

А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, А. А. Исаев

ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ПРОИЗВОДСТВА КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ*Ключевые слова: очистка, газовые выбросы, математическая модель, вихревой аппарат.*

В данной статье рассмотрена проблема очистки кальцинированной соды с использованием полых вихревых аппаратов, их сравнение с действующими аппаратами, а также представлена схема установки и технологического процесса. Составлена математическая модель, при решении которой определяются эффективность работы установки и экономическая выгода.

Key words: cleaning, gas emissions, the mathematical model, a vortex apparatus.

In this article the problem of cleaning soda ash using hollow vortex devices, and compared with existing devices, as well as a diagram of the installation and the process. The mathematical model, the solution of which determines the efficiency of the plant and the economic benefits.

Химический комплекс является базовым сегментом российской промышленности, который закладывает основы её долгосрочного и стабильного развития и оказывает существенное влияние на структурные изменения в экономике. Отрасль химии и нефтехимии характеризуется широким спектром видов выпускаемой продукции, которая используется практически во всех отраслях промышленности, народного хозяйства и в повседневном быту. К примеру, анализ структуры потребления кальцинированной соды показал, что в наибольшем количестве она применяется в стекольной промышленности, на долю которой приходится 38% суммарного объема российского потребления. Кроме того, кальцинированная сода широко используется в цветной металлургии (24%), химической и нефтехимической промышленности (17%), целлюлозно-бумажной промышленности (11%), доля прочих направлений использования составляет 10% [1].

К числу важнейших проблем содового производства, процесс которого связан с хранением, переработкой, упаковкой и др., в первую очередь относится загрязнение атмосферного воздуха, как самих производственных помещений, так и прилегающих к ним территорий. Такие технологические процессы как погрузка, выгрузка, пересыпка, сортировка сопровождаются выделением пыли. Пыль технологического происхождения весьма разнообразна по химическому составу, размеру, форме и плотности частиц. Плотность частиц кальцинированной соды изменяется, в основном, в пределах от 1000 до 3000 кг/м³, в её состав входят частицы размером 3-50 мкм. Образованию мелкой содовой пыли способствуют процессы её механической обработки, а также различные погрузочно-разгрузочные операции, транспортировка и хранение [2].

Для очистки газа от крупной пыли обычно используется промыватель, представляющий собой аппарат с хордовой насадкой, которая орошается водой. Для очистки газа от мелкодисперсной пыли его направляют в электрофильтр, пенный промыватель или скруббер Вентури [2].

По действующим схемам очистки газов от твердой дисперсной фазы существуют трудности,

связанные с очисткой осадительных электродов в процессе работы электрофильтра от осевшей пыли. Основными недостатками скрубберов при улавливании твердых частиц пыли является большой расход орошающей жидкости, малое время пребывания фаз в зоне контакта и высокое гидравлическое сопротивление [2]. Кроме того существующее традиционное пылеулавливающее оборудование не позволяет эффективно улавливать частицы размером менее 10 мкм, и они, в значительной степени, уносятся с газовым потоком. Эти факторы обуславливают необходимость перехода систем очистки газа от содержащегося в ней значительного количества твердой полидисперсной фазы на принципиально новую технологию.

Мелкодисперсные частицы обладают низкой инерционностью, поэтому процесс очистки возможен лишь в аппаратах с интенсивным гидродинамическим режимом работы, например, таких, как полые вихревые аппараты.

В данной работе предложен способ очистки газов от твердых частиц с использованием аппарата вихревого типа, представленного на рис. 1. Принцип работы таких аппаратов заключается в образовании закрученного газожидкостного потока с последующим разделением фаз в поле центробежных сил. Наличие жидкой фазы позволяет осуществить процесс очистки газа от мелких частиц пыли. Поток газа поступает в аппарат через расположенный тангенциально штуцер 2. Площадь входа газа в аппарат можно регулировать с помощью подвижного кольца 3. При его повороте отверстие 4 перекрывает проход для газа, в результате скорость газа на входе увеличивается. К кольцу 3 крепится сегмент червячного колеса 6, находящегося в зацеплении с червяком 5. Изменение скорости газового потока на входе в аппарат происходит при вращении регулятора 7, при этом червяк 5 смещает отверстие 4. Уменьшение скорости газа на входе в аппарат уменьшает его гидравлическое сопротивление и увеличивает эффективность очистки за счет увеличения времени пребывания капель жидкости в аппарате. Однако при этом ухудшается сепарация и увеличивается унос жидкости, что существенно снижает

эффективность. Следовательно, регулируя скорость газа на входе в аппарат можно настроить вихревой аппарат на оптимальный режим работы.

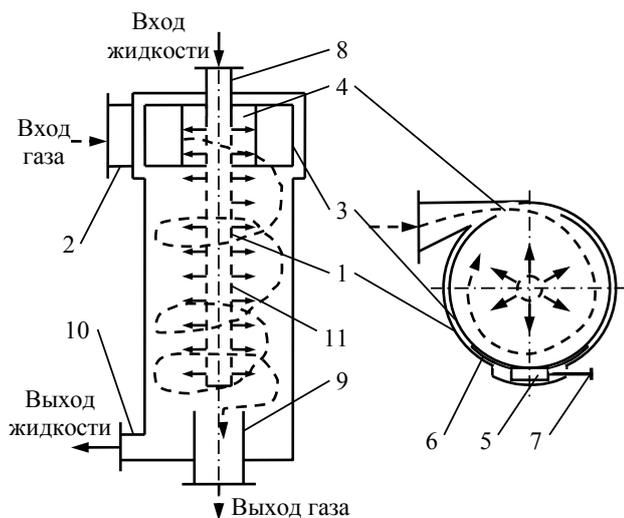


Рис. 1 - Вихревой аппарат с регулируемыми геометрическими параметрами тангенциального завихрителя: 1 – корпус аппарата; 2 – штуцер для входа газа; 3 – подвижное кольцо; 4 – отверстие; 5 – червяк; 6 – червячное колесо; 7 – регулятор; 8 – штуцер для входа жидкости; 9 – штуцер для выхода газа; 10 – штуцер для выхода жидкости; 11 – отверстия в оросителе

Поток жидкости поступает в аппарат через штуцер 8. Из отверстий в оросителе 11 жидкость разбрызгивается в рабочую зону аппарата. Поток газа интенсивно взаимодействует с жидкостью. Вращаясь вместе с газожидкостным потоком, частицы перемещаются на поверхность капель жидкости. Под действием центробежной силы жидкость осаждается на стенке аппарата и стекает по нему в виде пленки. При этом создается дополнительная зона контакта газовой и жидкой фазы. Газ, проходя через слой капель, очищается от твердых примесей, после чего удаляется из аппарата через штуцер 9. Отработанная жидкость удаляется через штуцер 10.

Основными достоинствами данного аппарата являются высокая пропускная способность по газовой фазе, низкое гидравлическое сопротивление. Эти факторы обуславливают необходимость совместного использования циклонов и вихревых аппаратов для очистки газа от твердых частиц на заводах содового производства. Для предварительной очистки от крупных частиц соды газ подается в аппарат для улавливания крупных частиц, например, циклон. После чего газ поступает в вихревой аппарат для очистки от мелких частиц пыли. Жидкость поступает из конденсатора. Отработанная жидкость из аппарата для улавливания крупных частиц отводится в аппарат для выпаривания, где происходит концентрация раствора, отводимого далее в кристаллизатор для отделения кристаллов соды.

Пары воды далее поступают в конденсатор, после чего возвращаются в полый вихревой аппарат.

Предложенный метод очистки газов может быть также использован в химической, металлургической и других отраслях промышленности, использующих растворимые кристаллы.

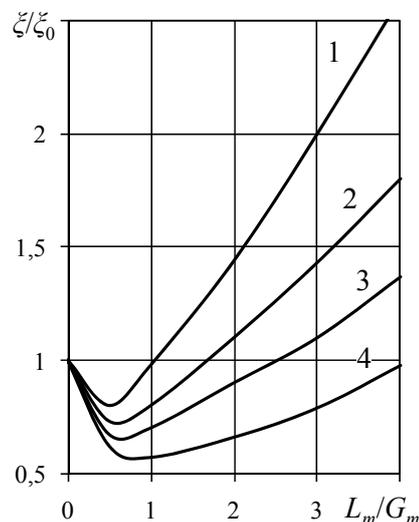


Рис. 2 - Зависимость коэффициента сопротивления тангенциально-лопаточного завихрителя от соотношения нагрузок по жидкости и газу [3]: A: 1 – 0,5; 2 – 0,66; 3 – 0,91; 4 – 1,85

Применение полых аппаратов вихревого типа в данном методе позволит уменьшить расход жидкости. Следует отметить, что добавление небольшого количества жидкости в завихритель дает возможность снизить гидравлическое сопротивление аппарата (рис. 2). Максимальное снижение величины гидравлического сопротивления приходится на отношение массовых расходов жидкой и газовой фаз в интервале 0,5-1,0 кг/кг [3].

Для составления математической модели расчета аппарата в зоне перекрестного взаимодействия фаз был выделен элементарный объем (тор) со сторонами поперечного сечения dz и определено изменение количества дисперсной фазы в газовом потоке при прохождении им данного объема

$$dM = -\pi R_a^2 W_z \frac{\partial c}{\partial z} dz, \quad (1)$$

где R_a – радиус рабочей зоны аппарата, м; W_z – скорость газового потока, м/с; c – концентрация дисперсной фазы в газе, кг/м³; r , φ , z – цилиндрические координаты, м.

Изменение количества дисперсной фазы в газовом потоке при прохождении элементарного объема обусловлено захватом частиц каплями жидкости и определяется суммарной площадью миделева сечения капель dF_m , эффективностью захвата частиц одиночной каплей η_{Stk} и скоростью относительного движения частиц и капли U_{om}

$$dM = \eta_{stk} U_{om} c dF_m, \quad (2)$$

где η_{stk} – эффективность захвата частиц одиночной каплей; U_{om} – относительная скорость капли, м/с; F_m – суммарная площадь миделева сечения каплей, м².

Для оценочных расчетов инерционного осаждения частиц на сферической капле обычно используют эмпирические зависимости вида [4]:

$$\eta_{stk} = \left(\frac{K_{st}}{K_{st} + 0,35} \right)^2, \quad (3)$$

где $K_{st} = \frac{C_{st} U_{om} \rho_p a^2}{18 \mu_g a}$ – коэффициент;

Относительная скорость капли и газового потока

$$U_\xi = \sqrt{(W_r - U_r)^2 + (W_\varphi - U_\varphi)^2 + (W_z - U_z)^2}$$

определялась из системы уравнений [5]:

$$\frac{dU_r}{dt_a} = \frac{U_\varphi^2}{r} + \frac{\rho_g}{\rho_L} \left[\frac{3}{4} c_a \frac{U_\xi}{a} (W_r - U_r) + \frac{W_\varphi}{r} \times \right. \\ \left. \times (W_\varphi - U_\varphi) + \frac{W_z}{r} (W_z - U_z) \right], \quad (4)$$

$$\frac{dU_\varphi}{dt_a} = -\frac{U_\varphi U_r}{r} + \frac{\rho_g}{\rho_L} \left[\frac{3}{4} c_a \frac{U_\xi}{a} (W_\varphi - U_\varphi) - \frac{W_\varphi}{r} \times \right. \\ \left. \times (W_r - U_r) \right],$$

$$\frac{dU_z}{dt_a} = g + \frac{\rho_g}{\rho_L} \left[\frac{3}{4} c_a \frac{U_\xi}{a} (W_z - U_z) - \frac{W_z}{r} \times \right. \\ \left. \times (W_r - U_r) \right],$$

$$\frac{dr}{dt_a} = U_r, \quad \frac{d\varphi}{dt_a} = \frac{U_\varphi}{r}, \quad \frac{dz}{dt_a} = U_z,$$

которые решаются с начальными условиями:

$$\tau_a = 0; r = R_p; \varphi = 0, z = 0, U_r = U_0, U_\varphi = 0, U_z = 0.$$

Здесь a_p – диаметр осаждаемых частиц, м; a – диаметр капли, м; ρ_p – плотность осаждаемых частиц, кг/м³; ρ_L – плотность жидкой фазы, кг/м³; ρ_G – плотность газовой фазы, кг/м³; U_0 – начальная скорость каплей, м/с; U_φ, U_r, U_z – тангенциальная, радиальная и осевая скорости капли, м/с; W_φ, W_r, W_z – тангенциальная, радиальная и осевая скорости газа, м/с; $A = W_{ex}/W_{cp}$ – коэффициент крутки потока; W_{ex} – скорость газа на входе в аппарат, м/с; W_{cp} – средняя по сечению аппарата скорость газа, м/с; R_p – радиус пористых вращающихся распылителей, м; C_{st} – коэффициент Кеннингема.

Суммарная площадь миделева сечения каплей связана с массой каплей в выделенном элементарном объеме соотношением

$$dF_m = \frac{3}{2\rho_L a} dM_m. \quad (5)$$

Масса каплей в элементарном объеме определялась через массовый расход жидкости dL_m и время движения каплей в элементарном объеме $\tau_a = R_a/U_r$.

$$dM_m = \tau_a dL_m, \quad (6)$$

где L_m – массовый расход жидкости, кг;

Массовый расход жидкости в выделенный элемент

$$dL_m = \frac{L_m}{H} dz. \quad (7)$$

Массовый расход газа постоянен по высоте рабочей зоны

$$G_m = \pi R_a^2 W_z \rho_g. \quad (8)$$

Путем сравнения выражений (1) и (2), с учетом (3)-(8), получено уравнение, характеризующее изменение концентрации дисперсной фазы по толщине факела жидкости

$$-\frac{dc}{c} = \frac{3}{2} \eta_{stk} \frac{U_{om} \rho_g R_a L_m}{U_r \rho_L a H G_m} dz. \quad (9)$$

Интегрируя уравнение (9) при изменении высоты z от 0 до ΔH и концентрации c от c_0 до c_k , можно получить следующую зависимость для расчета эффективности очистки газового потока от частиц дисперсной фазы на высоте ΔH :

$$\eta'_s = 1 - \frac{c_0}{c_k} = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \eta_{stk} \frac{\rho_g R_a \Delta H U_{om} L_m}{\rho_L a H U_r G_m}\right), \quad (10)$$

где η_s – эффективность пылеулавливания за счет инерционного механизма, τ_a – время полета капли, с; G_m – массовый расход газа, кг.

Время пребывания каплей в объеме рабочей зоне аппарата и относительная скорость каплей U_{om} , существенно меняются по высоте, так как эти параметры зависят от скорости газового потока. Таким образом, для снижения погрешности расчетов, рабочая зона аппарата разбивается на j частей, и, для каждой части, определяется эффективность осаждения частиц. Общая эффективность аппарата рассчитывается по формуле:

$$\eta_s = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \eta'_{sj}). \quad (11)$$

Расчеты проводились при радиусе рабочей зоны аппарата $R_a = 0,4$ м, радиусе распылителя жидкости $R_p = 0,02$ м, плотности кристаллов соды $\rho_p = 2500$ кг/м³, среднем диаметре каплей $a = 400$ мкм; средней по сечению аппарата скорости газа $W_{cp} = 15$ м/с.

В вихревом потоке относительная и радиальная скорости капли меняются по радиусу рабочей зоны аппарата. Численные исследования (рис. 3) показывают, что погрешность расчета эффективности по формуле (10), вызванная осреднением скоростей капли по радиусу, может быть значительной лишь при достаточно больших скоростях газового потока на входе в аппарат. Однако для достижения высокой эффективности очистки нет необходимости создавать такие скорости, следовательно, формула (10) вполне пригодна для инженерных расчетов.

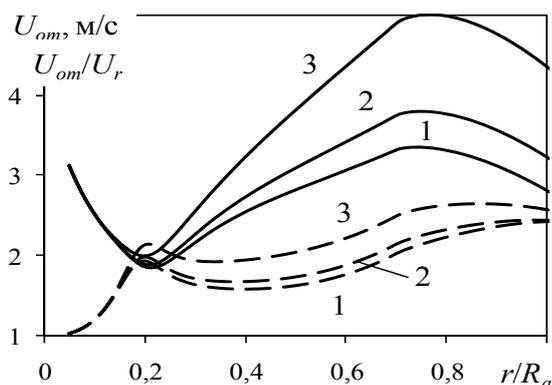


Рис. 3 - Изменение относительной скорости капли, отношения относительной и радиальной скоростей капли по радиусу рабочей зоны аппарата в зависимости от скорости газа на входе в аппарат; сплошная линия U_{om} , м/с; пунктирная линия U_{om}/U_r ; начальная скорость капель $U_0 = 1$ м/с; $L_m/G_m = 1$; W_{ex} , м/с: 1 – 9,9; 2 – 13,65; 3 – 27,75.

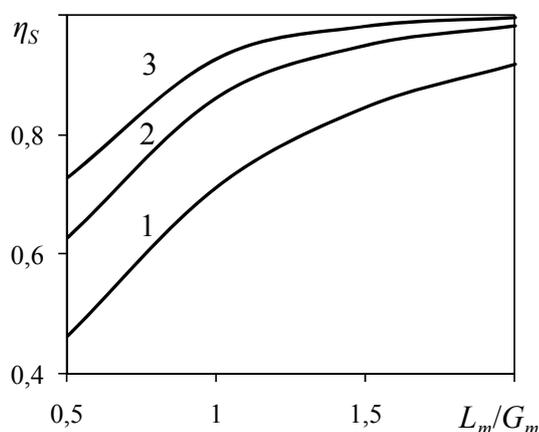


Рис. 4 - Зависимость эффективности пылеулавливания за счет инерционного механизма от отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз; $U_{om}/U_r = 2$; K_{st} : 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2

Эффективность работы полого вихревого аппарата во многом определяется размерами улавливаемых частиц пыли и капель, относительной скоростью капли, плотностью частиц и вязкостью газа. Все эти параметры связывает между собой коэффициент K_{st} . Расчеты показывают, что значение коэффициента K_{st} в полом вихревом аппарате при осаждении частиц диаметром более 3 мкм, меняется от 0,5 до 2, в зависимости от скорости газа на входе в аппарат. Исследования, представленные на рис. 4, показывают повышение эффективности пылеулавливания за счет инерционного механизма при увеличении значения коэффициента K_{st} и

отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз, что доказывает целесообразность использования предложенного аппарата в данной технологической схеме. Частицы, размер которых не превышает 3 мкм, будут улавливаться за счет механизма турбулентной миграции. По экспериментальным данным [6] эффективность осаждения субмикронных частиц в аппарате с интенсивным взаимодействием фаз может превышать 95%.

Таким образом, использование двухступенчатой очистки позволяет осуществить эффективную очистку газов от взвешенных твердых частиц. Применение полых аппаратов вихревого типа в данном методе позволит устранить проблему забивания аппаратуры и коммуникаций отложениями. Кроме того, основными достоинствами вихревых аппаратов является простота изготовления, монтажа и обслуживания, небольшие габаритные размеры, большая поверхность контакта фаз, высокая эффективность улавливания мелких частиц и высокая производительность по газовой фазе. Использование оборотной жидкости приводит к более низкому энергопотреблению установки. Всё это делает установку более перспективной для использования на практике, так как обладает лучшими экономическими и экологическими показателями.

Литература

1. ОАО "Единая торговая компания". [Электронный ресурс]: Кальцинированная сода. URL: <http://www.etk.su/node/71>. (Дата обращения: 02.03.2011).
2. Крашенинников С.А. *Технология кальцинированной соды и очищенного бикарбоната натрия*. // М.: Высш. шк., 1985, 287 с.
3. Латыпов Д.Н., Николаев А.Н. *Динамика двухфазного течения в вихревых аппаратах, предназначенных для комплексной очистки газовых выбросов энергетических установок, работающих на твердом топливе*. Часть II // Проблемы энергетики, 2003, № 5-6. С. 13-18.
4. Страус В. *Промышленная очистка газов*. // М.: Химия, 1981, 616 с.
5. Овчинников А.А. *Динамика двухфазных закрученных турбулентных течений в вихревых сепараторах*. // Казань: ЗАО «Новое знание», 2005, 288 с.
6. Ахмадиев И.Д., Базотов В.Я. *Моделирование испытания чувствительности к удару взрывчатых составов*. // Вестник Казанского технол. ун-та. – 2011. – №1. – С.129-134.
7. Шинкевич М.В., Берман С.С. *О роли энергоресурсосберегающих технологий в инновационном развитии России*. // Вестник Казанского технол. ун-та. – 2011. – №1. – С.193-199.