

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ В СКРУББЕРЕ ДЛЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

Ключевые слова: очистка газов, эффективность пылеулавливания.

Составлено математическое описание процесса пылеулавливания частиц дисперсной фазы из запыленного газового потока в пологом скруббере со струйно-ударным диспергированием орошающей жидкости. Получена формула для расчета фракционной эффективности аппарата при инерционном осаждении частиц на каплях жидкости в условиях перекрестного и многозонного взаимодействия запыленного газового потока и плоских радиально направленных факелов орошающей жидкости.

Keywords: cleaning gases, dust collection efficiency.

There is the mathematical description of the dust collecting the dispersed particles of the dust-laden gas stream into the floor scrubber with a jet-impact dispersing the liquid reflux. The formula for the fractional efficiency of the device at the inertial deposition of particles on the liquid droplets in a cross-and multi-zone interaction of the dust-laden gas stream and a flat radially extending torches scrubbing liquid is obtained.

Экологические проблемы многих промышленных предприятий связаны с очисткой газовых выбросов. При разработке газоочистного оборудования обычно исходят из следующих основных требований: высокая эффективность очистки; комплексность очистки, т.е. одновременная очистка выбросов от механических и вредных газовых примесей; низкое гидравлическое сопротивление газоочистного оборудования, допускающее его применение в технологических процессах, где избыточный напор газовых выбросов не превышает 40-100 мм.вод.ст. [1].

Этим требованиям в значительной степени удовлетворяет конструкция полого скруббера с распылением жидкости центробежными форсунками с использованием эффекта соударения встречных струй [2]. Размещение форсунок на оси аппарата по всей его высоте при струйно-ударном диспергировании жидкости позволяет создать в рабочем объеме скруббера систему плоских радиально направленных факелов капель жидкости, обеспечивающих многократное взаимодействие фаз в условиях перекрестного тока. Нечувствительность примененного диспергирующего устройства к загрязнению орошающей жидкости позволяет использовать аппарат в режиме рециркуляции жидкой фазы, что положительно влияет на его массообменные характеристики и позволяет сократить объем шламовых вод при пылеочистке и сепарации [3].

В условиях перекрестного движения и взаимодействия запыленного газового потока и капель орошающей жидкости осаждение твердых и жидких частиц на каплях распыленной жидкости происходит посредством трех механизмов: инерционного осаждения, перехвата частиц и диффузионного осаждения [4]. При очистке газов от мелкодисперсных частиц, когда характерный размер частиц дисперсной фазы изменяется в пределах 5-150 мкм., а диаметр капель орошающей жидкости составляет около 300 мкм [5]. Поэтому вклад механизмов перехвата частиц и диффузионного осаждения оказывается незначительным и эффективность

процесса пылеочистки практически полностью определяется механизмом инерционного столкновения частиц с каплями орошающей жидкости.

По данному механизму частица, благодаря своей массе, обладает достаточной инерцией для того, чтобы двигаться прямолинейно по направлению к улавливающему телу-мишени, пересекая линии тока течения несущей фазы. Эффективность захвата при инерционном осаждении определяется долей частиц, равномерно распределенных в газовом потоке, которые могут быть уловлены сферой, площадь поперечного сечения которой равна лобовой площади тела-мишени. Расчет эффективности осаждения частиц при инерционном столкновении со сферой обычно выполняется по эмпирической зависимости [6].

$$\eta_k = \frac{Stk^2}{(Stk + 0.35)^2} \quad (1)$$

где $Stk = \frac{V_{отн} \rho_p d_p^2}{18 \mu d_k}$ - модифицированное число Стокса; ρ_p , d_p , $V_{отн}$ - плотность, эквивалентный диаметр и относительная скорость частицы; d_k - диаметр капель орошающей жидкости.

Для оценки эффективности инерционной сепарации частиц дисперсной фазы на каплях жидкости в рабочей зоне полого скруббера был рассмотрен процесс переноса массы дисперсной фазы из газового потока в жидкость в зоне плоского радиального факела. Анализ проводился в цилиндрической системе координат, жестко связанной с осью скруббера. Несмотря на то, что плотность капель в факеле жидкости достаточно высока, изменениями скорости газового потока в факеле пренебрегалось. Считалось, что смещение капель в вертикальном направлении под действием газового потока и силы тяжести невелико. Предполагалось также, что частицы дисперсной фазы движутся без проскальзывания относительно газового потока.

В зоне перекрестного взаимодействия фаз (рис.1) был выделен элементарный объем (тор) со

сторонами поперечного сечения dz и dr и определено изменение количества дисперсной фазы в газовом потоке при прохождении им данного объема

$$dM = -2\pi W_z \frac{\partial c}{\partial z} r dr dz \quad (2)$$

где W_z - скорость газового потока; c - концентрация дисперсной фазы в газе.

Изменение количества дисперсной фазы в газовом потоке при прохождении элементарного объема обусловлено захватом частиц каплями жидкости и определяется суммарной площадью миделева сечения капель dF_k , эффективностью захвата частиц одиночной каплей η_k и скоростью относительного движения частиц и капли

$$dM = \eta_k V_{отн} c dF_k \quad (3)$$

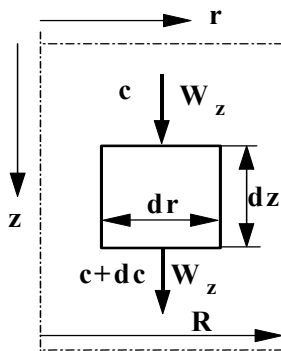


Рис. 1 - Схема взаимодействия потоков в области плоского факела.

При расчете величины относительной скорости частицы учитывалось, что в условиях перекрестного тока радиальная скорость капель V_r значительно превосходит по величине скорость газового потока [4]

$$V_{отн} = \sqrt{W_z^2 + V_r^2} \approx V_r \quad (4)$$

Суммарная площадь миделева сечения капель связана с массой капель в выделенном элементарном объеме

$$dF_k = \frac{3}{2\rho_k d_k} dM_k \quad (5)$$

Масса капель в элементарном объеме определялась через величину приведенной скорости жидкой фазы в факеле U и время движения капель в элементарном объеме dt

$$dM_k = 2\pi\rho_k U r dz dt \quad (6)$$

где $U = L/2 \pi \rho_k r b$; $d\tau = dr/V_r$; L - массовый расход жидкости в факеле; b - толщина капельного слоя.

Путем сравнения выражений (2) и (3) было получено уравнение, характеризующее изменение концентрации дисперсной фазы по толщине факела жидкости

$$\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial z} = -B \quad (7)$$

$$\text{где } B = \frac{3}{2d_k} \eta_k \frac{U}{W_z}$$

Интегрированием дифференциального уравнения (7) при начальных условиях

$$z = z_n; c = c_n \quad (8)$$

была получена следующая зависимость для расчета концентрации частиц дисперсной фазы в газовом потоке

$$c = c_n \exp[-B(z - z_n)] \quad (9)$$

и определена концентрация частиц в газе на выходе из капельного слоя

$$\bar{c} = c_n \exp(-Bb) \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что даже в случае равномерного распределения дисперсной фазы в газовом потоке на входе в факел орошающей жидкости ($c_n = \text{const}$), концентрация примеси в газе на выходе из капельного слоя будет переменной по радиусу скруббера. Этот факт обусловлен, с одной стороны, расширением плоского факела по мере удаления от источника и, соответственно, снижением плотности орошения, а с другой - падением радиальной скорости капель жидкости за счет силы аэродинамического сопротивления.

Было предположено, что в пространстве между слоями происходит перемешивание газового потока, что приводит к выравниванию поля концентраций по сечению аппарата. Значение средней концентрации было определено из уравнения материального баланса

$$c_k = \frac{2c_n}{R^2} \int_{r_0}^R r \exp(-Bb) dr = c_n(1 - \eta_k) \quad (11)$$

где $\eta_k = \frac{c_n - c_k}{c_n}$ - эффективность пылеулавливания

одним из факелов орошаемой жидкости; R - радиус скруббера; r_0 - радиус корня факела.

Для расчета эффективности пылеулавливания в полном скруббере, состоящим из n плоских факелов, были рассчитаны значения средних концентраций дисперсной фазы в газовом потоке на выходе каждого слоя и эффективности слоев. С учетом того, что концентрация примеси частиц в газовом потоке на выходе i -го слоя является одновременно входной концентрацией для $i+1$ -го слоя, было получено

$$c_{i+1} = c_i(1 - \eta_i) \quad (i=1...n) \quad (12)$$

$$\eta_i = 1 - \frac{2}{R^2} \int_{r_0}^R r \exp(-B_i b_i) dr \quad (13)$$

где c_1, c_{n+1} - концентрации частиц в газовом потоке на входе и выходе аппарата.

Эффективность пылеулавливания в скруббере определялась по традиционной формуле

$$\eta = \frac{c_1 - c_{n+1}}{c_{n+1}} \quad (14)$$

С учетом (12) окончательно было получено

$$\eta = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \eta_i) \quad (15)$$

Как и следовало ожидать, эффективность процесса инерционной сепарации не зависит от концентрации частиц в газовой фазе на входе в

аппарат. Менее очевидной является независимость степени очистки газа от толщины капельного слоя. Данный факт объясняется тем, что количество дисперсной фазы, улавливаемое жидкостью, зависит от числа капель в слое и их поверхности, следовательно, определяется расходом жидкости, размером капель и скоростью их движения.

Структура зависимости (15) отражает правило аддитивности вероятностей независимых событий, что указывает на независимость эффективности процесса пылеулавливания на каждом из факелов. Строго говоря, формула (15) определяет эффективность единичного акта пылеулавливания, когда частицы данного размера оседают на каплях жидкости также определенного размера.

В реальных условиях полидисперсного капельного слоя и полидисперсном составе час-
6. В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. *Очистка промышленных газов от пыли*. Химия, Москва, 1981. 392с.

тиц в газовом потоке фракционные и полная эффективности пылеулавливания могут быть рассчитаны исходя из условий независимости единичных актов осаждения по правилу сложения вероятностей независимых событий, т.е. по формулам, аналогичным зависимости (15).

Литература

1. Д.Н. Латыпов. *Вестн. Казан. технол. ун-та*, 14, 8, 340-343, (2011).
2. Авт. свид. СССР 1681919 (1991).
3. А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, А.А. Исаев. *Вестн. Казан. технол. ун-та*, 15, 18, 181-184, (2012).
4. В. Страус, *Промышленная очистка газов*. Химия, Москва, 1981. 616 с.
5. Д.Н. Латыпов, А.А. Овчинников, *Изв. ВУЗ, Химия и хим. технология*, 44, 3, (2001).