

УДК 628.5:532.527

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЕРЦИОННОГО МЕХАНИЗМА ОСАЖДЕНИЯ ПЫЛИ В РОТОКЛОНЕ

Р. Р. УСМАНОВА¹, В. С. ЖЕРНАКОВ²

¹regina_ugatu@mail.ru, ²sm_ugatu@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.11.2013

Аннотация. Рассмотрен новый перспективный аппарат ударно-инерционного действия с управляемой гидродинамикой, позволяющей оптимизировать процесс очистки газов с учетом характеристик улавливаемых компонентов. Предложена инерционная модель оценки эффективности осаждения пыли, учитывающая как характеристики улавливаемой пыли (размер и плотность частиц), так и режимные параметры, важнейшим из которых является скорость газового потока при прохождении через лопасти импеллеров.

Ключевые слова: ротоклон; ударно-инерционный; эффективность пылеулавливания; газовый поток; капли жидкости

ВВЕДЕНИЕ

Сравнительный анализ основных известных газоочистных аппаратов ударно-инерционного действия показывает, что многие конструкции 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 раскачке 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 скорейшего использования наиболее эффективных и экономичных конструкций в системах очистки промышленных газов.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ РОТОКЛОНА

Разработана и защищена патентом Российской Федерации конструкция ротоклона с регулируемыми синусоидальными лопастями, способного решить задачу эффективной сепарации пыли из газового потока [3]. При этом подвод воды к зонам контакта осуществляется в результате ее циркуляции внутри самого аппарата.

Ротоклон с регулируемыми синусоидальными лопастями, представленный на рис. 1, содержит нижние 1 и верхние 2 лопасти синусоидального профиля, расположенные последовательно в корпусе 3, снабженном лабиринтным каплеуловителем 4. Вывод очищенного газа осуществляется посредством патрубка 5. Перемещение верхних лопастей производится с помощью винтовых подъемников 6, а ввод газа на очистку посредством патрубка 7. При этом нижние лопасти закреплены на оси 8 с возможностью их поворота. Угол поворота нижних лопастей выбирается из условия постоянства скоростей пылегазового потока. Для регулирования угла поворота выходной части нижних лопастей предусмотрены маховики. Количество пар лопастей определяется производительностью устройства и запыленностью пылегазового потока, то есть режимом устойчивой работы устройства. В нижней части корпуса имеется патрубок для слива шламовой воды 9.

Ротоклон работает следующим образом. В зависимости от запыленности пылегазового потока верхние лопасти 5 посредством винтовых подъемников 6, а нижние лопасти 1 с помощью маховиков устанавливаются на угол, определяемый режимом работы устройства. Запыленный газ поступает во входной патрубке 7 в верхней части корпуса 3 аппарата. Ударяясь о поверхность жидкости, он меняет свое направление и проходит в щелевой канал, образованный верхними 2 и нижними 1 лопастями. Благодаря высокой скорости движения, очищаемый газ захватывает верхний слой жидкости и дробит его в мельчайшие капли и пену с высоко-развитой поверхностью. После последовательного прохождения всех щелевых каналов газ проходит через лабиринтный каплеуловитель 4 и через выходной патрубок 5 удаляется в атмосферу. Уловленная пыль оседает в бункере ротоклона и через патрубок для слива шламовой воды 9, вместе с жидкостью, периодически выводится из аппарата [3].

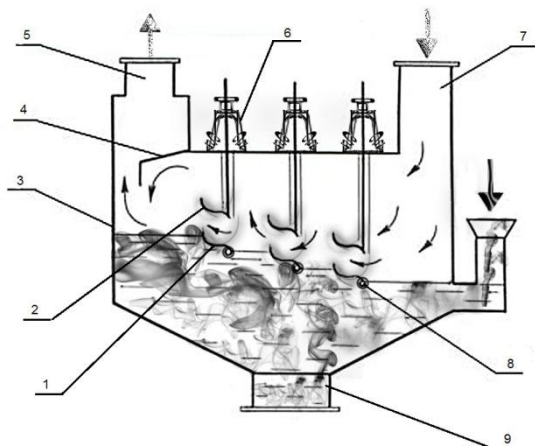


Рис. 1. Общий вид ротоклона [3]: нижние 1 и верхние 2 лопасти; корпус 3; лабиринтный каплеуловитель 4; патрубки для входа 7 и выхода 5 газа; винтовые подъемники 6; ось 8; патрубок для слива шламовой воды 9

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.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

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 проникает 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.

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 концентрацией 0,5 г/м³ и плотностью 600 кг/м³ на уровне 96,3 % [1].

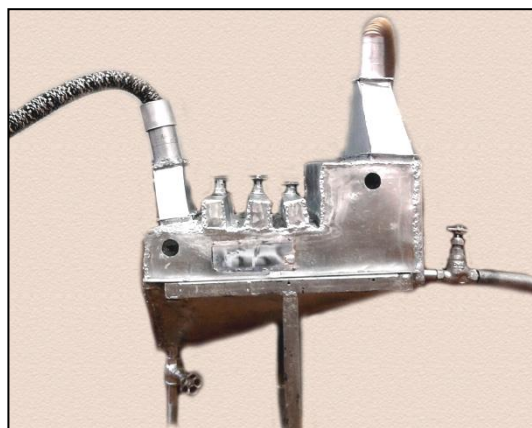


Рис. 2. Экспериментальная установка «ротоклон»

В качестве модельной системы были использованы воздух и порошок талька с разме-

ром частиц $d = 2\div 30$ мкм. Корпус аппарата заполнялся водой на уровень $h_{ж} = 0,175$ 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 изокинетичности 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. Закрывание 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 м³ воздуха, а при постоянном сливе расход не превышает $100\text{--}200$ г на 1 м³ 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.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

В ротоклоне реализуется процесс взаимодействия газовой, жидкой и твердой фаз, в результате которого твердая фаза (пыль), диспергированная в газе, переходит в жидкость. В протекающих при этом гидродинамических процессах можно выделить следующие 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.

При наблюдении через смотровое окно создается впечатление, 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 распространение 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, в противном случае не будет обеспечено эффективного взаимодействия фаз в контактных каналах. Таким образом, захват жидкости газовым потоком при последовательном прохождении лопаток импеллера является одним из важнейших этапов 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 $n = L_{ж}/L_{г}$, м³/м³, 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:

$$\frac{S_r}{S_r} = \frac{S_r}{bh_k - bh_{ж}} - \frac{S_r}{b(h_k - h_{ж})},$$

где S_r — эффективная площадь контактного канала; b — расстояние между лопатками импел-

лера; h_k — высота канала; $h_{ж}$ — уровень жидкости.

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

$$n = f(\vartheta_r \cdot h_{ж}).$$

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:

$$d = \frac{585 \cdot 10^3 \sqrt{\zeta}}{\vartheta_0} + 21.375 \cdot \left(\frac{\mu_{ж}}{\sqrt{\rho_{ж} \zeta}} \right)^{0.73} \frac{L_{ж}}{L_r},$$

где ϑ_0 — относительная скорость газов в канале, м/с; ζ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости, кг/м³; $\mu_{ж}$ — вязкость жидкости, Па/с; $L_{ж}$ — 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.

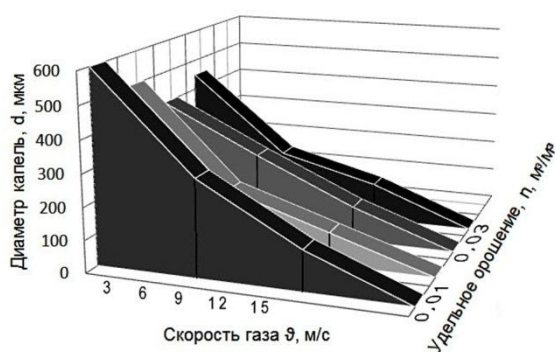


Рис. 3. Расчетная зависимость размера капель от скорости потока и удельного орошения

На рис. 3 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: $\rho_{ж} = 998 \text{ кг/м}^3$; $\mu_{ж} = 1,002 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{С/м}^2$, $\zeta = 72,86 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что важнейшими режимными параметрами, от которых зависит средний размер капель в контактных каналах ротоклона, являются скорость газового потока ϑ_0 и удельный расход жидкости на увлажнение 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 диаметра 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:

$$\eta_u = f\left(\frac{m_{ч} \cdot \vartheta_{ч}}{\xi_c \cdot d_0}\right),$$

где $m_{ч}$ — масса осаждаемой частицы; $\vartheta_{ч}$ — 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:

$$\frac{m_{ч} \vartheta_{ч}}{\xi_c d_0} = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_r^2 \vartheta_{ч} \rho_{ч} C_k}{\mu_r d_0}.$$

Комплекс $d_r^2 \vartheta_{ч} \rho_{ч} C_k / (18 \mu_r d_0)$ является параметром (числом) Стокса

$$\eta_u = f(\text{Stk}) = f\left(\frac{d_r^2 \vartheta_{ч} \rho_{ч} C_k}{18 \mu_r d_0}\right).$$

Таким образом, эффективность улавливания частиц пыли в ротоклоне по инерционной моде-

ли зависит главным образом от характеристики улавливаемой пыли (размера и плотности улавливаемых частиц) и режимных параметров, важнейшим из которых является скорость газового потока при прохождении через лопатки импеллеров.

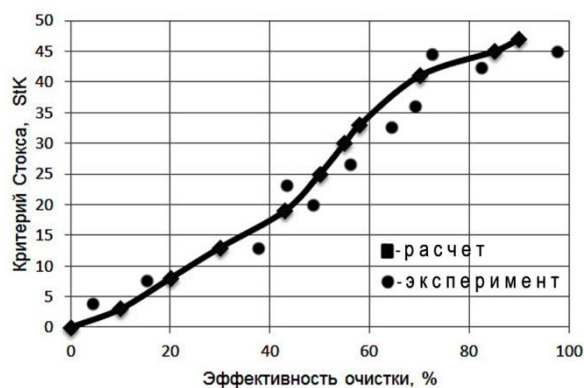


Рис. 4. Зависимость эффективности очистки газа от критерия StK

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

ВЫВОДЫ

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. Экспериментально показано, что захват жидкости газовым потоком при последовательном прохождении лопаток импеллера является одной из определяющих стадий гидродинамического процесса в ротоклоне.

3. 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.

5. Хорошая сходимость результатов вычислений по полученным соотношениям с данными, имеющимися в технической литературе, и собственных экспериментов подтверждает приемлемость принятых допущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю. Очистка промышленных газов от пыли. М.: Химия, 1981. 280 с. [V. N. Uzhov, A. Y. Valdberg, *Purification of industrial gases from dust*, (in Russian). Moscow: Chemistry, 1981.]
2. Страус В. Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981. 616 с. [V. Straus, *Industrial gas purification*, (in Russian). Moscow: Chemistry, 1981.]
3. Патент 2317845 РФ, МПК кл. В01 Д47/06. Ротоклон с регулируемыми синусоидальными лопастями / Р. Р. Усманова, В. С. Жернаков, А. К. Панов. Опубл. 27.02.2008. Бюл. № 6. [R. R. Usmanova, V. S. Zhernakov, A. K. Panov, *Rotoklon with adjustable blades sinusoidal*, (in Russian). Published: 27.02.2008. Bull. no. 6.]

ОБ АВТОРАХ

УСМАНОВА Регина Равиловна, доц. каф. сопр. материалов. Дипл. инж.-мех. (УГНТУ, 2000). Канд. техн. наук (там же, 2004). Иссл. в обл. гидрогазодинамики в центробежных аппаратах.

ЖЕРНАКОВ Владимир Сергеевич, зав. каф. сопр. материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Проф., засл. деят. науки РФ, чл.-кор. АН РБ. Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.

METADATA

Title: Theoretical and experimental research of inertial dust deposition mechanism in rotoklon

Authors: R.R. Usmanova¹, V. S. Zhernakov²

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹regina_ugatu@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 2 (63), pp. 31-35, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: In article new promising apparatus of shock-inertial action is considered. The apparatus allows optimizing process of clearing of gases in view of specifications caught components. Inertial model of the evaluation of dust deposition efficiency accounting both of specification caught dust, (size and density of particles) and control parameters, most important is offered from which gas flow velocity is at passing through impellers blade.

Key words: Rotoklon; shock-inertial; dust clearing efficiency; gas flow; liquid drops.

About authors:

USMANOVA Regina Ravilevna, PhD, Dept. of Strength of Materials. Dipl. Mechanical Engineer (UGNTU, 2000). Cand. of Tech. Sci. (UGNTU, 2004).

ZHERNAKOV Vladimir Sergeyevich, Prof., Dept. of Strength of Materials. Dipl. Mechanical Engineer (UAI, 1967). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 1980), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 1992).