах. Циклонные камеры используются во многих отраслях промышленности в качестве устройств тепловой обработки материалов, циклонных топок и печей [1, 2], рекуператоров, воздухоподогревателей и сепараторов [3]. Они обладают простой и универсальной конструкцией, которая позволяет добиться высокой степени интенсивности тепло- и массообменных, сепарационных и других процессов. Преимущества циклонных устройств и особенности их работы определяются, прежде всего, их аэродинамикой. Большинство исследований по аэродинамике и конвективному теплообмену в циклонных камерах выполнено на их моделях с малой относительной длиной $\bar{L}_k = L_k/D_k$ (L_k , D_k – длина

и диаметр рабочего объема камеры). Именно такие устройства первоначально получили широкое распространение в промышленности [1, 4]. Расширение промышленного использования и повышение производительности вызвали необходимость увеличения длины их рабочего объема и проведения соответствующих исследований для разработки рекомендаций по их расчету и конструированию [5]. Особую важность в связи с этим приобретают теоретические и экспериментальные исследования структуры закрученных течений [6].

Первые систематические исследования аэродинамики моделей циклонных камер с относительной длиной в широком диапазоне изменения $\bar{L}_k = 1,0\text{--}11,5$ показали, что аэродинамика длинных циклонных камер имеет некоторые особенности [7].

Методика исследования

Исследование аэродинамики выполнено на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис. 1. Рабочий объем циклонной камеры представлял собой прозрачную трубу из оргстекла с внутренним диаметром $D_k = 2R_k = 172$ мм, состыкованную с закручивателем потока. Относительная длина камеры $\bar{L}_k = 13$. Подвод воздуха в закручиватель камеры осуществляли тангенциально с диаметрально противоположных сторон двумя входными каналами (шлицами), имеющими размеры поперечного сечения 24×84 мм. Оси шлицев находились в одной поперечной плоскости на расстоянии $0,5D_k$ от глухого торца закручивателя. Безразмерную площадь поперечного сечения входных каналов $\bar{f}_{вх} = 4f_{вх} / \pi D_k^2$ изменяли специально спроектированными вкладышами в диапазоне $0,02\text{--}0,21$. Вывод газов осуществляли с противоположного от закручивателя торца камеры через расположенное в нем выходное отверстие, ресивер и вентиляционный канал. Относительный диаметр выходного отверстия камеры $\bar{d}_{вых} = d_{вых} / D_k$ варьировали сменными диафрагмами в пределах $0,2\text{--}1,0$. Воздух в камеру подавали воздуходувкой с номинальной производительностью $1,6$ м³/с и располагаемым напором 16 кПа. Изменение расхода воздуха производили варьированием числа оборотов воздуходувки с помощью частотного преобразователя.

Исследование аэродинамики циклонной камеры проводили в стационарных условиях при постоянном расходе воздуха. Определение избыточного статического давления в 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 методом лазерной доплеровской анемометрии при помощи пятилучевого лазерного доплеровского анемометра (ЛДА), методика измерения которого основана на доплеровском эффекте смещения частоты излучения, отраженного от движущихся в потоке частиц [8].

С целью визуализации потока и проведения ЛДА-измерений в поток вводили микроскопические частицы диаметром около 1 мкм. Источником частиц служил генератор тумана Safex Fog Generator 2001 фирмы Dantec, в котором использовалась специальная жидкость Safex Fog Fluid Standard – полистирол на основе этиленгликоля. Оценка размера частиц тумана в [9, 10] показала их малую инерционность, что практически не оказывает влияния на точность измерения скоростей. Концентрацию частиц подбирали экспериментально до получения устойчивых доплеровских всплесков на осциллооскопе системного монитора в программе BSA Flow. Количество измерений скорости в каждой точке в среднем равнялось 2000 частиц. Статистическая обработка результатов измерений в программе BSA Flow позволяла рассчитать значения осредненной скорости потока в точке измерения.

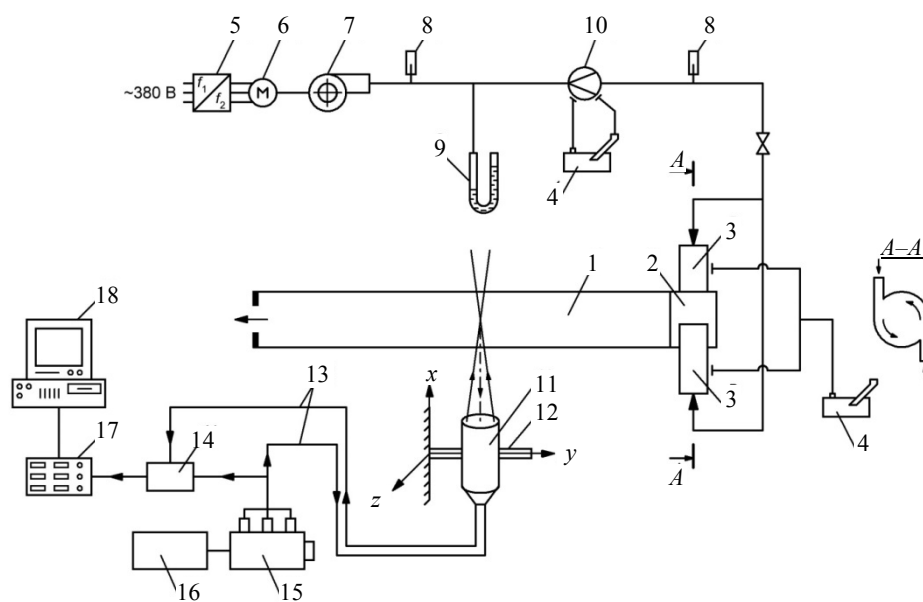


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования аэродинамики циклонной камеры с использованием лазерного доплеровского анемометра: 1 – рабочий объем циклонной камеры; 2 – закручиватель; 3 – входной канал (шлици); 4 – микроманометр; 5 – частотный преобразователь; 6 – приводной электродвигатель; 7 – воздуходувка; 8 – термометр; 9 – U-образный манометр; 10 – измерительная диафрагма; 11 – оптический зонд; 12 – траверса; 13 – оптоволоконный световод; 14 – фотоприемник (фотомультиплексер); 15 – оптический коммутатор; 16 – лазер; 17 – процессор BSA; 18 – компьютер

Fig. 1. Block diagram of the experimental stand for research of aerodynamics with the use of the LDA-method: 1 – working volume of cyclone chamber; 2 – swirler; 3 – entrance channels (slots); 4 – micromanometer; 5 – frequency converter; 6 – drive electric motor; 7 – blower; 8 – thermometers; 9 – U-shaped manometer; 10 – measuring diaphragm; 11 – optical probe; 12 – traverse; 13 – optical fibers; 14 – photodetector (photo multiplier); 15 – optical commutator; 16 – laser; 17 – BSA processor; 18 – computer

В опытах использовали трехкомпонентную систему ЛДА с дифференциальной оптической схемой [9], что позволяло измерять все три компоненты вектора полной скорости потока. Источником лазерного излучения

являлся газовый аргоновый лазер Coherent Innova 70с с длиной волны $\lambda = 514,5$ нм. Лазерный луч разделялся в оптическом коммутаторе серии 60X FiberFlow фирмы Dantec на пять лучей, которые подавались по оптоволоконным световодам в оптический зонд. Измерительный объем находился на пересечении лазерных лучей и имел форму эллипсоида. Перемещение в пространстве оптического зонда осуществлялось при помощи измерительной траверсы.

Отраженное движущимися частицами излучение улавливалось оптическим зондом и передавалось на фотоприемник – фотомультипликатор, в котором преобразовывалось в электрический сигнал. Полученный электрический сигнал усиливался и передавался далее на сигнальный процессор BSA P80, регистрировавший доплеровские всплески, производивший сравнение частот излучения и окончательную обработку данных. Далее конечные данные передавались на персональный компьютер для натурального представления, осуществляемого в программе BSA Flow. Программное обеспечение BSA Flow также позволяло управлять перемещением оптического зонда по траверсе, устанавливать и изменять настройки измерений.

Результаты исследования

Результаты исследования позволяют прежде всего отметить, что основная (наибольшая) компонента скорости потока в относительно длинных циклонных камерах – тангенциальная w_ϕ . По величине тангенциальная компонента w_ϕ , как и в относительно коротких камерах, является наибольшей. Осевая w_z и радиальная w_r составляющие и по величине, и по распределению практически близки. Однако распределения безразмерной тангенциальной составляющей скорости $\bar{w}_\phi = w_\phi / V_{\text{вх}}$ по относительному радиусу $\bar{r} = r / R_k$ в длинных камерах, в отличие от коротких, существенно меняется вдоль рабочего объема (рис. 2).

В начальных сечениях в месте ввода воздуха в рабочий объем через шлицы распределение $\bar{w}_\phi(\bar{r})$ является результатом взаимодействия выходящих из шлицев струй с криволинейной стенкой рабочего объема и уже вращающимися в камере газами. При перемещении сформировавшегося закрученного потока по направлению к выходному отверстию камеры он перестраивается до распределения в области выходного отверстия, близкого к профилю $\bar{w}_\phi(\bar{r})$ относительно коротких циклонно-вихревых камер (с максимумом \bar{w}_ϕ , квазипотенциальной и квазитвердыми зонами).

Постепенный процесс перестройки распределения $\bar{w}_\phi(\bar{r})$ происходит таким образом, что все распределения $\bar{w}_\phi(\bar{r})$ пересекаются в одной точке с безразмерной радиальной координатой $\bar{r}_я = r_я / R_k$ (рис. 2а). Значение $\bar{r}_я$ – постоянная величина для данной геометрии циклонной камеры, в общем случае зависящая от ее геометрических характеристик. Безразмерный ра-

диус $\bar{r}_я$ является радиусом условной круглой цилиндрической поверхности в приосевой зоне потока – радиальной границей его своеобразного ядра. Безразмерная тангенциальная скорость на границе ядра потока $\bar{w}_{\phi я} = w_{\phi я} / V_{вх}$.

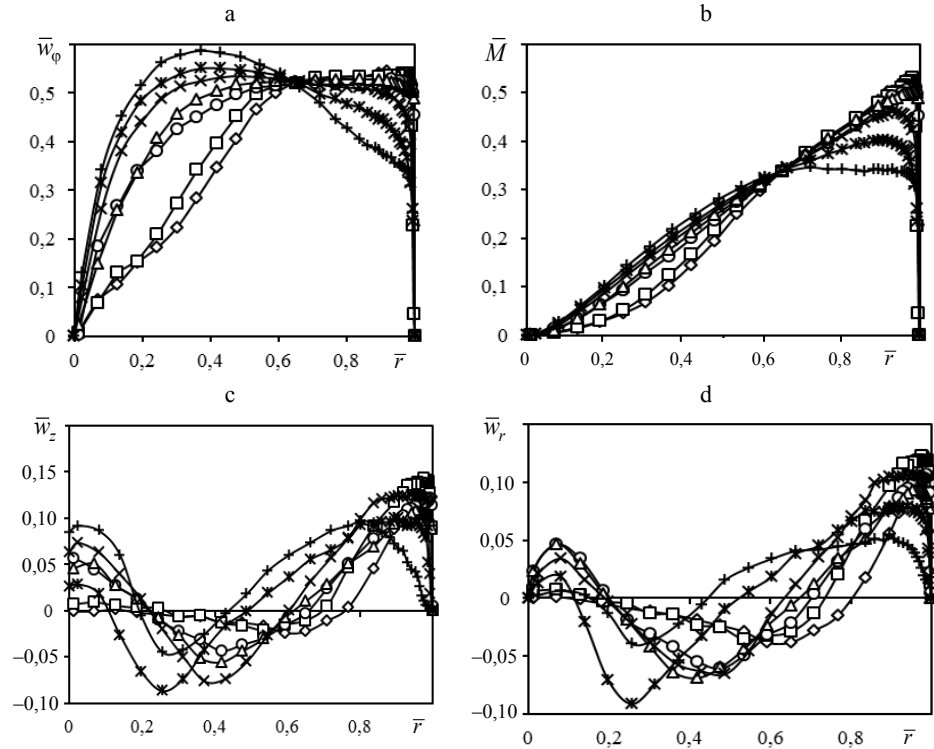


Рис. 2. Распределение тангенциальной (а) компоненты скорости, момента количества движения (б), осевой (с) и радиальной (д) составляющих скорости в циклонной камере с характеристиками $\bar{L}_к = 13$; $\bar{f}_{вх} = 0,04$; $\bar{d}_{вых} = 0,59$ в сечениях:

$\diamond - \bar{z} = 1,5$; $\square - 2,0$; $\circ - 4,0$; $\Delta - 6,0$; $\times - 8,0$; $\text{ж} - 10,0$; $+$ $- 12,5$

Fig. 2. Distributions of the tangential (a) component of velocity, angular momentum (b), axial (c) and radial (d) components of velocity in the cyclone chamber with the following characteristics:

$\bar{L}_{ch} = 13$; $\bar{f}_{in} = 0.04$; $\bar{d}_{out} = 0.59$ in the sections:

$\diamond - \bar{z} = 1.5$; $\square - 2.0$; $\circ - 4.0$; $\Delta - 6.0$; $\times - 8.0$; $\text{ж} - 10.0$; $+$ $- 12.5$

Обе зоны перестройки разделяются сечением с координатой $\bar{z}_я = z_я / D_к$. В этом сечении величина тангенциальной составляющей скорости $\bar{w}_{\phi с}$ является постоянной на радиусах $\bar{r}_я \leq \bar{r} \leq \bar{r}_{Mm}$, где $\bar{r}_{Mm} = r_{Mm} / R_к$ – радиус положения максимального значения момента тангенциальной составляющей скорости $\bar{M}_m = \bar{w}_{\phi Mm} \bar{r}_{Mm}$ (рис. 2б); $\bar{w}_{\phi Mm}$ – соответствует максимуму момента тангенциальной скорости. Координата $\bar{z}_я$ в безразмерном виде определяет переходное сечение перестройки потока, находящегося под влиянием условий ввода (условий входа газа в камеру), в поток, находящийся под влиянием выходных условий (условий истечения газа из каме-

ры), и является (так же как и $\bar{r}_я$) величиной постоянной для данной геометрии камеры. Итак, продольное сечение $\bar{z}_я$ разделяет рабочий объем камеры на две зоны, с точки зрения влияния на распределение $\bar{w}_\varphi(\bar{r})$: входную и выходную.

Несмотря на сложный процесс перестройки скоростного поля, в рабочем объеме циклонной камеры по характеру изменения компоненты скорости потока \bar{w}_φ в радиальном направлении можно выделить осесимметричное ядро потока. В зоне влияния условий выхода ядро потока состоит из квазитвердой и квазипотенциальной частей, соединенных небольшим переходным участком, на котором показатель \bar{w}_φ имеет максимальное значение $\bar{w}_{\varphi m} = w_{\varphi m} / V_{вх}$, а положение радиуса определяется радиусом $\bar{r}_{\varphi m} = r_{\varphi m} / R_k$. В зоне влияния входных условий распределение $\bar{w}_\varphi(\bar{r})$ носит ниспадающий, возможно, струйный характер.

Величины $\bar{r}_я$, $\bar{w}_{\varphi я}$, $\bar{z}_я$, $\bar{w}_{\varphi C}$, характеризующие ядро циклонного потока, как показывает анализ, являются удобными и физически обоснованными, определяющими основные скоростные характеристики потока. Их значения могут быть определены по следующим формулам:

$$\bar{r}_я = 0,96\bar{L}_k^{-0,24} \bar{f}_{вх}^{0,03} (1 - 10\bar{\Delta}_k); \quad (1)$$

$$\bar{w}_{\varphi я} = 6,23\bar{L}_k^{-0,24} \bar{f}_{вх}^{0,76} \bar{d}_{ввых}^{-0,18} k_\Delta; \quad (2)$$

$$\bar{z}_я = 0,3358\bar{L}_k - 20,988\bar{f}_{вх} + 4,54\bar{d}_{ввых} + 0,372; \quad (3)$$

$$\bar{w}_{\varphi C} = 4,46\bar{f}_{вх} - 0,025\bar{L}_k + 0,515, \quad (4)$$

где $\bar{\Delta}_k = \Delta_k / D_k$ – относительная высота выступов бугорков шероховатости; $k_\Delta = 1 - 1,688\bar{\Delta}_k^{0,28} \bar{L}_k^{0,2}$ – поправочный коэффициент на влияние шероховатости рабочего объема камеры, введенный исходя из анализа опытов [4].

Радиус ядра – внутренняя граница периферийной области течения. Ее внешней границей является цилиндрическая поверхность с радиусом $\bar{r}_{\varphi Mm} = r_{\varphi Mm} / R_k$, где $r_{\varphi Mm}$ – радиус положения максимального значения момента тангенциальной составляющей скорости. Снаружи эта зона ограничена боковой поверхностью рабочего объема.

Одновременно с экспериментом для сравнения было выполнено численное моделирование аэродинамики циклонной камеры с характеристиками $\bar{L}_k = 12,75$; $\bar{f}_{вх} = 0,04$; $\bar{d}_{ввых} = 0,43$. Численное решение задачи проводили в трехмерной постановке с использованием программного комплекса ANSYS Fluent 15.0. Течение описывалось уравнениями Рейнольдса, неразрывности и энергии. Замыкание уравнений было выполнено с исполь-

зованием двухпараметрической модели турбулентности SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ с поправкой на кривизну линий тока (curve correction) и стандартных пристеночных функций [11]. Дискретизация дифференциальных уравнений проводилась с использованием второго порядка точности. Сеточная модель построена блочным методом и представляла собой структурированную гексаэдрическую сетку размером 1 млн ячеек. Для пристеночного пограничного слоя (включая вязкий подслой) было обеспечено сеточное разрешение $y^+ \approx 1$.

Векторное поле (рис. 3а), траектории движения потока (рис. 3б) и контур полной скорости потока (рис. 3с) в продольном сечении камеры представлены на рис. 3. Численное исследование подтверждает, что в центральной осевой части камеры находится быстровращающееся ядро потока, а на периферии – пристеночное течение. Продвигаясь к выходному отверстию, поток между ядром и пристеночным течением, срываясь, закручивается, образуя крупномасштабные вихревые зоны. Данные зоны наблюдаются по всей длине рабочего объема камеры. На первой трети длины камеры наблюдаются симметричные относительно оси крупные тороподобные вихри, являющиеся результатом взаимодействия входных струй, периферийных прямого и обратного, осевого обратного и приторцевых потоков у глухого торца. Искривление вихрей и последующее выстраивание их по потоку приводят к формированию структур наподобие вихрей Тейлора–Гертлера, постепенно занимающих все пространство между ядром потока и периферийным током. При этом количество вихрей повышается в направлении выходного сечения. Центральная приосевая часть приторцевой области сравнительно малопроточна. Во входной части рабочего объема формируется выходной вихрь, распространяющийся у боковой поверхности к выходному торцу. По мере распространения периферийного выходного вихря его энергия затухает. При $\bar{z} > 10,0$ заметно растет его радиальная протяженность, и на последней трети длины рабочего объема возникают благоприятные условия для проявления неустойчивости потока. Данное обстоятельство выражается в отрыве потока от стенок и перемещении его в приосевую зону, либо в закольцовывании и появлении мелких вихрей. Ядро потока теряет осесимметричность. На рис. 3 показано, что в среднем сечении камеры $\bar{z}_я \approx 6,0$ происходит перестройка потока, выражающаяся в появлении вблизи оси камеры цепочки мелких вихрей.

С точки зрения исследования конвективного теплообмена на боковой поверхности рабочего объема длинных циклонных камер большое 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 [12]:

$$\frac{d\rho(w_\varphi r)^2}{dr} = 0, \quad (5)$$

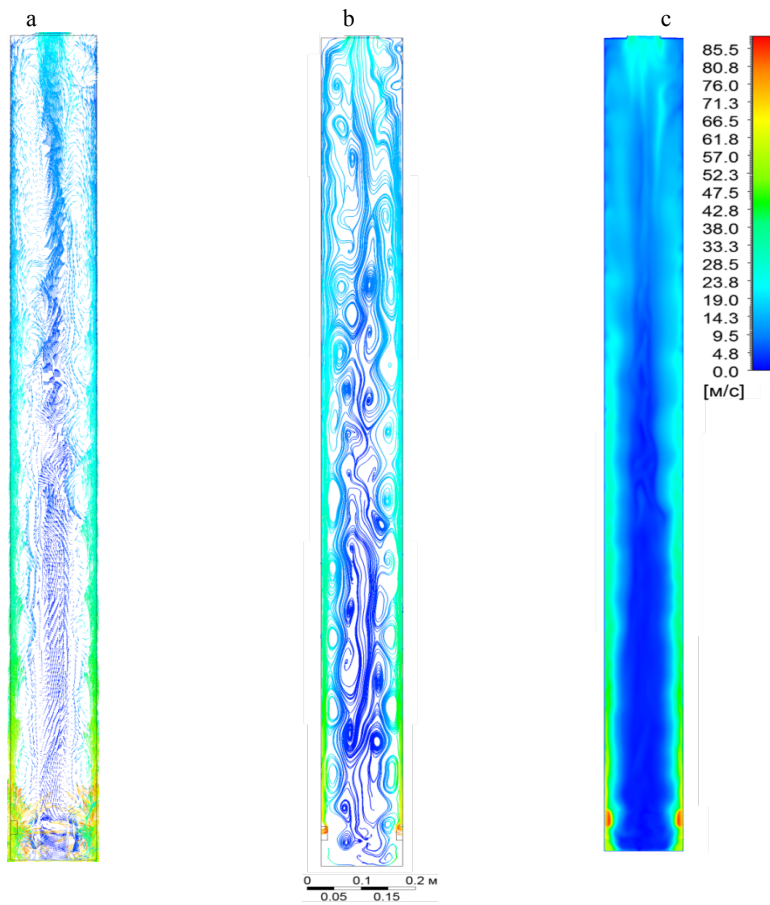


Рис. 3. Векторное поле (а), линии тока (б) и распределение полной скорости (с) в продольном сечении циклонной камеры с характеристиками

$$\bar{L}_k = 12,75; \bar{f}_{\text{вх}} = 0,04; \bar{d}_{\text{вых}} = 0,43$$

Fig. 3. The vector field (a), the lines of flow (b), and the distribution of the total velocity (c) in the longitudinal section of the cyclone chamber with the following characteristics:

$$\bar{L}_{ch} = 12.75; \bar{f}_{in} = 0.04; \bar{d}_{out} = 0.43$$

или

$$\frac{1}{(w_\phi r)^2} \cdot \frac{d(w_\phi r)^2}{dr} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dr} = 0. \quad (6)$$

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

$$\frac{d(w_\phi r)}{dr} = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) определяет положение максимума момента скорости. Полученные в опытах максимальные значения момента тангенциальной

составляющей скорости \bar{M}_m и радиусы, на которых они наблюдаются \bar{r}_{Mm} , приведены на рис. 4. Представленные результаты позволяют отметить, что при $\bar{r} > \bar{r}_{Mm}$ имеются благоприятные условия появления неустойчивости течения, возникновения вторичных течений.

Из рис. 4 видно, что положение максимума момента, определяющее границу устойчивости течения, и его величина в значительной степени зависят от продольной координаты \bar{z} . Выявлено также сильное влияние величины площади входа потока в камеру на зависимости \bar{r}_{Mm} , \bar{M}_m .

Опытные данные, полученных авторами в исследуемых диапазонах геометрических и режимных характеристик циклонных камер, вполне удовлетворительно можно описать следующими зависимостями:

$$\bar{w}_{\phi Mm} = 3,94 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,63} \bar{z}^{-0,38}; \tag{8}$$

$$\bar{r}_{\phi Mm} = 0,93 \bar{f}_{\text{вх}}^{-0,015} \bar{d}_{\text{вых}}^{0,009} \bar{z}^{-0,005}; \tag{9}$$

$$\bar{M}_m = 4,107 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,656} \bar{z}^{-0,394}. \tag{10}$$

Сравнение полученных в данной статье результатов с результатами аналогичных опытов [13], выполненных при помощи трехканального цилиндрического измерительного зонда, показало хорошее совпадение, что позволило расширить диапазон применимости полученных формул.

Таким образом, уравнения (8)–(10) могут быть использованы для расчетов в диапазонах величин: $\bar{L}_k = 1,00\text{--}17,25$; $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,02\text{--}0,21$; $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,2\text{--}1,0$.

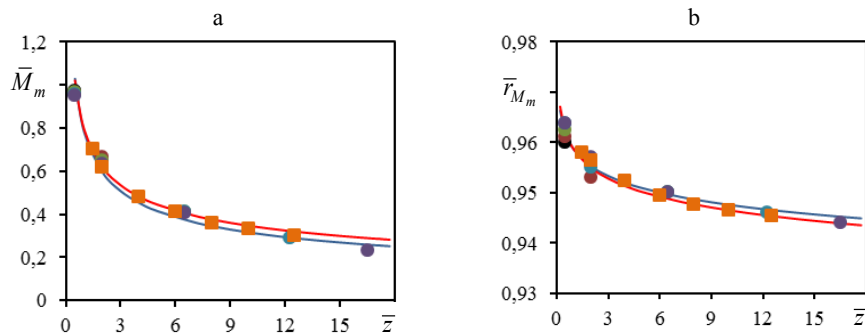


Рис. 4. Значения максимумов момента тангенциальной скорости \bar{M}_m (а) и радиусов, на которых они наблюдаются \bar{r}_{Mm} (б), в циклонных камерах большой относительной длины с характеристиками $\bar{f}_{\text{вх}} = 0,08$; $\bar{d}_{\text{вых}} = 0,43$. Обозначения: ■ – $\bar{L}_k = 13,00$; — — формулы (9), (10); — — результаты численного моделирования. Опыты [13]: ● – $\bar{L}_k = 1,00$; ● – 2,75; ● – 7,25; ● – 12,75; ● – 17,25

Fig. 4. The values of the maximums of the moments \bar{M}_m of the tangential velocity (a) and the radiuses \bar{r}_{Mm} on which they are observed (b), in cyclone chambers of large relative length with the following characteristics $\bar{f}_{in} = 0.08$; $\bar{d}_{out} = 0.43$. Notations: ■ – $\bar{L}_{ch} = 13.00$; — — formulas (9), (10); — — results of numerical simulation. Experiments [13]: ● – $\bar{L}_{ch} = 1.00$; ● – 2.75; ● – 7.25; ● – 12.75; ● – 17.25

Проведенный анализ показал, что \bar{r}_{Mm} , \bar{M}_m и $\bar{w}_{\varphi Mm}$ являются интегральными характеристиками аэродинамики относительно длинных циклонных камер. Выполненная работа позволила получить новые данные, установить границу устойчивости течения, значение характерной тангенциальной скорости $\bar{w}_{\varphi Mm}$, определяющей особенности течения в камере, определить границу устойчивости течения на вогнутой поверхности рабочего объема \bar{r}_{Mm} и расширить диапазон применимости основных расчетных формул.

ВЫВОДЫ

1. Величины $\bar{r}_я$, $\bar{w}_{\varphi я}$, $\bar{z}_я$, $\bar{w}_{\varphi C}$, характеризующие ядро циклонного потока, определяют основные скоростные характеристики потока.
2. Основными интегральными характеристиками, определяющими условия устойчивого течения и интенсивность теплоотдачи, являются радиус максимума момента тангенциальной скорости \bar{r}_{Mm} и тангенциальная скорость потока на этом радиусе $\bar{w}_{\varphi Mm}$.
3. При помощи численного моделирования обнаружены проявления неустойчивого течения – в местах срыва потока образуются закрученные вихри.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калишевский, Л. Л. Циклонные топки / Л. Л. Калишевский, Б. Д. Кацнельсон, Г. Ф. Кнорре; под общ. ред. Г. Ф. Кнорре, М. А. Наджарова. М.: Госэнергоиздат, 1958. 216 с.
2. Пуговкин, А. У. Рециркуляционные пламенные печи в машиностроении / А. У. Пуговкин. Л.: Машиностроение, 1987. 158 с.
3. Сидельковский, Л. Н. Циклонные энерготехнологические установки / Л. Н. Сидельковский, А. П. Шурыгин. М.: Госэнергоиздат, 1962. 80 с.
4. Сабуров, Э. Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / Э. Н. Сабуров. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. 341 с.
5. Кутателадзе, С. С. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках / С. С. Кутателадзе, Э. П. Волчков, В. И. Терехов. Новосибирск: Изд-во ИТФ СО АН СССР, 1987. 282 с.
6. Сабуров, Э. Н. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э. Н. Сабуров, С. В. Карпов / под ред. Э. Н. Сабурова. М.: Экология, 1993. 368 с.
7. Сабуров, Э. Н. О влиянии относительной длины циклонно-вихревых нагревательных камер на аэродинамику греющего потока / Э. Н. Сабуров // Кузнечно-штамповочное производство. 1968. № 3. С. 35–38.
8. Doppler Ch. Abhandlungen / Ch. Doppler. Leipzig: Verlag von W. Engelmann. 1907. 195 p.
9. Ринкевичус, Б. С. Лазерная диагностика потоков / Б. С. Ринкевичус; под ред. В. А. Фабриканта. М.: Изд-во МЭИ, 1990. 288 с.
10. Buchhave, P. The Measurement of Turbulence with the Lazer – Doppler Anemometer / P. Buchhave, W. K. George, J. L. Lumley // Ann. Rev. Fluid Mech. 1979. Vol. 11. P. 443–503. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.11.010179.002303>.

11. Осташев, С. И. Моделирование тепловых и аэродинамических процессов циклонных секционных нагревательных устройств / С. И. Осташев, Э. Н. Сабуров; под ред. Э. Н. Сабурова. Архангельск: Сев. (Арктич.) фед. ун-т, 2011. 195 с.
12. Щукин, В. К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил / В. К. Щукин. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1980. 240 с.
13. Онохин, Д. А. О некоторых особенностях структуры потока в относительно длинной циклонной камере / Д. А. Онохин, Э. Н. Сабуров // Вестник Череповецкого гос. ун-та. 2018. Т. 83, № 2. С. 25–30. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-1-83-3>.

Поступила 22.06.2018 Подписана в печать 30.08.2018 Опубликована онлайн 28.11.2018

REFERENCES

1. Kalishevskii L. L., Katsnel'son B. D., Knorre G. F., Nadzharov M. A. (ed.) (1958) *Cyclone Furnaces*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 216 (in Russian).
2. Pugovkin A. U. (1987) *Recirculation Flame Furnaces in Mechanical Engineering*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 158 (in Russian).
3. Sidel'kovskii L. N., Shurygin A. P. (1962) *Cyclone Power Technology Plants*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 80 (in Russian).
4. Saburov E. N. (1995) *Cyclone Heating Devices with Intensified Convective Heat Exchange*. Arkhangelsk, North-West Book Publ. 341 (in Russian).
5. Kutateladze S. S., Volchkov E. P., Terekhov V. I. (1987) *Aerodynamics and Heat and Mass Transfer in Limited Vortex Flows*. Novosibirsk, Institute of Thermophysics of the Siberian Office of Academy of Sciences of the USSR. 282 (in Russian).
6. Saburov E. N., Karpov S. V. (1993) *Cyclone Devices in Woodworking and Pulp-and-Paper Production*. Moscow, Ekologiya Publ. 368 (in Russian).
7. Saburov E. N. (1968) On the Influence of the Relative Length of Cyclone-Vortex Heating Chambers on the Aerodynamics of the Heating Flow. *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo* [Forging and Stamping Production], (3), 35–38 (in Russian).
8. Doppler Ch. (1907) *Abhandlungen*. Leipzig, Verlag von W. Engelmann. 195 (in German).
9. Rinkevichus B. S., Fabrikant V. A. (ed.) (1990) *Laser Flow Diagnostics*. Moscow, MPEI Publ., 1990. 288 (in Russian).
10. Buchhave P., George W. K., Lumley J. L. (1979) The Measurement of Turbulence with the Lazer – Doppler Anemometer. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 11, 443–503. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.11.010179.002303>.
11. Ostashev S. I., Saburov E. N. (2011) *Modeling of Thermal and Aerodynamic Processes of Cyclone Sectional Heating Devices*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University. 195 (in Russian).
12. Shchukin V. K. (1980) *Heat Exchange and Hydrodynamics of Internal Flows in the Fields of Mass Forces*; 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).
13. Onokhin D. A., Saburov E. N. (2018) On Some Peculiarities of the Structure of the Flow in the Relatively Long Cyclone Chamber. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of the Cherepovets State University*, 2018, 2 (83), 25–30 (in Russian). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2018-1-83-3>.

Received: 22 June 2018 Accepted: 30 August 2018 Published online: 28 November 2018