

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 536.253:66.041

Э.Н. САБУРОВ, С.В. КАРПОВ, Н.В. СМОЛИНА

Архангельский государственный технический университет



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 тепломассообмена в аппаратах различного технологического назначения.



Карпов Сергей Васильевич родился в 1945 г., окончил в 1967 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры теплотехники Архангельского государственного технического университета. Имеет более 100 научных трудов в области исследования теплотехники и конвективной работы циклонных устройств различного технологического назначения.



Смолина Наталья Владимировна родилась в 1969 г., окончила в 1991 г. Архангельский лесотехнический институт, ассистент кафедры теплотехники Архангельского государственного технического университета. Имеет 5 научных трудов в области исследования теплофизических основ работы циклонных устройств различного технологического назначения.

АЭРОДИНАМИКА ЦИКЛОННОГО УСТРОЙСТВА С ДВУХСТОРОННИМИ НЕСИММЕТРИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ ВВОДА И ВЫВОДА ГАЗОВ

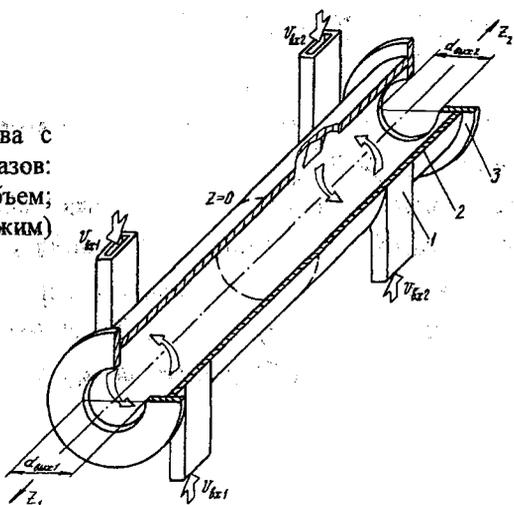
Рассмотрены особенности аэродинамики циклонных устройств с торцевым двухсторонним выводом газов при несимметричных условиях ввода и вывода потока. Даны рекомендации по их расчету.

The peculiarities of aerodynamics for cyclone devices with end double-side gas discharge under unsymmetrical conditions of flow input and output are analyzed. The recommendations for their calculation are given.

Настоящая статья посвящена исследованиям аэродинамики циклонных устройств с двухсторонним торцевым выводом газов, которые в ряде случаев дают возможность наиболее рационально организовать технологический процесс: повысить сепарационные свойства потока в пылеуловителях, степень выгорания серы в циклонных печах сульфитного производства и термического обезвреживания отходов и др. [1].

Опыты выполнены на циклонном устройстве (рис.1) с диаметром рабочего объема камеры $D_k = 160$ мм и длиной $L_k = 840$ мм. Подвод воздуха в устройство осуществляли через шлицы, расположенные попарно вблизи торцов рабочего объема с диаметрально противоположных сторон в одной поперечной плоскости, по индивидуальным (на каждую пару шлицев) трубопроводам, снабженным регулировочными заслонками. Все шлицы имели поперечное сечение размером 24×84 мм. Воздух выводили через плоские пережимы, соосные с рабочим объемом. Относительный диаметр выходных отверстий $d_{\text{вых}} = d_{\text{вых}}/D_k$ варьировали от 0,2 до 0,8.

Рис. 1. Схема циклонного устройства с двухсторонним торцевым выводом газов:
1 – входные шлицы; 2 – рабочий объем;
3 – выходной съемный торец (пережим)



В целях удобства анализа опытных данных и разработки рекомендаций рабочий объем устройства условно был разделен на две равные по длине части. Сечение раздела — среднее сечение, имеющее координату $z = 0$, где z — продольная координата, совпадающая с осью рабочего объема и направленная к выходному отверстию каждой его половины (рис. 1). Всем характеристикам, относящимся к первой половине камеры (нижней на рис. 1), присвоен индекс 1, а ко второй (верхней) — 2.

Поля скоростей и давлений в рабочем объеме устройства измеряли трехканальным цилиндрическим зондом с диаметром насадка 2,6 мм по общепринятой методике. Сечения замеров определяли координатами $\bar{z}_1 = z_1/D_k$ и $\bar{z}_2 = z_2/D_k$. При проведении работ замеряли расходы воздуха V_1 и V_2 и его температуры, статические давления на боковой поверхности рабочего объема $p_{c.k1}$ и $p_{c.k2}$ и на касательной к ней внутренней поверхности шлицев $p_{c.вх1}$ и $p_{c.вх2}$. Дренажные отверстия для отбора статического давления имели диаметр 0,5 мм, располагались по длине рабочего объема с шагом $(0,5 \dots 1,0) D_k$, а по периметру — с двух диаметрально противоположных сторон. Среднерасходную скорость потока воздуха в шлицах определяли по формулам $V_{вх1} = V_1/f_{вх1}$; $V_{вх2} = V_2/f_{вх2}$, где $f_{вх1}$ и $f_{вх2}$ — площади поперечного сечения входных шлицев (площади входа потока).

Исследования состояли из трех серий опытов. В первой серии исследовали аэродинамику циклонного устройства с двухсторонними несимметричными условиями вывода газов и симметричными условиями их ввода в рабочий объем. В этих опытах варьировали относительный диаметр выходного отверстия $\bar{d}_{вых2}$. Параметры $\bar{d}_{вых1} = 0,4$, $V_1 = V_2$, $\bar{f}_{вх1} = \bar{f}_{вх2}$ (или $V_{вх1} = V_{вх2}$) поддерживали постоянными. На рис. 2 показаны распределения безразмерных тангенциальной $\bar{w}_\varphi = w_\varphi / V_{вх}$ (w_φ — размерная тангенциальная составляющая полной скорости потока) и аксиальной $\bar{w}_z = w_z / V_{вх}$ (w_z — размерная аксиальная составляющая полной скорости потока) компонент полной скорости потока в диаметральной сечении циклонного устройства с двухсторонним выводом газов при различных значениях параметра $\bar{d}_{вых2}$ (или $\bar{d}_{вых2} = d_{вых2}/d_{вых1}$). На рис. 2 также представлены масштабы \bar{w}_φ , \bar{w}_z и z .

Для дополнения рис. 2 в табл. 1 приведены основные аэродинамические характеристики циклонного потока при различных значениях параметра $\bar{d}_{вых2}$. Здесь приняты следующие обозначения: $\bar{w}_{\varphi m} = w_{\varphi m} / V_{вх}$ — безразмерная максимальная тангенциальная составляющая скорости; $\bar{r}_{\varphi m} = r_{\varphi m} / R_k$ — безразмерный радиус, характеризующий положение $\bar{w}_{\varphi m}$; $\bar{w}_{\varphi \alpha} = w_{\varphi \alpha} / V_{вх}$ — безразмерная тангенциальная составляющая полной скорости на границе ядра потока; $\bar{r}_\alpha = r_\alpha / R_k$ — безразмерный радиус ядра потока; $\bar{w}_{zm} = w_{zm} / V_{вх}$ — безразмерная максимальная аксиальная составляющая

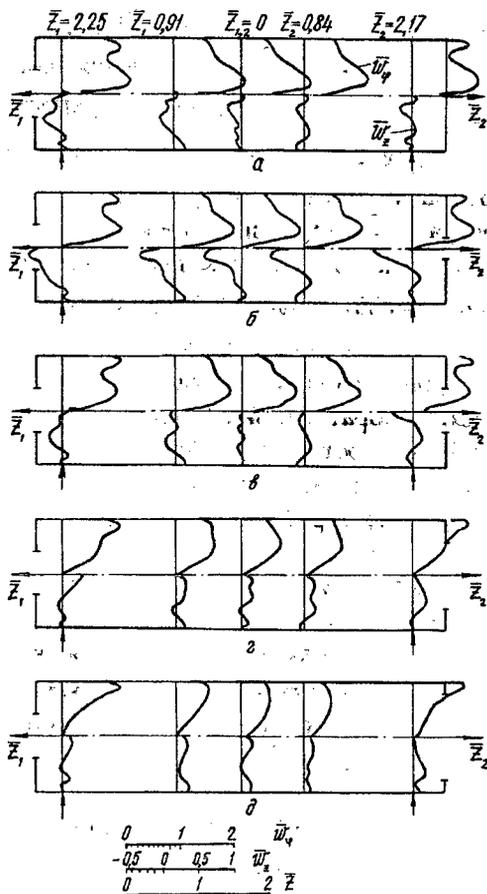


Рис. 2. Распределения безразмерных тангенциальной w_ϕ и осевой w_z компонент полной скорости в рабочем объеме циклонного устройства ($\tilde{d}_{\text{вых}1} = 0,4$) при различных значениях $\tilde{d}_{\text{вых}2}$: а - 0,0; б - 0,2; в - 0,4; г - 0,6; д - 0,8

скорости потока в выходном вихре; $\tilde{r}_{zm} = r_{zm}/R_k$ - безразмерный радиус, характеризующий положение \tilde{w}_{zm} ; $\tilde{p}_{с.к} = 2\tilde{p}_{с.к} / (\rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2)$ - безразмерное избыточное статическое давление на боковой поверхности рабочего объема камеры; $\tilde{p}_{с.вх} = 2p_{с.вх} / (\rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2)$ - безразмерное избыточное статическое давление в щлицах; $\zeta_{\text{вх}} = 2\Delta P_{\text{п}} / (\rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2)$ - суммарный коэффициент сопротивления камеры по входным условиям; $\zeta_{\text{фм}} = 2\Delta P_{\text{п}} / (\rho_{\text{вх}} w_{\text{фм}}^2) = \zeta_{\text{вх}} / w_{\text{фм}}^2$ - коэффициент сопротивления, определяющий аэродинамическое совершенство камеры, где $\Delta P_{\text{п}}$ - перепад полного давления в камере.

Представленные на рис. 2 и в табл. 1 данные позволяют отметить, что варьирование $\tilde{d}_{\text{вых}2}$ оказывает существенное влияние на течение в циклонном устройстве. Так, при изменении $\tilde{d}_{\text{вых}2}$ от 0,5 до 2,0 коэффициент

сопротивления $\zeta_{вх}$ снижается с 3,31 до 1,50 (при симметричном выводе газов, когда $\tilde{d}_{вых2} = 1$, $\zeta_{вх} = 3,12$). Уменьшаются тангенциальные скорости, а также статическое давление на боковой поверхности рабочего объема и шлицев. Влияние $\tilde{d}_{вых2}$ распространяется на всю область рабочего объема устройства. Аэродинамические характеристики потока в первой и во второй половинах камеры различаются незначительно.

Общая схема течения в камере также существенно зависит от параметра $\tilde{d}_{вых2}$. В предельном случае ($\tilde{d}_{вых2} = 0$) циклонное устройство представляет собой относительно длинную циклонную камеру с односторонним выходом и двухсторонним околоторцевым вводом газов. В устройстве существует центральный обратный вихрь небольшой мощности. В первой половине камеры имеется достаточно сильный обратный периферийный поток, во второй – прямой периферийный. Оба вихря встречаются в области среднего сечения ($\bar{z} = 0$), в результате чего во второй половине возникает кольцевой обратный вихрь.

Выходной вихрь зарождается у глухого торца устройства. Мощность его значительно возрастает по мере продвижения к выходному отверстию. Во второй половине камеры максимальная осевая скорость в выходном вихре остается практически постоянной вплоть до среднего сечения, в первой половине при его движении к выходу \bar{w}_{zm} увеличивается примерно в 1,5 раза. Максимум \bar{w}_z в выходном вихре при этом смещается от оси устройства к кромке выходного отверстия. Переход от предельного случая $\tilde{d}_{вых2} = 0$ к $\tilde{d}_{вых2} = 0,5$ имеет принципиальное значение. Устройство начинает работать с двухсторонним выводом газов. Осевой обратный ток второй половины камеры сливается с выходным вихрем первой, в результате чего в приосевой зоне устройства образуется мощное осевое течение.

Таблица 1

$\tilde{d}_{вых2}$	$\bar{w}_{\phi m}$	$\bar{r}_{\phi m}$	$\bar{w}_{\phi \lambda}$	\bar{r}_{λ}	\bar{w}_{zm}	\bar{r}_{zm}	$\bar{P}_{с.к}$	$\bar{P}_{с.вх}$	$\zeta_{вх}$	$\zeta_{\phi m}$
2,0	<u>0,52*</u>	<u>0,72*</u>	<u>0,52</u>	<u>0,68</u>	<u>0,02</u>	<u>0,59</u>	<u>0,47</u>	<u>0,61</u>	<u>1,61</u>	<u>5,95*</u>
	0,49*	0,69*	0,50	0,69	0,13	0,70	0,39	0,50	1,50	6,25*
1,5	<u>0,67*</u>	<u>0,56*</u>	<u>0,73</u>	<u>0,69</u>	<u>0,05</u>	<u>0,50</u>	<u>0,99</u>	<u>1,15</u>	<u>2,15</u>	<u>4,79*</u>
	0,69*	0,55	0,68	0,69	0,13	0,46	0,92	1,01	2,01	4,22*
1,0	<u>1,00</u>	<u>0,40</u>	<u>0,70</u>	<u>0,74</u>	<u>0,18</u>	<u>0,46</u>	<u>2,10</u>	<u>2,26</u>	<u>3,25</u>	<u>3,25</u>
	1,01	0,39	0,69	0,74	0,10	0,47	2,02	2,10	3,12	3,08
0,5	<u>1,05</u>	<u>0,34</u>	<u>0,80</u>	<u>0,73</u>	<u>0,46</u>	<u>0,11</u>	<u>2,24</u>	<u>2,43</u>	<u>3,43</u>	<u>3,11</u>
	1,09	0,33	0,78	0,74	0,06	0,57	2,25	2,40	3,31	2,84
0,0	<u>1,25</u>	<u>0,22</u>	<u>0,80</u>	<u>0,75</u>	<u>0,24</u>	<u>0,47</u>	<u>2,52</u>	<u>2,70</u>	<u>3,82</u>	<u>2,49</u>
	1,20	0,24	0,76	0,76	0,16	0,25	2,59	2,79	3,71	2,65

Примечания. 1. Здесь и далее, в табл. 2, 3, в числителе приведены данные, относящиеся к первой половине камеры, в знаменателе – ко второй. 2. Знаком «*» отмечены характеристики среднего сечения рабочего объема.

В первой половине имеют место лишь два вихря: выходной и обратный периферийный. Последний, взаимодействуя с периферийным обратным второй половины камеры, образует в ней кольцевой прямой вихрь, в дальнейшем сливающийся с выходным. Такая общая перестройка поля осевых скоростей, определяемая изменением $\tilde{d}_{\text{вых}2}$, является причиной того, что влияние этого параметра распространяется сразу на весь рабочий объем устройства (при $\tilde{d}_{\text{вых}2} > 0$: за положительное направление потоков в каждой половине устройства (рис. 2) принято направление от среднего сечения к выходным торцам). Режим истечения воздуха из выходного отверстия в данном случае носит нестационарный характер. В одних случаях выходная вращающаяся струя распространяется из него под определенным углом к плоскости пережима, в других – растекается по его поверхности. Смена режимов происходит самопроизвольно.

При $\tilde{d}_{\text{вых}2} = 0,5$ поле осевых скоростей, как следует из вышеприведенного анализа, несимметрично относительно средней поперечной плоскости рабочего объема устройства в отличие от полей \bar{w}_φ и $\bar{p}_c = 2p_c / (\rho_{\text{вх}} v_{\text{вх}}^2)$ – безразмерного избыточного статического давления. Значения $\bar{w}_{\varphi\text{от}}$, $\zeta_{\text{вх}}$ при переходе $\tilde{d}_{\text{вых}2}$ от 0,0 к 0,5 уменьшаются, при этом снижается и аэродинамическая эффективность устройства, оцененная по коэффициенту $\zeta_{\varphi\text{от}}$. Вероятно, это связано с тем, что при двухстороннем выводе газов степень использования энергии и момента количества движения газов, вводимых во вторую половину камеры ниже, чем при одностороннем выводе, и определяется главным образом снижением (формально в 2 раза) относительной суммарной площади входа $\bar{f}_{\text{вх}} = 4 f_{\text{вх}} (\pi D_k^2)$. Следует иметь в виду, что при работе устройства с двухсторонним выводом газов имеет место и уменьшение относительной длины рабочего объема камеры. Причем уменьшение \bar{L}_k должно увеличивать $\bar{w}_{\varphi\text{от}}$ и $\zeta_{\text{вх}}$, а снижение $\bar{f}_{\text{вх}}$, наоборот, их уменьшать, что в конечном счете и определяет полученный в работе результат.

Увеличение $\tilde{d}_{\text{вых}2}$ до 1 сопровождается дальнейшей перестройкой поля осевых скоростей и уменьшением $\bar{w}_{\varphi\text{от}}$ и $\zeta_{\text{вх}}$. При $\tilde{d}_{\text{вых}2} = 1$ картина распределений \bar{w}_z , как и \bar{w}_φ , \bar{p}_c , становится практически симметричной относительно среднего сечения рабочего объема устройства. Увеличение $\tilde{d}_{\text{вых}2} > 1$ приводит к тому, что осевой обратный ток первой половины камеры сливается с выходным вихрем, занимающим всю центральную часть рабочего объема устройства и выходящим наружу через большее выходное отверстие второй половины. При $\tilde{d}_{\text{вых}2} = 1,5$ маломощный выходной вихрь первой половины камеры соединяется с кольцевым вихрем, образующимся в результате взаимодействия в центральной зоне рабочего объема перифе-

рийных обратных вихрей обеих половин. При $\tilde{d}_{\text{вых}2} = 2$ через выходное отверстие первой половины камеры выходит вообще сравнительно небольшая часть вводимых в устройство газов. Практически все они устремляются к большему выходному отверстию второй половины ($\bar{d}_{\text{вых}2} = 0,8$). Увеличение $\tilde{d}_{\text{вых}2}$ от 1 до 2 сопровождается и значительной перестройкой поля тангенциальной скорости. При $\tilde{d}_{\text{вых}2} > 1$ максимум \bar{w}_ϕ в ядре потока наблюдается лишь в средней части рабочего объема устройства. Вблизи выходных отверстий профиль \bar{w}_ϕ имеет характерный спад от стенки рабочего объема. Чем больше $\bar{d}_{\text{вых}2}$, тем эти изменения существенней, а общий уровень \bar{w}_ϕ ниже.

Значения $\bar{w}_{\phi m}$ и $\zeta_{\text{вх}}$ для циклонной камеры с двухсторонним выводом газов при различных $\bar{d}_{\text{вых}1}$ и $\bar{d}_{\text{вых}2}$, $f_{\text{вх}1} = f_{\text{вх}2}$, $V_1 = V_2$, можно определять по следующим уравнениям:

при $0 < \tilde{d}_{\text{вых}2} \leq 1$

$$\bar{w}_{\phi m}^H = \bar{w}_{\phi m}^C (1,22 - 0,22 \tilde{d}_{\text{вых}2}); \quad (1)$$

$$\zeta_{\text{вх}}^H = \zeta_{\text{вх}}^C (1,17 - 0,17 \tilde{d}_{\text{вых}2}); \quad (2)$$

при $1 \leq \tilde{d}_{\text{вых}2} \leq 2$

$$\bar{w}_{\phi m}^H = \bar{w}_{\phi m}^C (1,50 - 0,50 \tilde{d}_{\text{вых}2}); \quad (3)$$

$$\zeta_{\text{вх}}^H = \zeta_{\text{вх}}^C (1,54 - 0,54 \tilde{d}_{\text{вых}2}). \quad (4)$$

Здесь $\bar{w}_{\phi m}^H$ и $\zeta_{\text{вх}}^H$, $\bar{w}_{\phi m}^C$ и $\zeta_{\text{вх}}^C$ — характеристики устройства с двухсторонним соответственно несимметричным и симметричным выводом газов.

Рекомендации по расчету $\zeta_{\text{вх}}^C$ и $\bar{w}_{\phi m}^C$ приведены в работе [1]. Необходимо отметить, что при расчете для обеих геометрических половин камеры в качестве $\bar{w}_{\phi m}^C$ и $\zeta_{\text{вх}}^C$ в формулах (1) – (4) принимаются их значения, соответствующие большему $\bar{d}_{\text{вых}}$. Так, при $\tilde{d}_{\text{вых}2} = 1,5$ следует принять $\bar{w}_{\phi m}^C$ и $\zeta_{\text{вх}}^C$, соответствующие $\bar{d}_{\text{вых}2} = 0,6$, а при $\tilde{d}_{\text{вых}2} = 0,5$ — соответствующие $\bar{d}_{\text{вых}1} = 0,4$. Погрешность расчетов по формулам (1) – (4) не превышает $\pm 4\%$.

Во второй серии экспериментов исследовали аэродинамику циклонного устройства с двухсторонними симметричными условиями торцевого вывода газов и несимметричными условиями их ввода в рабочий объем. Несимметрию ввода потока в устройство создавали за счет измене-

ния относительной площади входа $\bar{f}_{вх1}$. При этом $\bar{f}_{вх2}$, $\bar{d}_{вых1} = \bar{d}_{вых2}$, $V_1 = V_2$ оставались величинами постоянными.

При $\bar{f}_{вх1} \neq \bar{f}_{вх2}$ и $\tilde{f}_{вх1} = \bar{f}_{вх1} / \bar{f}_{вх2} \neq 1$ нарушается симметрия распределения аксиальных и тангенциальных компонент скоростей (рис. 3) и давлений потока относительно среднего поперечного сечения устройства.

При $\tilde{f}_{вх1} = 0,5$ и $\bar{f}_{вх1} = 0,02$, $\bar{f}_{вх2} = 0,04$ во второй половине рабочего объема устройства формируется выходной вихрь, мощность которого возрастает по мере продвижения к выходному отверстию первой половины. В выходных отверстиях наблюдаются осевые обратные токи, проникающие в камеру почти до среднего сечения.

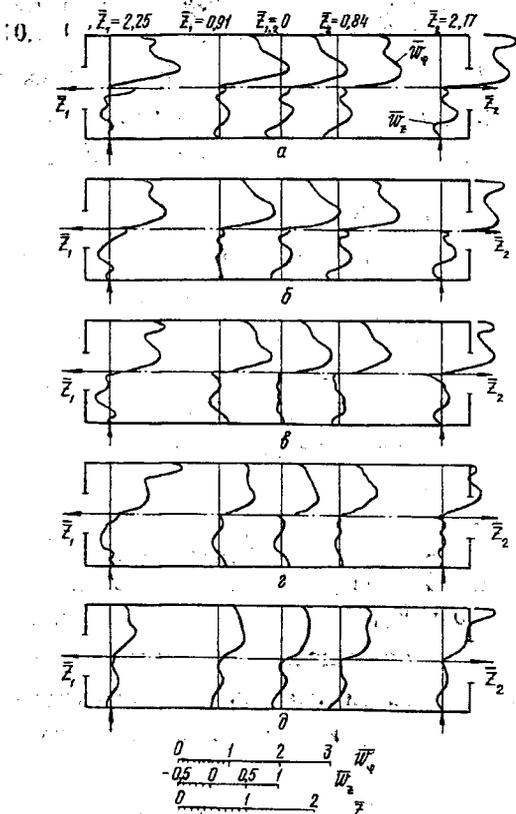


Рис. 3. Распределения безразмерных тангенциальной и осевой компонент полной скорости в рабочем объеме циклонного устройства ($\bar{f}_{вх2} = 0,04$) при различных значениях $\bar{f}_{вх1}$: а - 0,08; б - 0,06; в - 0,04; г - 0,02; д - 0,00

Таблица 2

$\tilde{f}_{\text{вх1}}$	$\bar{w}_{\text{фм}}$	$\bar{r}_{\text{фм}}$	$\bar{w}_{\text{фя}}$	$\bar{r}_{\text{я}}$	$\bar{w}_{\text{зм}}$	$\bar{r}_{\text{зм}}$	$\bar{p}_{\text{с.к}}$	$\bar{p}_{\text{с.вх}}$	$\zeta_{\text{вх}}$	$\zeta_{\text{фм}}$
2,0	1,44	0,34	0,90	0,81	0,08	0,46	3,58	3,76	4,38	2,11
	1,28	0,26	1,02	0,65	0,33	0,45	3,53	3,65	5,90	3,57
1,5	1,17	0,34	0,79	0,76	0,17	0,46	2,67	2,78	3,52	2,56
	1,16	0,30	0,92	0,68	0,22	0,45	2,86	2,90	4,59	3,41
1,0	1,00	0,40	0,70	0,74	0,18	0,46	2,10	2,26	3,25	3,25
	1,01	0,39	0,69	0,74	0,10	0,47	2,02	2,10	3,12	3,08
0,5	0,74	0,40	0,65	0,69	0,08	0,46	1,44	1,66	4,06	7,41
	0,69	0,39	0,50	0,78	0,07	0,51	1,00	1,03	1,45	3,04
0,0	0,53	0,52	0,42	0,64	0,10	0,40	0,89	1,01	1,98	7,06
	0,53	0,39	0,52	0,59	0,06	0,45	0,89	1,01	1,99	7,12

Уменьшение $\tilde{f}_{\text{вх1}}$ до 0 приводит к общему снижению уровня вращательных скоростей в рабочем объеме. При этом скорость $v_{\text{вх1}}$ обратно пропорционально возрастает, что заметно по распределениям $\bar{w}_{\text{ф}}$ в периферийной зоне течения. При увеличении $\tilde{f}_{\text{вх1}} > 1$ также наблюдается перестройка поля осевых скоростей. Симметрия распределения $\bar{w}_{\text{з}}$ относительно среднего поперечного сечения рабочего объема нарушается тем в большей степени, чем выше $\tilde{f}_{\text{вх1}}$. В первой половине начинает формироваться периферийный прямой вихрь, являющийся продолжением периферийного обратного вихря второй части камеры. Одновременно наблюдается повышение мощности выходного вихря, причем он начинает зарождаться и формироваться в первой половине камеры.

Процесс перестройки поля аксиальных скоростей определяет и общие изменения аэродинамических характеристик (рис. 3 и табл. 2). В качестве масштабной в табл. 2 и на рис. 3 принята условная средняя скорость потока в шлицах ($v_{\text{ср}} = 0,5 (v_{\text{вх1}} + v_{\text{вх2}})$). При анализе данных следует иметь в виду, что изменение $\tilde{f}_{\text{вх1}}$ по условиям проведения опытов обратно пропорционально изменяет $v_{\text{вх1}}$, а следовательно, и масштабную величину $v_{\text{ср}}$.

Размерные значения $w_{\text{фм}}$ и $p_{\text{с.к}}$ по длине рабочего объема устройства практически одинаковы.

Значения $\bar{w}_{\text{фм}}$ и $\zeta_{\text{вх}}$ циклонной камеры с двухсторонним выводом газов при различных $\tilde{f}_{\text{вх1}}$, $\tilde{f}_{\text{вх2}}$, $\bar{d}_{\text{вх1}} = \bar{d}_{\text{вх2}}$, $V_1 = V_2$ можно определить по следующим уравнениям:

при $0 < \tilde{f}_{\text{вх1}} \leq 1$

$$\bar{w}_{\text{фм}}^{\text{н}} = \bar{w}_{\text{фм}}^{\text{с}} (0,53 + 0,47 \tilde{f}_{\text{вх1}}); \quad (5)$$

при $1 \leq \tilde{f}_{\text{вх1}} \leq 2$

$$\bar{w}_{\text{фм}}^{\text{н}} = \bar{w}_{\text{фм}}^{\text{с}} (0,69 + 0,31 \tilde{f}_{\text{вх1}}); \quad (6)$$

при $0,5 \leq \tilde{f}_{\text{вх1}} \leq 2$

$$\zeta_{\text{вх1}}^{\text{H}} = \zeta_{\text{вх1}}^{\text{C}} (0,4 \tilde{f}_{\text{вх1}}^{-1,26} + 0,6 \tilde{f}_{\text{вх1}}); \quad (7)$$

$$\zeta_{\text{вх1}}^{\text{H}} = \zeta_{\text{вх1}}^{\text{C}} (0,95 \tilde{f}_{\text{вх1}} + 0,05). \quad (8)$$

В третьей серии опытов рассмотрена аэродинамика циклонного устройства с двухсторонними симметричными геометрическими условиями вывода и ввода газов, но с различными входными скоростями или расходами газов в первой и второй его половинах. При этом в первой половине входная скорость потока выдерживалась примерно постоянной, во второй — изменялась. Уменьшение $\tilde{v}_{\text{вх2}} = v_{\text{вх2}} / v_{\text{вх1}}$ приводит к общему снижению уровня тангенциальных и аксиальных скоростей (рис. 4).

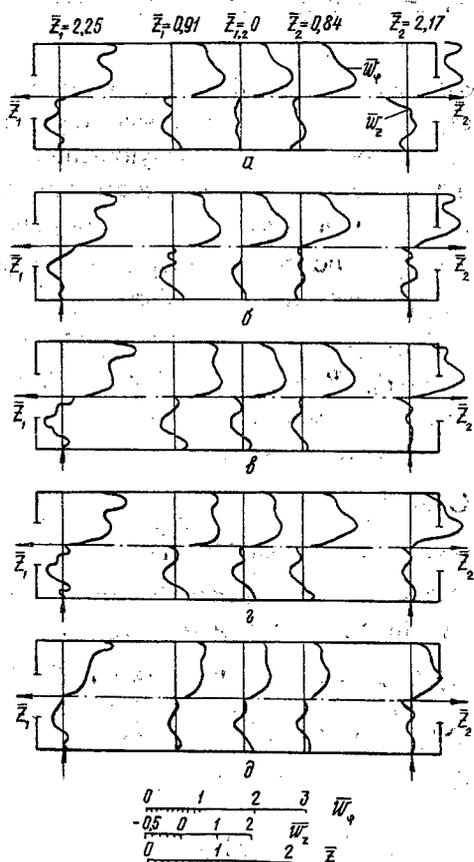


Рис. 4. Распределения безразмерных тангенциальной и осевой компонент полной скорости в рабочем объеме циклонного устройства при различных значениях $v_{\text{вх2}}$ и $v_{\text{вх1}}$: а — 35,1 м/с; 35,0 м/с; б — 26,1; 35,8; в — 17,2; 35,1; г — 12,0; 35,6; д — 0,0 м/с; 35,8 м/с

Таблица 3

$\bar{v}_{\text{вх}2}$	$\bar{w}_{\text{фм}}$	$\bar{r}_{\text{фм}}$	$\bar{w}_{\text{фя}}$	$\bar{r}_{\text{я}}$	$\bar{w}_{\text{зм}}$	$\bar{r}_{\text{зм}}$	$\bar{p}_{\text{с.к}}$	$\bar{p}_{\text{с.вх}}$	$\zeta_{\text{вх}}$	$\zeta_{\text{фм}}$
1,00	1,00	0,40	0,70	0,74	0,18	0,46	2,10	2,26	3,25	3,25
	1,01	0,39	0,69	0,74	0,10	0,47	2,02	2,10	3,12	3,08
0,73	0,89	0,34	0,74	0,71	0,15	0,46	1,77	1,64	3,37	4,25
	0,90	0,39	0,69	0,74	0,11	0,45	1,71	1,66	2,43	3,00
0,49	0,89	0,28	0,81	0,65	0,18	0,40	2,11	2,36	4,29	5,42
	0,97	0,39	0,62	0,83	0,03	0,26	1,76	1,69	2,15	2,28
0,34	0,88	0,46	0,86	0,60	0,18	0,40	2,32	2,54	4,90	6,33
	0,96	0,39	0,65	0,78	0,01	0,20	1,78	1,65	1,89	2,05
0,00	0,49	0,46	0,53	0,56	0,07	0,46	0,79	0,88	1,83	7,58
	0,58	0,45	0,41	0,64	0,01	0,20	0,79	0,88	1,87	5,63

Наиболее заметная перестройка осевых скоростей наблюдается во второй половине устройства. Связана она, вероятно, с понижением мощности периферийного обратного вихря, последующей его ликвидацией и заменой на периферийный прямой вихрь. Мощность выходного вихря при снижении $\bar{v}_{\text{вх}2}$ уменьшается. Образуется кольцевой обратный вихрь, который, пройдя через вторую половину камеры, сливается с выходным вихрем первой. При $\bar{v}_{\text{вх}2} = 0$ циклонное устройство работает по схеме с односторонним вводом газов (ввод газов в первую половину). В ранее рассмотренных опытах односторонний вариант ввода газов в устройство, но в его вторую половину, имел место при $\bar{f}_{\text{вх}1} = 0$.

Изменение $\bar{w}_{\text{фм}}$ и $\bar{p}_{\text{с.к}}$ вдоль рабочего объема устройства сравнительно невелико. Однако при $\bar{v}_{\text{вх}2} < 0,73$ имеется небольшое повышение уровня $\bar{w}_{\text{фм}}$ и снижение $\bar{p}_{\text{с.к}}$ в направлении выходного отверстия второй половины камеры. Основные аэродинамические характеристики потока в рассматриваемом устройстве при различных $\bar{v}_{\text{вх}2}$ приведены в табл. 3.

Значения $\bar{w}_{\text{фм}}$ и $\zeta_{\text{вх}}$ для циклонных камер с двухсторонним выводом газов при различных $v_{\text{вх}1}$, $v_{\text{вх}2}$, $\bar{d}_{\text{вых}1} = \bar{d}_{\text{вых}2}$, $\bar{f}_{\text{вх}1} = \bar{f}_{\text{вх}2}$ можно рассчитать по следующим формулам:

при $0 < \bar{v}_{\text{вх}2} \leq 1$

$$\bar{w}_{\text{фм}1}^{\text{H}} = \bar{w}_{\text{фм}1}^{\text{C}} (2,1 \bar{v}_{\text{вх}2}^3 - 3,81 \bar{v}_{\text{вх}2}^2 + 2,20 \bar{v}_{\text{вх}2} + 0,49); \quad (9)$$

$$\bar{w}_{\text{фм}2}^{\text{H}} = \bar{w}_{\text{фм}2}^{\text{C}} (2,5 \bar{v}_{\text{вх}2}^3 - 4,40 \bar{v}_{\text{вх}2}^2 + 2,32 \bar{v}_{\text{вх}2} + 0,58); \quad (10)$$

при $0,33 \leq \bar{v}_{\text{вх}2} \leq 1$

$$\zeta_{\text{вх}1}^{\text{H}} = \zeta_{\text{вх}}^{\text{C}} (0,83 \bar{v}_{\text{вх}2}^{-0,57} + 0,17 \bar{v}_{\text{вх}2}); \quad (11)$$

$$\zeta_{\text{вх}2}^{\text{H}} = \zeta_{\text{вх}}^{\text{C}} (0,4 \bar{v}_{\text{вх}2}^{2,4} + 0,6). \quad (12)$$

Результаты двух последних серий опытов были обработаны с использованием приведенной площади входа потока в камеру [3].

$$\bar{f}_{\text{вх.прив}} = \frac{4f_{\text{вх.прив}}}{\pi D_k^2} = \bar{f}_{\text{вх1}} + \bar{v}_{\text{вх2}} \bar{f}_{\text{вх2}}. \quad (13)$$

В результате получены следующие расчетные уравнения:

$$\bar{W}_{\text{фт1}}^{\text{н}} = \bar{W}_{\text{фт1}}^{\text{с}} [(\bar{f}_{\text{вх.прив}})^{-1,5} + 1,50 \bar{f}_{\text{вх.прив}} - 1,50]; \quad (14)$$

$$\bar{W}_{\text{фт2}}^{\text{н}} = \bar{W}_{\text{фт2}}^{\text{с}} (\bar{f}_{\text{вх.прив}})^{1,8}; \quad (15)$$

$$\zeta_{\text{вх1}}^{\text{н}} = \zeta_{\text{вх1}}^{\text{с}} [(\bar{f}_{\text{вх.прив}})^{-1,7} + 1,85 \bar{f}_{\text{вх.прив}} - 1,85]; \quad (16)$$

$$\zeta_{\text{вх2}}^{\text{н}} = \zeta_{\text{вх2}}^{\text{с}} [0,04 (\bar{f}_{\text{вх.прив}})^{4,5} + 1,36 \bar{f}_{\text{вх.прив}} - 0,40]. \quad (17)$$

Здесь $\bar{f}_{\text{вх.прив}}^{\text{н}} = \bar{f}_{\text{вх.прив}}^{\text{н}} / \bar{f}_{\text{вх.прив}}^{\text{с}}$ — отношение приведенных площадей входа потока для устройств с двухсторонними несимметричным и симметричным вводами газов.

Таким образом, параметры $\bar{d}_{\text{вых}}$, $\bar{f}_{\text{вх}}$ и $\bar{v}_{\text{вх}}$ позволяют активно воздействовать на общую схему осевых движений и структуру потока в циклонных устройствах с двухсторонним выводом газов. С технической точки зрения, вероятно, наибольший интерес представляет использование для этих целей $\bar{f}_{\text{вх}}$ и $\bar{v}_{\text{вх}}$.

Следует обратить внимание на то, что установленные в работе особенности аэродинамики циклонных устройств с двухсторонним выводом газов относятся к случаю ввода газов, смещенному к выходному торцу рабочего объема в обеих геометрических половинах устройства. (Такой ввод потока рекомендован [2] для повышения кратности внутренней рециркуляции газов.) Если по технологическим требованиям применена другая схема ввода, то для анализа аэродинамики циклонного устройства с двухсторонним выводом газов в первом приближении можно использовать имеющиеся разработки для циклонных камер с их односторонним выводом [2].

Выводы

1. Результаты выполненных опытов позволили установить общую схему механизма массообмена в рабочем объеме циклонных устройств с двухсторонними несимметричными условиями ввода и торцевого вывода потока.
2. Относительные площади входа и выхода газов являются геометрическими параметрами, оказывающими наиболее эффективное воздействие на аэродинамику рабочего объема циклонных устройств с двухсторонним торцевым выводом газов.
3. Предложенные в работе обобщающие уравнения для определения относительной максимальной скорости и аэродинамического сопротивления циклонных устройств с двухсторонними несимметричными условия-

ми ввода и вывода газов обеспечивают необходимую точность расчетов и рекомендуются для практического использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Сабуров Э.Н., Карпов С.В. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Под ред. Э.Н. Сабурова.- М.: Экология, 1993. - 368 с. [2]. Сабуров Э.Н. Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом / АГТУ.- Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. - 341 с. [3]. Циклонные топки /Л.Л. Калишевский, Б.Д. Кацнельсон, Г.Ф. Кнорре и др.; Под общ. ред. Г.Ф. Кнорре и М.А. Наджарова.- М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. - 216 с.

Поступила 12 февраля 1997 г.