

УДК 532.527

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА УДАРНО-ИНЕРЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ГАЗОВОГО ПОТОКА

© 2014 Р. Р. Усманова, В. С. Жернаков

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»

Получена аналитическая зависимость, описывающая эффективность ударно-инерционного осаждения дисперсных частиц в зависимости от свойств улавливаемого дисперсного материала и режимных параметров процесса газоочистки. Разработана конструкция нового аппарата ударно-инерционного действия, позволяющего оптимизировать процесс очистки газов с учётом характеристик улавливаемых компонентов.

Лопатки импеллера, уровень жидкости, эффективность газоочистки, газовый поток, орошающая жидкость, диаметр частиц, ударно-инерционное осаждение.

Введение

К аппаратам ударно-инерционного действия относится большая группа мокрых пылеуловителей, в которых контакт газов с жидкостью осуществляется за счёт удара газового потока о поверхность жидкости с последующим пропусканием газожидкостной взвеси через отверстия различной конфигурации. В результате такого взаимодействия образуются капли диаметром 300-600 мкм. Особенностью аппаратов ударного действия является полное отсутствие средств перемещения жидкости, и поэтому вся энергия, необходимая для создания поверхности контакта, подводится через газовый поток. 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 [1,2]. 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 сниже-

нию эффективности пылеулавливания. Из-за низких скоростей газа в контактных каналах такие устройства имеют большие габариты. Эти недостатки, а также слабая изученность протекающих в аппаратах процессов, отсутствие надёжных методов их расчёта 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 использования наиболее эффективных и экономичных конструкций в системах газоочистки.

Описание конструкции ротоклона

Разработана конструкция ротоклона с регулируемыми синусоидальными лопастями, новизна которой защищена патентом Российской Федерации, способного решить задачу эффективной сепарации пыли из газового потока [3]. При этом подвод воды к зонам контакта осуществляется в результате её циркуляции внутри самого аппарата. Ротоклон с регулируемыми синусоидальными лопастями, представленный на рис.1, содержит корпус 3 с патрубками для входа 7 и выхода 5 газа, в

котором установлены пары лопастей синусоидального профиля. Перемещение верхних лопастей 2 осуществляется с помощью винтовых подъёмников 6, нижние лопасти 1 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 1 предусмотрены маховики. Количество пар лопастей определяется производительностью устройства и запылённостью пылегазового потока, то есть режимом устойчивой работы устройства. В нижней части корпуса имеется патрубок для слива шламовой воды 9. Перед патрубком для выхода газа 5 установлен лабиринтный каплеуловитель 4. Ротоклон работает следующим образом. В зависимости от запылённости пылегазового потока верхние лопасти 5 посредством винтовых подъёмников 6, а

нижние лопасти 1 с помощью маховиков устанавливаются на угол, определяемый режимом работы устройства. Запылённый газ поступает во входной патрубок 7 в верхней части корпуса 3 аппарата. Ударяясь о поверхность жидкости, он меняет своё 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.

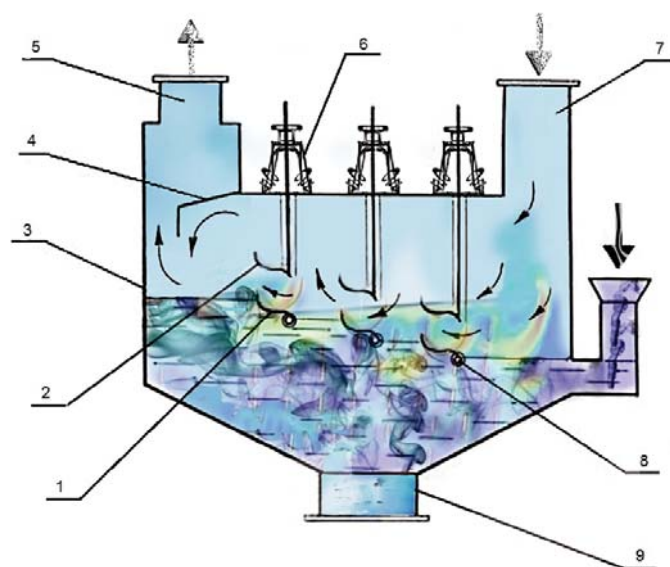


Рис.1. Общий вид ротоклона:

нижние 1 и верхние 2 лопасти; корпус 3; лабиринтный каплеуловитель 4; патрубки для входа 7 и выхода 5 газа; винтовые подъёмники 6; ось 8; патрубок для слива шлама 9

Ротоклон характеризуется наличием трёх щелевых каналов, образуемых верхними и нижними лопастями, причём в каждом последующем по ходу газа канале нижняя лопасть устанавливается выше предыдущей. Такое расположение спо-

собствует 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 ак-

тивную 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 запылённости газового потока.

Отмеченные особенности конструкции не позволяют корректно использовать имеющиеся решения по гидродинамике газодисперсных потоков для разработанного устройства. В связи с этим для обоснованного описания процессов, происходящих в аппарате, возникла необходимость проведения экспериментальных исследований.

Экспериментальная часть

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 $25-45^\circ$ к оси.

Исследуемый ротоклон снабжён тремя щелевыми каналами, 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 $0,5 \text{ г/нм}^3$ и плотностью 600 кг/м^3 на уровне 96,3 % [1].

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 $h_{\text{ж}}=0,175 \text{ м}$.

Запылённость 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 путём 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 её на испарение и с удаляемым шламом. Слив воды производился небольшими порциями из бункера, снабжённого 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 100-200 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.

Обсуждение результатов эксперимента

В ротоклоне реализуется процесс взаимодействия газовой, жидкой и твёрдой фаз, в результате которого твёрдая фаза (пыль), диспергированная в газе, пе-

реходит 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.

При наблюдении через смотровое окно создаётся впечатление, что весь рабочий объём аппарата заполнен газожидкостной пеной и брызгами. Однако этот эффект характерен только для слоя, непосредственно примыкающего к смотровому окну, он может быть объяснён торможением потока у торцевой стенки. Рассмотрение замедленной съёмки 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 её 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 $n = L_{ж}/L_{г}$, m^3/m^3 , равного отношению объёмов 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:

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

где S_z – 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 путём получить следующую зависимость:

$$n = f(\vartheta_z \cdot h_{жс}).$$

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 расчёта среднего диаметра капель, образующихся при прохождении лопаток импеллера, получена эмпирическая зависимость:

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

где v_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; $L_{ж}$ – объёмный расход жидкости, м³/с; L_g – объёмный расход газа, м³/с.

Предложенная формула позволяет производить расчёт с учётом физических

характеристик фаз и режимных параметров процесса газоочистки.

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

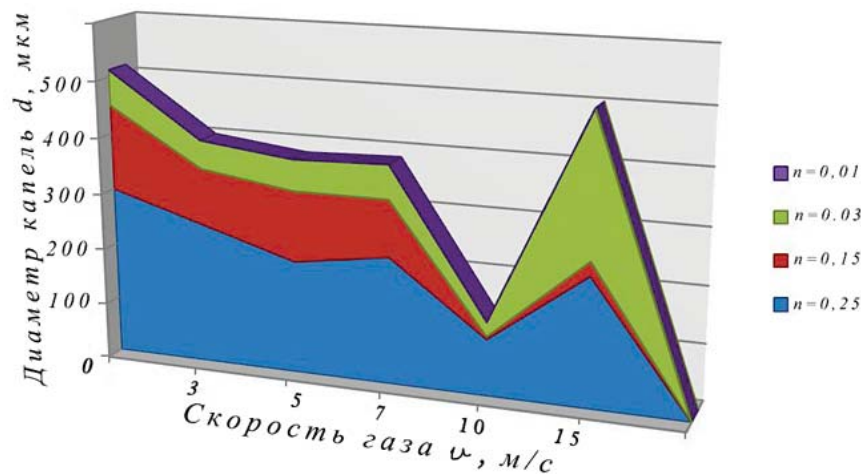


Рис.2. Расчётная зависимость размера капель от скорости потока и удельного орошения

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что важнейшими режимными параметрами, от которых зависит средний размер капель в контактных каналах ротоклона, являются скорость газового потока v_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 расчётов, нашедшие применение в практике проектирования, основаны на допущении о возможности линейной аппроксимации зависимости степени очистки от диаметра

частиц в вероятностно-логарифмической системе координат. Расчёты 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 каплей жидкости запылённым потоком, в результате чего частицы, обладающие инерцией, продолжают двигаться поперёк изогнутых линий тока газов, достигают поверхности капель и осаждаются на них.

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

$$\eta_u = f\left(\frac{m_q}{\xi_c} \cdot \frac{v_q}{d_0}\right),$$

где m_c – масса осаждаемой частицы; v_c – скорость частицы; ξ – коэффициент сопротивления движения частицы; d_0 – диаметр сечения капли.

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

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

Комплекс $d_r^2 v_c \rho_c C_k / (18 \mu_c d_0)$ является параметром (числом) Стокса:

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

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

Библиографический список

1. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка промышленных газов от пыли. М.: Химия, 1981. 280 с.
2. Страус В. Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981. 616 с.
3. Пат. 2317845 РФ, МПК, кл. В01 Д47/06. Ротоклон с регулируемыми синусоидальными лопастями / Усманова Р.Р., Жернаков В.С., Панов А.К. Опубл. 27.02.2008. Бюл. №6.

Информация об авторах

Усманова Регина Равилевна, кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: Usmanovarr@mail.ru. Область научных интересов: исследования в области гидрогазодинамики в центробежных аппаратах.

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 её 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 расчётные 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 лопасти импеллеров.

Жернаков Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, Уфимский государственный авиационный технический университет. E-mail: Sm.ugatu@mail.ru. Область научных интересов: исследования в области механики деформируемого твердого тела.

RESEARCH OF THE MECHANISM OF SHOCK-INERTIAL DEPOSITION OF DISPERSED PARTICLES FROM A GAS FLOW

© 2014 R. R. Usmanova, V. S. Zhernakov

Ufa State Technical University of Aviation, Ufa, Russian Federation

The analytical dependence describing the efficiency of shock-inertial deposition of particulate matter depending on the properties of the trapped particulate material and operating parameters of the gas purification process is obtained. The design of a new shock inertial action device that makes it possible to optimize the process of gas clearing taking into account the characteristics of the trapped components is developed.

Blade impeller; liquid level; efficiency of gas purification; gas stream; scrubbing liquid; particle diameter; shock-inertial deposition.

References

1. Uzhov V.N., Valdberg A.J. Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli [Dust elimination in industrial gases]. Moscow: Khimiya Publ., 1981. 280 p.
2. Straus V. Promyshlennaya ochistka gazov [Industrial purification of gases]. Moscow: Khimiya Publ., 1981. 616 p.
3. Usmanova R.R., Zhernakov V.S., Panov A.K. Rotoklon s reguliruemymi sinusoidal'nymi lopastyami [Rotoklon with adjustable sinusoidal guide vanes]. Patent RF, no. 2317845, 2008. (Published 27.02.2008, bulletin no. 6).

About the authors

Usmanova Regina Ravilevna, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Department of Strength of Materials, Ufa State Technical University of Aviation. E-mail: Usmanovarr@mail.ru. Area of research: hydraulic gas dynamics in centrifugal machines.

Zhernakov Vladimir Sergeevich, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of the Department of Strength of Materials, Ufa State Technical University of Aviation. E-mail: Sm.ugatu@mail.ru. Area of research: mechanics of deformable solids.