

УДК 536.244.45

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ЦИКЛОННОЙ ЭЛЛИПСОЙ КАМЕРЫ

Э. Н. САБУРОВ, Ю. А. ВЛАСОВ, С. И. ОСТАШЕВ

Архангельский лесотехнический институт

Первые исследования аэродинамики и конвективного теплообмена в эллипсных циклонных камерах [1, 2] показали, что они могут быть использованы в ряде технологических процессов целлюлозно-бумажного, гидролизного и деревообрабатывающего производств.

Анализируемые в настоящей работе результаты опытов, являющиеся развитием и продолжением предыдущих, выполнены на циклонной камере, схема которой приведена на рис. 1.

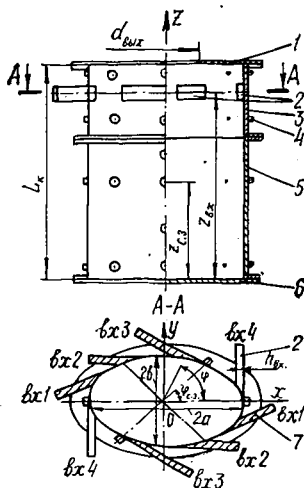


Рис. 1. Схема циклонной эллипсой камеры: 1 — пережим; 2 — входной шлиц; 3 — верхняя секция камеры — закручиватель; 4 — штуцер для крепления координатника; 5 — нижняя секция камеры; 6 — дно; 7 — вкладыш

Направляющая цилиндрического рабочего объема камеры — эллипс с полуосями $a = 165$ мм и $b = 125$ мм. Коэффициент сжатия эллипса $k = b/a = 0,758$. Общая длина камеры $L_k = 512$ мм. Длина закручивателя (верхней секции) 250 мм. Поверхность рабочего объема камеры технически гладкостенная.

Газ в камеру вводили в поперечной плоскости верхней секции, имеющей осевую координату $z_{вх} = 412$ мм или в безразмерном виде $\bar{z}_{вх} = z_{вх}/L_k = 0,8$. (Здесь и далее ось камеры совпадает с осью z . Координата z отсчитывается от глухого торца рабочего объема). В опытах применяли двухсторонний ввод газа. Шлицы размерами 20×80 мм (первое число — высота шлица $h_{вх}$) расположены симметрично относительно оси с противоположных сторон периметра эллипса по касательной к нему. Точка касания внешней поверхности входного канала и эллипса характеризуется координатами $x_{вх}$ ($x_{вх} = x_{вх}/a$) или углом $\varphi_{вх}$. Значения $x_{вх}$ для четырех вариантов подвода газа соответственно равны — 0,6; 0,0; 0,6; 1,0. Находящиеся с противоположной стороны эллипса одноименные шлицы имеют те же координаты x и равные по аб-

солотному значению, но противоположные по знаку координаты y . Углы $\varphi_{вх}$ соответственно равны 135 и 315°; 90 и 270°; 45 и 225°; 0 и 180°. Неработающие шлицы заглушали спрофилированными по контуру эллипса специальными вкладышами.

Относительная площадь входа $\bar{f}_{вх} = f_{вх}/S = 4,84 \cdot 10^{-2}$ ($f_{вх}$ — суммарная площадь входных каналов-шлицев; S — площадь поперечного сечения эллипса).

Газ из камеры выводили через плоский пережим с круглым выходным отверстием, соосным рабочему объему камеры. Диаметр выходного отверстия $d_{вых} = 124$ мм.

Скорости и давления измеряли трехканальным цилиндрическим (диаметр насадка 2,6 мм) и пятиканальным шаровым (диаметр шарика 5 мм) зондами по обычной методике. Зонды перемещали с помощью координатников. Точность определения угла вектора полной скорости по отношению к горизонтали составила 0,5°, перемещения зонда в радиальном направлении — 0,025 мм. Замеры в объеме камеры производили по установленному направлению через 5 мм. Относительные погрешности определения скоростей и давлений потока в основном диапазоне их значений и средних температур, с учетом относительных ошибок в определении тарировочных коэффициентов зондов, не превышали для цилиндрического и шарового зондов соответственно $\pm 4,6$ и $\pm 6,0$ %.

Сечения, в которых измеряли скорости и давления, имели безразмерные осевые координаты $z_{с.з.}$, равные 0,96; 0,665; 0,28; 0,06. Во всех сечениях скорости и давления снимали по малой и большой осям эллипса, а в двух из них еще дополнительно по промежуточным направлениям, проходящим через его центр и характеризующимся углами $\varphi_{с.з.}$, равными 45, 135, 225, 215° (рис. 1).

Статическое давление в камере измеряли в 70 точках на ее дне и в 16 точках по высоте и периметру на боковой поверхности рабочего объема и в шлицах. Диаметр дренажных отверстий 0,5 мм.

Расход воздуха на установку контролировали нормальной диафрагмой, температуру — ртутным термометром ТЛ-4 с ценой деления 0,1 °С.

Для визуализации течения часть опытов производили в эллиптической камере, выполненной из оргстекла. В этом случае в качестве рабочего тела использовали воду. Камера имела следующие характеристики: $a = 73$ мм; $b = 55$ мм; $k = 0,75$; $L_k = 353$ мм; $\bar{f}_{гх} = 5 \cdot 10^{-2}$; $h_{вх} = 12$ мм; $d_{вых} = 12,5$; 25,0; 87,5; 50,0; 62,5; 75,0; 100,0 мм или $\bar{d}_{вых} = 0,1$; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8.

Кроме того для визуализации течения у боковой и торцевой поверхностей камеры применяли спиртовые чернила, которые вводили в воздушный поток в виде мельчайших капелек.

На рис. 2 показаны схемы движения потока в камере, полученные на основе опытных данных, а также распределения безразмерной аксиальной составляющей скорости $\bar{w}_z = w_z/v_{вх}$ ($v_{вх} = V/f_{вх}$ — условная средняя скорость потока в шлицах; V — объемный расход газа через камеру) в продольных сечениях камеры, проходящих через ее ось, большую и малую оси эллипса. В нижней части рис. 2 даны схемы движения потока в проекции на поперечную плоскость с $z_{с.з.} = 0,665$ и распределения безразмерной тангенциальной составляющей скорости $\bar{w}_\varphi = w_\varphi/v_{вх}$. Представленные данные относятся к двум предельным вариантам подвода газа в рабочий объем, когда шлицы перпендикулярны малой и большой осям эллипса.

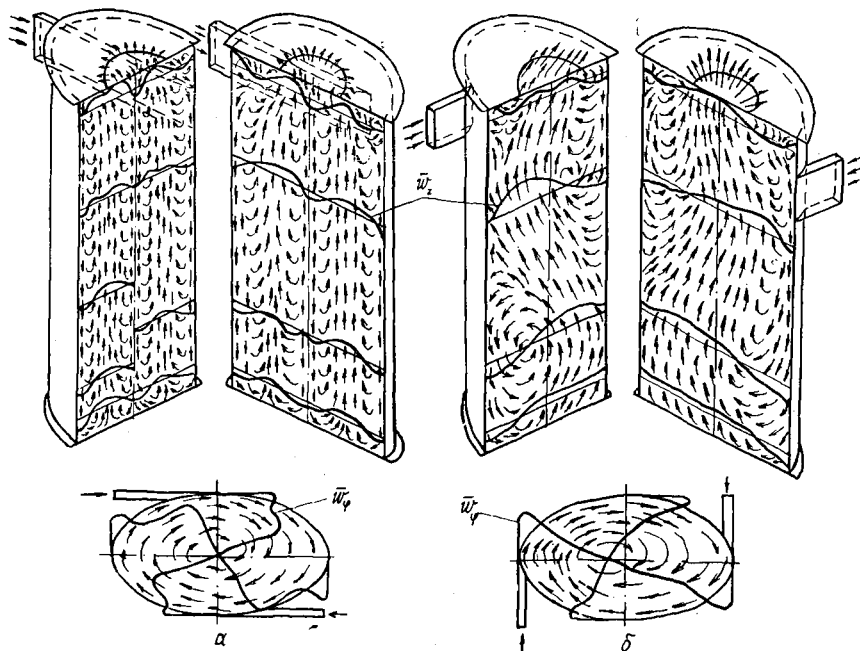


Рис. 2. Схема движения потоков и распределения аксиальной и тангенциальной компонент полной скорости потока в циклонной эллипсной камере с подводом газа в рабочий объем по вариантам 2 (а) и 4 (б)

Как видно из рис. 2, течение газа в эллипсной циклонной камере отмечается большой сложностью. Для обоих вариантов подвода газа в общем случае ось вращения потока не совпадает с осью камеры. Однако, если при подводе газа перпендикулярно малой оси, с технической точки зрения, можно считать это отклонение пренебрежимо малым и саму ось вращения прямолинейной, то при подводе газа перпендикулярно большой оси (оси сжатия) этим смещением пренебречь нельзя, так как оно весьма существенно. Ось вращения в этом случае является сложной пространственной кривой.

В варианте подвода, показанном на рис. 2, а, практически осесимметричны распределения осевых скоростей. При существенном смещении входных шлицев к выходному торцу камеры в ее рабочем объеме наблюдаются прямой и обратный периферийные, осевой обратный и кольцевой выходной вихри. Схема осевых перемещений потока носит характер, типичный для круглых циклонных камер при соответствующем вводе газа.

В варианте подвода, изображенном на рис. 2, б, общая картина течения значительно сложнее. Распределения ω_z несимметричны относительно оси вращения и оси камеры. Снижение интенсивности вращения потока привело к практически полной ликвидации роли приторцевых потоков. В рабочем объеме камеры наблюдались зоны замкнутых циркуляционных течений, заполняющих его части, не занятые сложным пространственным выходным и опускным вихрями.

Истечение газов из выходного отверстия происходит с одной стороны.

Следует заметить, что в эллиптической циклонной камере, как и в круглой цилиндрической, $\bar{\omega}_z$ значительно меньше $\bar{\omega}_\varphi$. Исключение составляет лишь зона стока в выходном отверстии, где они становятся соизмеримыми.

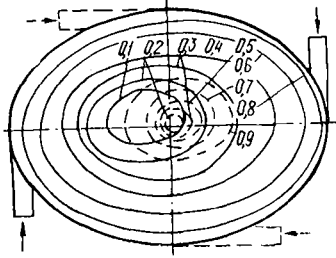


Рис. 3. Изотахи в поперечном сечении эллиптической камеры при различных значениях v и двух вариантах ввода газа в камеру: пунктирная линия — вариант 2; сплошная — вариант 4

При подводе газа перпендикулярно малой оси эллипса распределения тангенциальной скорости потока имеют вид, характерный для циклонных камер с торцевым выводом газов. В периферийной зоне течения значения \bar{w}_φ по малой оси эллипса выше, чем по большой. Максимальное значение \bar{w}_φ на малой оси наблюдается при $\bar{y} = x/b = 0,4$, на большой — при $\bar{x} = x/a = 0,44$. Минимальные значения \bar{w}_φ имеют место соответственно при $\bar{y} = 0,768$ и $\bar{x} = 0,794$.

Качественный характер распределения безразмерных статического $\bar{p}_c = 2p_c/\rho_{вх}v_{вх}^2$ ($\rho_{вх}$ — плотность потока в щлицах) и полного $\bar{p}_n = 2p_n/\rho_{вх}v_{вх}^2$ давлений аналогичен по обеим осям. В периферийной (пристенной) зоне течения \bar{p}_n сравнительно слабо изменяется по периметру.

Величины \bar{p}_c различаются более существенно. Разность их в пристенном слое в вершинах эллипса составляет $0,37 \dots 0,43$.

При подводе газа в вершинах эллипса перпендикулярно его большой оси распределения \bar{w}_φ не имеют «квазипотенциальной» зоны. В области малой оси уровень \bar{w}_φ также несколько выше, чем в области большой. Однако эти расхождения меньше, чем в предыдущем случае. На оси эллипса тангенциальная составляющая скорости в обоих сечениях не равна нулю, хотя и имеет сравнительно небольшое значение. Значительно ниже в рассматриваемом варианте подвода газа и общий уровень полной и тангенциальной составляющей скорости.

Интересно отметить, что в обоих случаях статическое давление на оси эллипса, в отличие от \bar{w}_φ , равно нулю.

Смещение оси вращения потока с оси эллипса подтверждается также изотахами (рис. 3), построенными по полученным в опытах распределениям полной скорости потока v (или $\bar{v} = v/v_{вх}$), и изобарами на поверхности глухого торца рабочего объема камеры (рис. 4).

Представленное на рис. 4 распределение безразмерного избыточного статического давления на торцевой поверхности рабочего объема $\bar{p}_{с.т} = 2p_{с.т}/\rho_{вх}v_{вх}^2$ при двух предельных вариантах подвода газа полностью подтверждает отмеченные особенности изменения полной скорости и ее компонент. По мере смещения к оси вращения поток все больше приближается к осесимметричному.

Следует отметить, что в рассматриваемой эллиптической камере при всех вариантах подвода газа наблюдается неравномерность раздачи воздуха по щлицам. Если ее характеризовать соотношением избыточного статического давления в щлицах верхней части поперечного сечения камеры (см. рис. 1) и нижней, то можно отметить, что в вариантах подвода 1...4 оно равняется 1,2; 0,93; 0,95; 2,23. Наибольшая неравномерность распределения газа по щлицам выявлена в варианте подвода в вершинах эллипса на его большей оси. (Именно в этом слу-

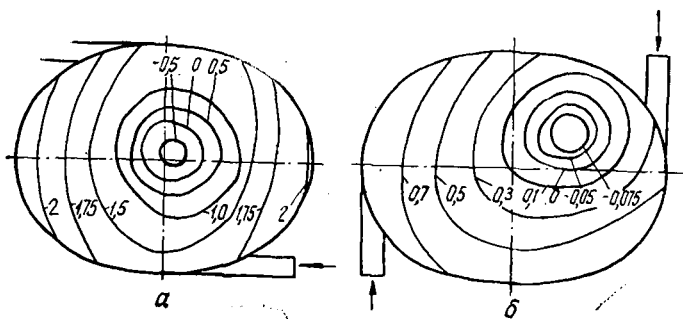


Рис. 4. Изобары на поверхности глухого торца эллипсной камеры с подводом газа в рабочий объем по вариантам 2 (а) и 4 (б) при различных значениях $\bar{p}_{с.т}$

чае выходящая из шлицев струя атакует боковую поверхность камеры, имеющую в поперечном сечении наименьший радиус кривизны.) Неравномерность распределения газа по шлицам приводит к асимметрии загрузки объема камеры.

При подводе газа перпендикулярно малой оси распределение безразмерного избыточного статического давления на боковой поверхности рабочего объема камеры $\bar{p}_{с.к} = 2\bar{p}_{с.к}/\rho_{вх}v_{вх}$ (рис. 5) сравнительно слабо изменяется по его длине (в пределах 5...7%). В общем зависимость $\bar{p}_{с.к}(\varphi)$ имеет вид деформированного эллипса со значениями $\bar{p}_{с.к}$, близкими по величине в противоположных вершинах. Деформированность кривых $\bar{p}_{с.к}(\varphi)$ связана как с влиянием вводимых в камеру струй газа (атакующее воздействие на стенку и эжекционный эффект), так и с небольшим, но все-таки имеющим место смещением оси вращения потока и изменением уровня $\bar{\omega}_\varphi$ в пристенной зоне по периметру камеры. Так, максимальные значения $\bar{p}_{с.к}$ наблюдали при углах φ (см. рис. 1), равных примерно 0...5° и 180...187°, т. е. вблизи вершин эллипса на его большой оси. Наибольшие значения $\bar{p}_{с.к}$ равны примерно 2,20...2,26 и 2,16...2,35 соответственно. Меньшие значения в этих диапазонах относятся к нижним (ближайшим к глухому торцу) поперечным сечениям рабочего объема. Минимальные $\bar{p}_{с.к}$ имели место при φ примерно 90 и 270°, т. е. в вершинах на малой оси. Минимальные значения $\bar{p}_{с.к}$ равны соответственно 1,68...1,78 и 1,75...1,90.

Совершенно другой характер зависимости $\bar{p}_{с.к}(\varphi)$ имел место в камере с вводом газа перпендикулярно большой оси. В данном случае распределение $\bar{p}_{с.к}(\varphi)$ существенно зависит не только от φ , но и от \bar{z} .

Полученные данные подтверждают ранее сделанный вывод о пространственном изменении (по длине и углу) оси вращения потока в эллипсной камере с рассматриваемым вводом газа. Распределения $\bar{p}_{с.к}(\varphi, \bar{z})$ полностью отражают и сложную структуру циклонного потока. Максимальные значения $\bar{p}_{с.к}$ наблюдаются при φ примерно 0,0...22,5° и 152...180° и равны соответственно 0,43...0,93 и 0,63...1,05, минимальные — при углах 45...96° и 225...270° и равны соответственно 0,18...0,47 и 0,24...0,44. Распределения $\bar{p}_{с.к}(\varphi)$ не симметричны, сильно различаются в зависимости от продольной координаты. Положение максимумов и минимумов $\bar{p}_{с.к}$ существенно меняется

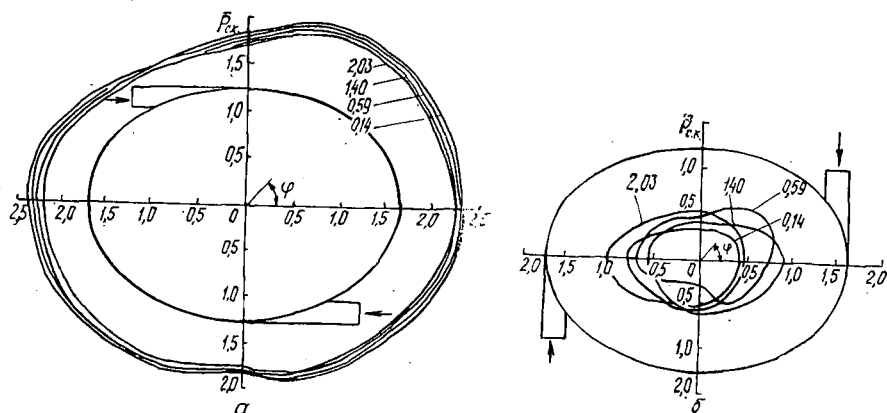


Рис. 5. Распределение избыточного давления на боковой поверхности рабочего объема эллиптической камеры с подводом газа в рабочий объем по вариантам 2 (а) и 4 (б) при различных значениях $z_{c.з}$

по длине камеры. В сечении, ближайшем к глухому торцу, вообще отсутствует второй минимум $\bar{p}_{c.к.}$, что, вероятно, является следствием значительного смещения оси вращающегося потока с оси рабочего объема.

Варианты подвода 1 и 3 по положению их на образующей камеры являются промежуточными по отношению к рассмотренным предельным 2 и 4. В вариантах 4 и 1 вводимая в рабочий объем струя газа распространяется у стенки в направлении роста радиуса ее кривизны, а в вариантах 2 и 3 — уменьшения. Различаются варианты и величиной радиуса кривизны входной кромки боковой поверхности камеры, а также величиной входного момента.

Анализ полученных данных показал, что по аэродинамике камеры и ее сопротивлению варианты 1, 4 и 2, 3 попарно близки между собой. Так, коэффициент сопротивления циклонной камеры по входным условиям $\xi_{вх} = 2\Delta P_{п.}/\rho_{вх}v_{вх}^2$ ($\Delta P_{п.}$ — перепад полного давления в камере) для вариантов ввода 1...4 составляет соответственно 2,05; 2,72; 2,36; 2,10. Его входная составляющая $\xi_{вх.к} = 2\Delta P_{п.вх.к.}/\rho_{вх}v_{вх}^2$ ($\Delta P_{п.вх.к.}$ — разность средних полных давлений во входном сечении и шлицах) в процентах от $\xi_{вх}$ для рассмотренных вариантов равна соответственно 69,0; 28,7; 15,7; 69,0. Выходная составляющая $\xi_{1,вх} = 2\Delta P_{п.вых.к.}/\rho_{вх}v_{вх}^2$ ($\Delta P_{п.вых.к.}$ — разность средних полных давлений в сечении перед выходным отверстием и за камерой) также в процентах от $\xi_{вх}$ равна соответственно 37; 77; 83; 41. При упорядоченном течении (варианты 2, 3), как и в обычных циклонных круглых камерах, выходная составляющая $\xi_{вх}$ является наибольшей. Интересно заметить, что в варианте подвода 2 площадь выхода потока из камеры примерно в два раза больше, чем в варианте 4. Величина входных потерь определяется возможностями расширения струи на входе в камеру и величиной статического давления в этой зоне.

Полученные в работе данные позволили предположить, что местоположение наиболее целесообразного ввода газов в эллипсную циклонную камеру в определенной степени может зависеть от ее относительной длины, коэффициента сжатия эллипса, а также от суммарной относительной площади входа потока, высоты шлицев, их числа и распределенности по периметру камеры.