

Р. Р. Усманова, Г. Е. Заиков, Р. Я. Дебердеев

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И АЭРОДИНАМИКИ ИНЕРЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЫЛИ В РОТОКЛОНЕ

Ключевые слова: ротоклон; аэродинамическое профилирование; ударно-инерционный; эффективность пылеулавливания; лопатки импеллера; гидравлическое сопротивление.

Разработана новая конструкция аппарата ударно-инерционного действия с управляемой гидродинамикой, предназначенного для оптимизации процесса очистки газов с учетом характеристик улавливаемых компонентов. Возможность аэродинамического профилирования лопаток импеллера позволила значительно снизить гидравлическое сопротивление устройства. Оценка эффективности осаждения пыли по инерционной модели позволила учесть как характеристики улавливаемой пыли (размер и плотность частиц), так и размеры капель орошающей жидкости.

Keywords: rotoclon; aerodynamic profiling; shock-inertial; dust clearing efficiency; impeller blades; hydraulic resistance.

A new design of the device shock- inertia action regulate hydrodynamics. A apparatus is intended for optimization of process of cleaning of gases, it takes into account descriptions of the caught components. Possibility of the aerodynamic profiling of shoulder-blades of impeller allowed considerably to reduce hydraulic resistance of device. The evaluation of dust deposition efficiency to inertial model takes into account specifications caught dust (size and density of particles) and sizes of drops of irrigating liquid.

Состояние вопроса, актуальность

На основе анализа конструкций газоочистных аппаратов ударно-инерционного действия установлено, что многие устройства работают в узком диапазоне изменения скорости газа в контактных каналах и используются в промышленном производстве в основном для очистки газов от крупнодисперсной пыли в системах аспирации вспомогательного оборудования. Известные аппараты весьма чувствительны к изменению газовой нагрузки на контактный канал и уровню жидкости, незначительные отклонения этих параметров от оптимальных значений приводят к расквашке уровней жидкости у контактных каналов, неустойчивому режиму работы и снижению эффективности пылеулавливания. Из-за низких скоростей газа в контактных каналах такие устройства имеют большие габариты. [1,2] Эти недостатки, а также слабая изученность протекающих в аппаратах процессов, отсутствие надежных методов их расчета затрудняют разработку новых рациональных конструкций мокрых пылеуловителей данного типа и их широкое внедрение в производство. В связи с этим назрела необходимость более детального теоретического и экспериментального изучения газопромывателей ударно-инерционного действия с целью понимания физического механизма инерционной сепарации, управления и оптимизации процессов в системах очистки промышленных газов.

Экспериментальные исследования

Ротоклон представляет собой резервуар с водой, на поверхность которой по патрубку ввода запыленного газа поступает газодисперсная смесь. Над поверхностью воды газ разворачивается, а содержащаяся в газе пыль по инерции проникают в жидкость. Поворот лопаток импеллера производится вручную, относительно друг друга на резьбовом соединении посредством маховиков. Угол наклона лопаток устанавливался в интервале 25° - 45° к оси.

В ротоклоне установлены три пары лопастей синусоидального профиля, выполненные с возможностью регулирования их положения. В зависимости от запыленности пылегазового потока нижние лопасти с помощью маховиков устанавливаются на угол, определяемый режимом работы устройства. Ротоклон характеризуется наличием трех щелевых каналов, образуемых верхними и нижними лопастями, причем в каждом последующем по ходу газа канале нижняя лопасть устанавливается выше предыдущей. Такое расположение способствует постепенному входу газожидкостного потока в щелевые каналы и снижает тем самым гидравлическое сопротивление устройства. Расположение входной части лопастей на оси с возможностью их поворота позволяет создавать активную зону диффузии. Последовательно расположенные щелевые каналы создают в диффузионной зоне, образованной углом поворота лопастей, гидродинамическую зону интенсивного смачивания частиц пыли. По мере перемещения потока через жидкостную завесу, обеспечивается возможность многократного пребывания частиц пыли в гидродинамически активной зоне, что значительно повышает эффективность пылеулавливания и обеспечивает работу устройства в широких диапазонах запыленности газового потока. Отмеченные особенности конструкции не позволяют корректно использовать имеющиеся решения по гидродинамике газодисперсных потоков для разработанной конструкции. В связи с этим, для обоснованного описания процессов, происходящих в аппарате, возникла необходимость проведения экспериментальных исследований.

Эксперименты проводились на лабораторной установке «ротоклон», представленной на рис.1. Исследуемый ротоклон имел 3 щелевых канала, скорость газа в которых составляла до 15 м/с. При этой скорости ротоклон имел гидравлическое сопротивление 800 Па. Работая в таком режиме, он обеспечивал эффективность улавливания пыли с входной концен-

трацией $0,5 \text{ г/нм}^3$ и плотностью 600 кг/м^3 на уровне $96,3 \%$ [3].



Рис. 1- Экспериментальная установка «ротоклон»

В качестве модельной системы были использованы воздух и порошок талька с размером частиц $d=2 \div 30 \text{ мкм}$. Корпус аппарата заполнялся водой на уровень $h_{ж}=0,175\text{м}$.

Запыленность пылегазовой смеси определялась прямым методом. На прямых участках трубопровода до и после аппарата производился отбор проб пылегазовой смеси. После установления соответствующего режима работы аппарата, пробы газа отбирались с помощью заборных трубок. Для соблюдения изокINETичности отбора проб на заборных трубках применялись сменные наконечники различных диаметров. Полное улавливание пыли, содержащейся в отобранной пробе пылегазовой смеси, производилось путем внешней фильтрации просасыванием смеси с помощью оттарированного электроасpirатора ЭА-55 через специальные аналитические фильтры АФА-10, которые вставлялись в фильтрующие патроны. Время отбора фиксировалось по секундомеру, а скорость - ротаметром электроасpirатора ЭА-55.

Расход воды определяется потерями ее на испарение и с удаляемым шламом. Слив воды производится небольшими порциями из бункера, снабженного пневматическим затвором. Закрытие затвора осуществляется быстрым повышением давления воздуха в камере затвора, открытие — сбросом давления. Небольшое снижение уровня быстро компенсируется доливом через патрубок ввода жидкости. При периодическом сливе сгустившегося шлама расход воды определяется консистенцией шлама и составляет в среднем до 10 г на 1 м^3 воздуха, а при постоянном сливе расход не превышает $100\text{—}200 \text{ г}$ на 1 м^3 воздуха. Заполнение ротоклона водой регулировалось с помощью датчика уровня. Поддержание постоянного уровня воды имеет существенное значение, так как его колебания влекут за собой заметное изменение как эффективности, так и производительности устройства.

Анализ результатов эксперимента

В ротоклоне реализуется процесс взаимодействия газовой, жидкой и твердой фаз, в результате которого твердая фаза (пыль), диспергированная в газе, переходит в жидкость. Протекающие при этом гидродинамические процессы можно распределить на

следующие последовательно протекающие стадии: на входе в лопатки импеллера происходит захват жидкости газовым потоком; интенсивное дробление жидкости газовым потоком с образованием жидкостной завесы; коагуляция дисперсных частиц каплями жидкости; сепарация капель жидкости от газа в лабиринтном каплеуловителе [4].

При наблюдении через смотровое окно можно видеть, что весь рабочий объем аппарата заполнен газожидкостной пеной и брызгами. Однако этот эффект характерен только для слоя, непосредственно примыкающего к смотровому окну, он может быть объяснен торможением потока у торцевой стенки. Рассмотрение замедленной съемки позволяет установить истинную картину течения. Поток газа движется по траектории наименьшего пути, пытаясь прорваться через жидкость. Стоящие последовательно лопатки импеллера при данных условиях ограничивают пространство воздушной струи, заставляя ее резко изменить свое направление, что благоприятствует процессу сепарации. Качественная очистка газа от пыли будет достигнута только в случае эффективного захвата жидкости газовым потоком, иначе не будет происходить эффективного перемешивания фаз в контактных каналах. Следовательно, захват жидкости газовым потоком при последовательном прохождении лопаток импеллера является одной из важнейших стадий гидродинамического процесса в ротоклоне.

Процесс захвата жидкостного слоя газовым потоком реализуется благодаря наличию турбулентных пульсаций, которые формируются на границе раздела газовой и жидкой фаз. Предпосылками для возникновения турбулентных вихрей могут послужить различие в вязкости потоков, поверхностное натяжение жидкой фазы, а также наличие на поверхности раздела градиента скоростей фаз.

Оценка эффективности газоочистки

Количественную оценку эффективности захвата в аппаратах ударно-инерционного типа с внутренней циркуляцией жидкости целесообразно проводить с помощью показателя $n = L_{ж}/L_{г}$, $\text{м}^3/\text{м}^3$ равного отношению объемов жидкой и газовой фаз в контактных каналах и характеризующего удельное орошение газа в каналах. Очевидно, что величина n , в первую очередь, будет определяться скоростью газового потока на входе в контактный канал. Следующим важным параметром является уровень жидкости на входе в контактный канал, который может изменять сечение канала и влиять на скорость газа:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{S_2}{bh_k - bh_{жс}} - \frac{S_2}{b(h_k - h_{жс})},$$

где S_2 — эффективная площадь контактного канала; b — расстояние между лопатками импеллера; h_k — высота канала; $h_{жс}$ — уровень жидкости.

Таким образом, для определения эффективности захвата жидкости газовым потоком в контактных каналах ротоклона достаточно экспериментальным путем получить следующую зависимость:

$$n = f(S_2 \cdot h_{жс})$$

Как было установлено экспериментально, от размера капель жидкости во многом зависит эффективность улавливания частиц пыли: с уменьшением размера капель эффективность пылеулавливания повышается. Таким образом, данная стадия гидродинамического взаимодействия фаз является весьма важной. Для расчета среднего диаметра капель, образующихся при прохождении лопаток импеллера, получена эмпирическая зависимость:

$$d = \frac{585 \cdot 10^3 \sqrt{\zeta}}{g_0} + 21.375 \cdot \left(\frac{\mu_{жс}}{\sqrt{\rho_{жс} \zeta}} \right)^{0.73} \frac{L_{жс}}{L_r}$$

где g_0 — относительная скорость газов в канале, м/с; ζ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; $\rho_{жс}$ — плотность жидкости, кг/м³; $\mu_{жс}$ — вязкость жидкости, Па/с; $L_{жс}$ — объемный расход жидкости, м³/с; L_r — объемный расход газа, м³/с.

Предложенная формула позволяет производить расчет с учетом физических характеристик фаз и режимных параметров процесса газоочистки.

На рис.2. представлены расчетные значения среднего диаметра капель, образующихся при прохождении лопаток импеллера, от скорости газа в контактных каналах и удельного орошения газа. При расчете принимались значения физических свойств воды при температуре 20° С: $\rho_{жс} = 998 \text{ кг/м}^3$; $\mu_{жс} = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{С/м}^2$, $\zeta = 72,86 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

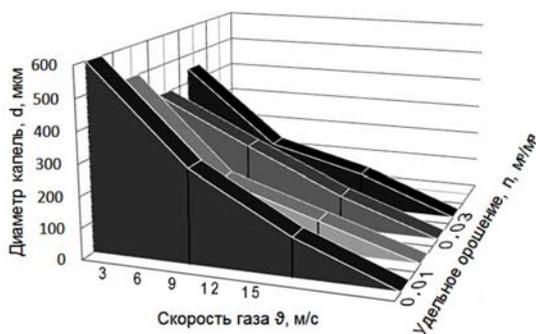


Рис. 2 - Расчетная зависимость размера капель от скорости потока и удельного орошения

В результате эксперимента установлено, что исследуемая пыль не содержит частиц диаметром более 50 мкм, кроме того, в пыли содержится около 65% частиц диаметром менее 15 мкм, из них около половины диаметром до 10 мкм. Полученные зависимости свидетельствуют о том, что определяющими режимными параметрами, от которых зависит средний размер капель в контактных каналах ротоклона, являются скорость газового потока g_0 и удельное орошение газа n . Именно эти параметры определяют гидродинамическую структуру образующегося газожидкостного потока.

Степень очистки газовых выбросов в аппаратах ударно-инерционного действия может быть найдена только на основе эмпирических сведений по конкретным конструкциям аппаратов. Методы расчетов, нашедшие применение в практике проектирования, основаны на допущении о возможности линейной аппроксимации зависимости степени очистки от диа-

метра частиц в вероятностно-логарифмической системе координат. Расчеты по вероятностному методу выполняются по той же схеме, что и для аппаратов сухой очистки газов [1,2].

Ударно-инерционное осаждение частиц пыли происходит при обтекании капель жидкости запыленным потоком, в результате чего частицы, обладающие инерцией, продолжают двигаться поперек изогнутых линий тока газов, достигают поверхности капель и осаждаются на них.

Эффективность ударно-инерционного осаждения η_u является функцией следующего безразмерного критерия:

$$\eta_u = f\left(\frac{m_c}{\xi_c} \cdot \frac{g_c}{d_0}\right)$$

где m_c — масса осаждаемой частицы; g_c — скорость частицы; ξ_c — коэффициент сопротивления движения частицы; d_0 — диаметр сечения капли.

Для шарообразных частиц, движение которых подчиняется закону Стокса, этот критерий имеет следующий вид:

$$\frac{m_c g_c}{\xi_c d_0} = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_c^2 g_c \rho_c C_k}{\mu_c d_0}$$

Комплекс $d_c^2 g_c \rho_c C_k / (18 \mu_c d_0)$ является параметром (числом) Стокса

$$\eta_u = f(Stk) = f\left(\frac{d_c^2 g_c \rho_c C_k}{18 \mu_c d_0}\right)$$

Таким образом, эффективность улавливания частиц пыли в ротоклоне по инерционной модели зависит главным образом от характеристики улавливаемой пыли (размера и плотности улавливаемых частиц), что отображено на рис. 3, а также от режимных параметров, важнейшим из которых является скорость газового потока при прохождении через лопатки импеллеров.

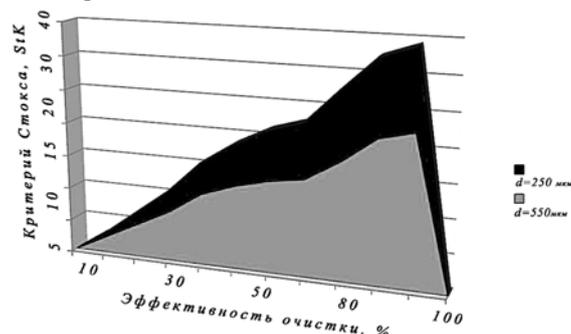


Рис. 3 - Зависимость эффективности очистки газа от критерия StK

Рассмотренная инерционная модель достаточно полно характеризует физику процесса, протекающего в контактных каналах ротоклона.

Аэродинамическое профилирование лопаток импеллера

Для уменьшения гидравлического сопротивления целесообразно применять аэродинамически рациональное профилирование лопаток импеллера.

Придание лопаткам импеллера синусоидального профиля позволяет устранить отрыв потока на

кромках. При этом происходит обтекание входного участка профиля лопаток с большой постоянной скоростью и увеличение рикошетов от профилированной части лопаток с учетом которых можно прогнозировать незначительное увеличение эффективности очистки газа. Схема расчета профилированных лопаток изображена на рис. 4.

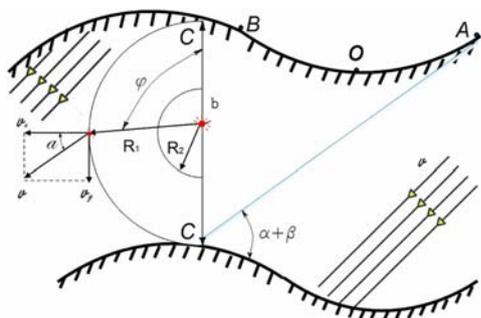


Рис. 4 – Расчетная схема профилированных лопаток импеллера

Во входной части газодисперсного потока свободные границы струи заменяются профилированными каналами лопаток импеллера. В точке удара O набегающий поток дробится и обтекает криволинейную поверхность AB , при этом скорость достигает максимального значения v_{max} и сохраняется постоянной по длине всего участка. В сечении C поток можно рассматривать как однородный, движущийся со скоростью v , причем лопатки импеллера имеют конечную толщину, отрыва потока от лопаток импеллера не происходит. Обтекание потока осуществляется без потерь полного давления до критического сечения $C-C$, после которого статическое давление в потоке начинает падать. Гидродинамически целесообразно профилировать лопатки импеллера с учетом различных значений скоростей в пределах щелевых каналов. Таким образом, газодисперсный поток может быть повернут на любой необходимый угол с наименьшими гидравлическими потерями.

Как показали результаты эксперимента, изменение угла α от 30° до 45° приводит к увеличению проходного сечения потока $R_2 - R_1$ при изменении направления движения газа и увеличению b после его поворота. Проходное сечение потока b увеличивается в среднем в 1,55 раза. При этом скорость газа при прохождении через лопатки импеллера снижается, что влечет за собой уменьшение тангенциальной компоненты v_y скорости дисперсных частиц. Центробежная сила инерции, отвечающая за отделение частиц от газового потока и определяющая приращение радиальной компоненты v_x скорости частиц, при этом также снижается. Расширение струи $R_2 - R_1$ способствует увеличению траектории движения частиц при сепарации, а это в свою очередь ведет к значительному росту вторичного уноса пыли.

Поток запыленного газа, проходящий через лопатки импеллера, можно схематизировать плоским

поток несжимаемой жидкости, который подходит к решетке под углом α со скоростью v и при повороте около кромок лопаток теряет частицы пыли, рикошетирующие от лопаток. Очищенный газ отрывается от кромок лопаток, образуя в щелевых каналах между ними отрывные зоны с приблизительно постоянным давлением. Границы отрывных зон можно рассматривать как линии разрыва касательных скоростей в идеальной (невязкой) жидкости. Определение полей скоростей газа при прохождении через лопатки импеллера достаточно затруднительно. Задачу расчета можно упростить, если при исследовании процесса сепарации пыли рассматривать приближенную модель газового потока, учитывающую установленные при более точном расчете основные закономерности полей скоростей газодисперсной среды.

Таким образом, если заданы конструктивные параметры лопаток импеллера, можно рассчитать распределение скоростей газа при обтекании ее газодисперсным потоком. Зная скорости газа в различных точках газовой струи, можно определить силы аэродинамического сопротивления, от которых зависят траектории движения твердых частиц в щелевых каналах.

Выводы

Основные научные и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1. Разработана новая конструкция ротоклона, позволяющая решить задачу эффективной сепарации пыли из газового потока. В представленном аппарате подвод воды к зонам контакта осуществляется в результате ее циркуляции внутри самого устройства.

2. Теоретически получены и подтверждены данными непосредственных измерений значения эффективности ударно-инерционного осаждения дисперсных частиц в ротоклоне. Полученные расчетные соотношения позволяют оценить вклад как характеристик улавливаемой пыли (размера и плотности частиц), так и режимных параметров, важнейшим из которых является скорость газового потока при прохождении через лопатки импеллеров.

3. Экспериментально установлено, что аэродинамическое профилирование лопаток импеллера по синусоидальной кривой позволяет значительно снизить гидравлическое сопротивление устройства. При этом происходит увеличение эффективности очистки газа благодаря обтеканию входного участка профиля лопаток с большой постоянной скоростью и увеличению рикошетов от профилированной части лопаток.

Литература

1. В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг *Очистка промышленных газов от пыли*. Химия, Москва, 1981. 280 с.
2. В. Страус *Промышленная очистка газов*. Химия, Москва, 1981. 616 с.
3. Пат. РФ 2317845 (2008).
4. В.С. Швыдкий *Очистка газов. Справочник*. Теплоэнергетик, Москва, 2002. 640 с.