

УДК 631.333.92

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Криволапов Иван Павлович

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ,
г. Мичуринск, Россия

Новикова Виктория Сергеевна

студентка 3 курса направления подготовки
«Техносферная безопасность»
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ,
г. Мичуринск, Россия

Картечина Ольга Сергеевна

студентка 1 курса направления подготовки
«Техносферная безопасность»
Российский университет транспорта (МИИТ),
Г. Москва, Россия

Крестинин Никита Евгеньевич

студент 1 курса направления подготовки «Агроинженерия»
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ,
г. Мичуринск, Россия
viktoriya-mihaylova96@mail.ru

Аннотация: описан процесс поглощения пылевых частиц пористым материалом, проанализированы методы оценки количества частиц, удаленных из газа за время, пока газовый поток проходит через пылеуловитель, при этом установлено, что эффективность диффузии растет с уменьшением размера частиц, радиуса волокна и скорости фильтрации, и для

более точного ее описания следует проводить обширные экспериментальные исследования.

Ключевые слова: диффузия, теория Лэнгмюра, фильтрация пылевых частиц.

Движение пылевых частиц в пористых телах является достаточно сложным процессом и зависит от большого количества факторов, при этом следует учитывать, что диффузионное осаждение доминирует при фильтрации сред, содержащих очень мелкие частицы. Такие частицы, перемещение которых определяется именно броуновским движением, чрезвычайно подвижны.

В покое газе маленькие частицы движутся свободно и распределяются по всему объему газа. Если в газ поместить какой-нибудь предмет, некоторые частицы газа будут оседать на нем и тем самым удаляться из газового потока. В движущемся газе время, в течение которого может происходить такой диффузионный процесс удаления частиц, ограничено, оно определяется периодом, пока линии тока газа, из которых происходит диффузия частиц, находятся достаточно близко от улавливающего тела, рисунок 1 [1, 2].

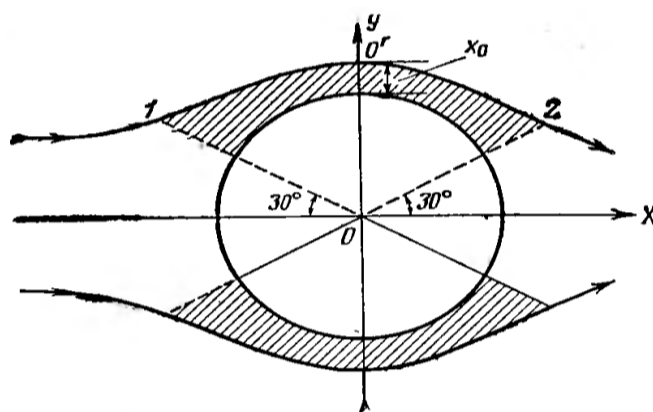


Рисунок 1 – Диффузионная область вокруг улавливающего тела

Согласно сорбционной теории Лэнгмюра, улавливание частиц путем диффузии будет происходить из поверхностного слоя эффективной толщины x_c в течение времени t .

Воздух с начальной концентрацией C_{ex} поглощаемого вещества поступает в фильтрующий материал. По мере прохождения воздуха через слой примеси частично поглощаются, так что содержание их в воздухе уменьшается, рисунок 2а [3,4].

Слой поглотителя высотой H_0 называют работающим слоем. В течение первой стадии сорбции кривая распределения концентраций не меняет ни формы, ни места по длине слоя. Это происходит потому, что, условия процесса остаются неизменными до тех пор, пока не произойдет насыщения первого элементарного слоя.

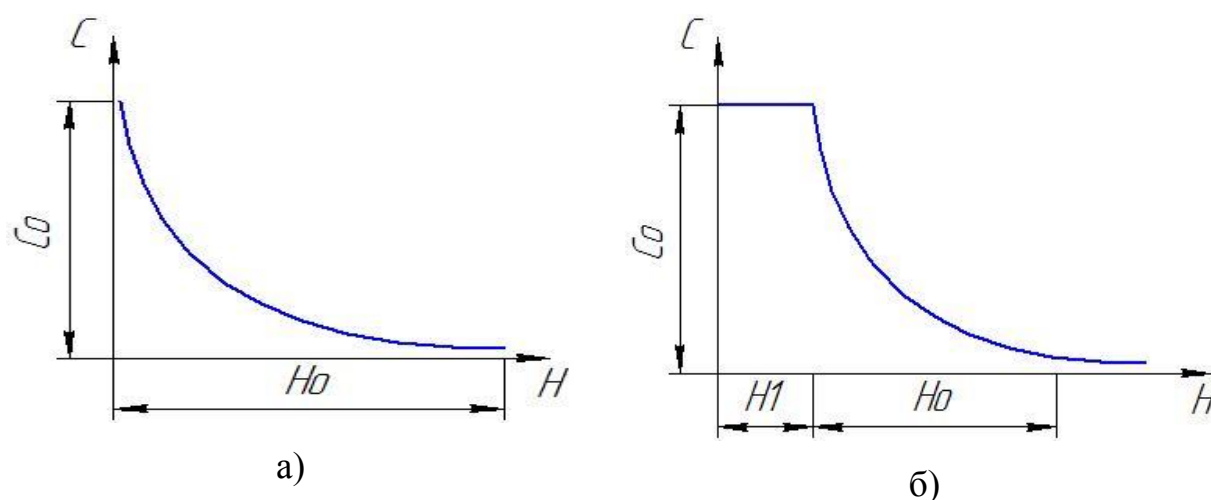


Рисунок 2 – Зависимость концентрации газового выброса высоты фильтрующего слоя в течение первой (а) и второй (б) стадии адсорбции

Начиная с момента насыщения первого элементарного слоя, в результате последовательного насыщения всех элементарных слоев кривая распределения концентраций, не меняя формы, перемещается в направлении, параллельном оси абсцисс, рисунок 2б. Этот период процесса называют второй стадией сорбции, на этой стадии условия поглощения совершенно аналогичны условиям первой, так как предыдущие слои фильтрующего материала, «насытившись», уже никакого влияния на ход процесса сорбции, а следовательно, и на форму кривой распределения, не оказывают.

Перемещение кривой распределения концентраций на расстояние H_1 вдоль оси абсцисс соответствует полному насыщению, то есть достижению

равновесной статической активности фильтрующего материала высотой H_1 . Непосредственно за слоем поглотителя длиной H_0 в первой стадии сорбции и H_1+H_0 – во второй наступает проскок, то есть появление газа за фильтрующим материалом. Принимается, что в потоке, проходящем через стационарный слой поглотителя, поверхность равных концентраций является плоскостью, перпендикулярной к направлению движения. Поверхность концентрации проскока называют фронтом сорбции.

Количество вещества, сорбируемого в процессе адсорбции, может быть найдено

$$q = a_d S J H t, \quad (1)$$

где q – количество сорбируемого вещества, моль, S – площадь поперечного сечения фильтрующего слоя, m^2 , J – плотность диффузионного потока, моль/ $m^2 \cdot c$, H – высота фильтрующего слоя, м, t – время контакта газового выброса с фильтрующим слоем, с.

Оценка количества частиц, удаленных из газа за время, пока газовый поток проходит через пылеуловитель может быть произведена различными методами.

По методу Лэнгмюра рассчитывается среднее расстояние, пройденое диффундирующей частицей за это время, и эффективность улавливания определяется путем сравнения объема газа, очищенного диффузией, с общим объемом газа, прошедшего через пылеуловитель. Лэнгмюр использовал теорию «случайных блужданий», что слой покоящегося газа, очищенный от частиц, диффундирующих к поверхности может быть найден

$$x = (4D_d t / \pi)^{1/2} \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии частиц.

Коэффициент диффузии частиц на несколько порядков меньше, чем молекул газа, он скорее сопоставим с величинами аналогичных коэффициентов для веществ, растворенных в жидкости.

По второму методу эффективность улавливания определяют на основе теории массопереноса, рассчитывая скорость диффузии через пограничный слой за период времени, пока газ, из которого происходит диффузия частиц к поверхности, находится достаточно близко от нее [1–3].

Лэнгмюр использовал теорию диффузии Стефана-Максвелла, к соответствию с которой предполагалось что частицы не влияют на молекулы газа. Это ограничивает область применения коэффициента диффузии, рассчитанного по этой теории, до частиц таких размеров, которые намного меньше среднего свободного пробега молекул газа, но значительно больше размеров самих газовых молекул. Коэффициент диффузии в таком случае может быть найден из соотношения:

$$D_D = \frac{\bar{u}}{3N(\pi d^2 / 4)} \quad (3)$$

где N – число молекул газа в единице объема, u – средняя скорость молекул.

Параметр N зависит от давления газа: $N = P/kT$ для обычного давления, когда соблюдаются законы идеальных газов.

Заменяя N и u в уравнении 3 их значениями для коэффициента диффузии получаем:

$$D_D = \frac{4kT}{3\pi d^2 P} \left(\frac{8RT}{\pi M} \right)^{1/2} \quad (4)$$

Захват частиц волокном фильтра является результатом совместного действия диффузии и переноса частиц потоком.

Безразмерным параметром, определяющим этот процесс, является число Пекле (Pe) которое представляет собой меру переноса за счет конвекции по сравнению с переносом за счет молекулярной диффузии. Для системы в которой газовый поток со скоростью v движется мимо тела диаметром D , число Пекле записывается в виде:

$$Pe = Re_c Sc = \frac{v\rho D}{\mu} \frac{\mu}{\rho D_D} = \frac{vD}{D_D} \quad (5)$$

где Sc – число Шмидта, а ν – кинематическая вязкость.

Эффективность улавливания частиц путем диффузии может быть рассчитана из уравнения Лэнгмюра для эффективности улавливания путем перехвата [3]:

$$\eta_D = \frac{1}{2,002 - \ln Re_c} \left[(1+Z) \ln(1+Z) - \frac{Z(2+Z)}{2(1+Z)} \right] \quad (6)$$

Ввиду ряда математических затруднений расчет эффективности улавливания на основе соотношений массопереноса не был полностью разработан. Общее уравнение для массопереноса в неустановившемся состоянии, закон Фика, записывается в виде [3, 6]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (7)$$

где c – концентрация частиц, x – толщина слоя непосредственно вокруг улавливающего тела.

В случае, если не происходит накопления частиц в этой зоне, то данное выражение можно интегрировать и получить скорость диффузии частиц на единицу площади улавливающей поверхности:

$$\frac{dc}{dt} = D_D \frac{c_0 - 0}{x_f}$$

где x_f – толщина зоны вокруг улавливающего тела, в которой существует градиент концентраций, c_0 – концентрация частиц в объеме газа, O – концентрация на поверхности коллектора.

Таким образом, эффективность диффузии растет с уменьшением размера частиц, радиуса волокна и скорости фильтрации, и для более точного ее описания следует проводить обширные экспериментальные исследования.

Список литературы

1. Страус, В. Промышленная очистка газов / В. Страус Пер. с англ. – М., Химия, 1981. – 616 с.
2. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г. Очистка газов. Справочник. М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
3. Уайт П., Смит С. Высокоэффективная очистка воздуха М.: Атомиздат, 1967. – 312 с. / Пер. с англ. Мягкова Б.И., Лапенко В.Г.
4. Брунауэр, С. Адсорбция газов и паров / С. Брунауэр. Пер. с англ. В.П. Беринга. – М.: Гос. изд-во иностранной литературы, 1948. – 778 с.
5. Математическое моделирование пористых структур [Электронный ресурс] / Москалев П.В., Шитов В.В. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007.
6. Криволапов И.П. Теоретическое исследование адсорбционных процессов поглощения газов в биофильтрах / А.О. Хромов, И.П. Криволапов, В.И. Горшенин // Сб. науч. тр. Международной научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь и наука XXI века» – Ульяновск, 2014 г. – С. 146–150

THEORETICAL BASIS OF THE PROCESS OF DIFFUSION DEPOSITION OF DUST PARTICLES

Krivolapov Ivan Pavlovich

candidate of technical sciences, associate professor
Michurinsk State Agrarian University,
Michurinsk, Russia

Novikova Viktoriya Sergeevna

3rd year student of the direction of training «Technosphere safety»
Michurinsk State Agrarian University,
Michurinsk, Russia

Kartechina Ol'ga Sergeevna

associate professor
1st year student of the direction of training «Technosphere safety»
Russian University of Transport (MIIT)
Moscow, Russia

Krestinin Nikita Evgenievich

1st year student of the direction of training «Agroengineering»
Michurinsk State Agrarian University,
Michurinsk, Russia
viktoriya-mihaylova96@mail.ru

Abstract: the process of absorption of dust particles by porous material is described, the methods of estimating the number of particles removed from the gas during the time when the gas flow passes through the dust collector are analyzed, it is found that the diffusion efficiency increases with a decrease in particle size, fiber radius and filtration rate, and for a more accurate description of it, extensive experimental studies should be carried out

Keywords: diffusion, Langmuir theory, filtering of dust particles