

Исследование процессов выделения дисперсного углерода из аэрозольных потоков

В. М. Шопин

ВИКТОР МИХАЙЛОВИЧ ШОПИН — старший научный сотрудник Института проблем переработки углеводородов СО РАН. Область научных интересов: коллоидная химия, аэрозоли, процессы и аппараты для производства дисперсного углерода.

644040 Омск, ул. Нефтезаводская, 54, Институт проблем переработки углеводородов СО РАН, тел. (3812)56-02-15, E-mail shopin@ihcp2.ossbras.ru

Введение

При производстве дисперсного (технического) углерода получают большие объемы высокодисперсных аэрозолей, содержащих во взвешенном состоянии целевой продукт. Эффективное извлечение его из аэрозольных потоков представляет собой сложную техническую задачу, а ее решение требует немалых материальных ресурсов. В процессе получения технического углерода предусмотрен целый ряд технологических приемов подготовки высокодисперсного аэрозоля к осаждению и фильтрации, в ходе которой снижается температура дисперсионной среды и происходит коагуляция плотных дисперсных частиц с образованием рыхлых, пористых полидисперсных агрегатов с низкой кажущейся плотностью.

В настоящей работе дан анализ механизмов коагуляции аэрозоля дисперсного углерода в ходе его получения и представлены методы расчета процессов осаждения углеродных частиц из аэрозольного потока в циклоне-концентраторе и фильтрации.

Особенности коагуляции аэрозоля дисперсного углерода

Коагуляции аэрозолей посвящено большое количество исследований как в России (см. например [1–3]), так и за рубежом (см. например [4,5]), однако особенностям коагуляции аэрозоля дисперсного углерода на всех стадиях его «жизни» в процессе получения не уделено достаточного внимания. В работах Института проблем переработки углеводородов СО РАН этот вопрос был изучен как теоретически, так и экспериментально особенно тщательно.

Механизм коагуляции аэрозоля на разных технологических стадиях печного способа получения нанодисперсного углерода включает броуновскую, градиентную, кинематическую и турбулентную составляющие.

Броуновская (тепловая) коагуляция растущих дисперсных частиц углерода протекает в газокинетическом режиме уже в ходе их образования в реакторе (зона А, рис. 1) [1–3]. В этой зоне кинетику процесса

коагуляции дисперсного углерода можно описать уравнением быстрой коагуляции Смолуховского

$$\frac{dn}{d\tau} = -Kn^2, \quad (1)$$

которое в интегральной форме имеет вид:

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = K\tau \quad (2)$$

где n_0 и n — начальная концентрация частиц и концентрация частиц в момент времени τ , м^{-3} ; K — константа скорости коагуляции, $\text{м}^3/\text{с}$.

Константа скорости броуновской коагуляции аэрозоля в реакционном объеме для образующихся частиц при $\text{Re} > 10^6$ равна

$$K_6 = 8\pi r_c D_c \quad (3)$$

где r_c — радиус частиц и их агрегатов, м; $D_c = \frac{RTB}{N_0}$ —

скорость диффузии частиц, $\text{м}^2/\text{с}$; $B = 1/(6\pi r_c \mu)$ — величина, характеризующая подвижность частиц в аэрозоле, $\text{м}/(\text{Н} \cdot \text{с})$; μ — динамическая вязкость среды,

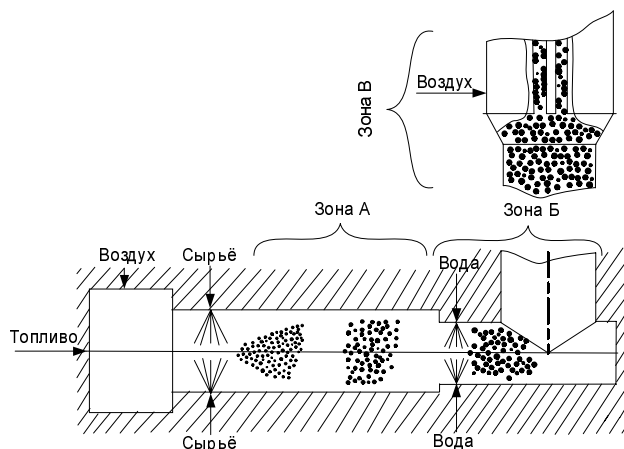


Рис. 1. Схема печного процесса получения глобулярного дисперсного углерода

золе, м/(Н·с); μ — динамическая вязкость среды, Н·с/м²; N_0 — число Авогадро, 1/моль.

После соответствующих преобразований уравнение для расчета константы скорости коагуляции аэрозоля в процессе образования и роста агрегатов частиц дисперсного углерода принимает вид [6, 7]:

$$K_6 = \frac{4RT}{3\mu N_0} \quad (4)$$

Если принять среднемедианный размер частиц углерода в реакционном объеме равным 30 нм, а время пребывания в нем аэрозоля $(5-7) \cdot 10^{-2}$ с, то среднемедианный размер агрегатов, рассчитанный по уравнениям (2)–(4), перед зоной заковки дисперсного углерода составит 60–80 нм при константе скорости коагуляции $(5-7) \cdot 10^{-16}$ м³/с.

В зоне заковки (зона Б, рис. 1), где время пребывания аэрозоля составляет $(1-3) \cdot 10^{-2}$ с, скорость коагуляции возрастает. Механизм тепловой коагуляции здесь меняется, так как в поток аэрозоля для его охлаждения вводится в распыленном виде вода. Поскольку размер капель воды на несколько порядков больше размера агрегатов углеродных частиц, константа скорости коагуляции аэрозоля в этой зоне может быть описана уравнением:

$$K_6 = \frac{RT}{3\mu N_0} \left(\sqrt{\frac{r_a}{r_k}} - \sqrt{\frac{r_k}{r_a}} \right)^2 \quad (5)$$

где r_a и r_k — среднемедианный размер агрегатов углеродных частиц и капель воды, м.

Эффект инерционного осаждения частиц размером $d_a < 0,5$ мкм на испаряющихся каплях воды в потоке аэрозоля ничтожно мал. Время жизни капли при охлаждении аэрозоля дисперсного углерода составляет $(3-4) \cdot 10^{-2}$ с при температуре воды 90 °С. Распыление воды, перегретой до 120 °С, снижает время жизни капли до $1 \cdot 10^{-2}$ с. Экспериментально установлено, что среднемедианные размеры агрегатов частиц дисперсного углерода на выходе из зоны заковки реактора составляют 300–500 нм, а константа скорости коагуляции имеет порядок 10^{-15} м³/с.

В воздухоподогревателе (зона В, рис. 1), где поток аэрозоля проходит по трубкам (внутренний диаметр 32 мм) со скоростью до 80 м/с, в пристенном слое преобладает механизм градиентной коагуляции. Для этих условий константу скорости коагуляции аэрозоля можно определить по уравнению:

$$K_{гр} = 5,33\Gamma_o r_a^3 \quad (6)$$

где $\Gamma_o = W_{тр}^2/\nu$; $W_{тр}$ — скорость аэрозольного потока у стенки, равная ~5% скорости осевого потока; ν — кинематическая вязкость, м²/с.

Расчетами и экспериментально установлено, что среднемедианный размер агрегатов дисперсного углерода на выходе из воздухоподогревателя составляет 0,5–0,8 мкм, а содержание фракций агрегатов размером > 5 мкм достигает 30%(масс.) при константе скорости градиентной коагуляции $(3-4) \cdot 10^{-15}$ м³/с. Это создает условия для ускорения кинематической и турбулентной коагуляции аэрозоля в холодильнике, где за счет испарения тонко распыленной воды (среднемедианный диаметр капель ~100 мкм) в аэрозольном пото-

ке температура дисперсионной среды снижается от 470–530 до 300–320 °С.

Константа кинематической коагуляции аэрозоля может быть выражена следующим уравнением:

$$K_k = \frac{3\eta W_s z_k d_a^3 \rho_a}{16 z_a r_k \rho_k} \quad (7)$$

где η — эффективность захвата агрегатов каплями воды; W_s — относительная скорость движения капли и агрегата; z_k и ρ_k — массовая концентрация и плотность капель воды; d_a , ρ_a , z_a — диаметр, кажущаяся плотность, массовая концентрация агрегата дисперсного углерода, соответственно.

Анализ уравнения (7) показывает, что константа скорости кинематической коагуляции аэрозоля резко возрастает с увеличением размеров агрегатов углеродных частиц при числе Рейнольдса $Re = 3 \cdot 10^6$.

В турбулентном аэрозольном потоке при введении в него капель воды, когда имеет место существенное различие размеров агрегатов дисперсного углерода и капель воды, а также плотностей и скоростей движения дисперсионной среды, агрегатов и капель наиболее эффективна турбулентная коагуляция. Константа скорости турбулентной коагуляции описывается уравнением:

$$K_{тб} = \eta\pi \frac{\rho_k W_o^{9/4} r_k^4}{\rho_e \nu^{5/4} D_r} \quad (8)$$

где W_o — осевая скорость аэрозольного потока, м/с; ρ_e — плотность дисперсионной среды, кг/м³; D_r — диаметр газохода, м.

Значения константы скорости турбулентной коагуляции в холодильнике-испарителе находятся в интервале 10^{-8} – 10^{-9} м³/с, а среднемедианные размеры агрегатов дисперсного глобулярного углерода в аэрозольном потоке при времени эффективного осаждения агрегатов на каплях воды, равном 0,2 с, достигают $d_{50} = 10$ –15 мкм (дисперсия $\sigma = 10$), что подтверждено экспериментально [8].

Анализ механизмов коагуляции аэрозоля дисперсного углерода на всех стадиях его жизни показывает, что путём изменения технологических параметров (например, скорости аэрозольного потока, температуры и вязкости дисперсионной среды) можно управлять процессами коагуляции аэрозоля.

Выделение агрегатов частиц глобулярного дисперсного углерода из аэрозольного потока

Укрупненные агрегаты частиц дисперсного углерода обычно выделяют из аэрозольного потока в поле центробежных сил. На эффективность осаждения аэрозольных частиц в большой степени влияет скорость стока газа в циклоне из внешней спирали во внутреннюю. Это влияние снижено в предложенном нами циклоне, работающем в режиме концентратора [9, 10–13].

Рассмотрим процесс осаждения агрегатов дисперсных частиц в циклоне-концентраторе при условии: $\alpha < 1$, где $\alpha = V/(V + \nu)$, $(V + \nu)$ — расход аэрозольного потока на входе в циклон, точка 1 (см. рис. 2); V и ν — расход аэрозольного потока на выходе из циклона, соответственно в точке 2 и точке 3.

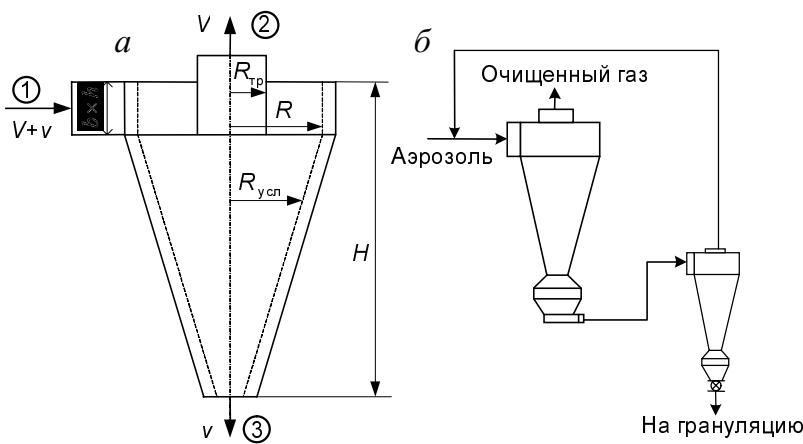


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема работы циклона-концентратора: а — расчетная схема циклона-концентратора; б — схема движения аэрозольного потока в закольцованной системе осаждения дисперсного углерода

Особенностью технологического режима осаждения аэрозоля в циклоне-концентраторе является снижение скорости стока из внешней спирали вращающегося потока во внутреннюю за счёт удаления осажденного целевого продукта из полости циклона-концентратора с частью v аэрозольного потока. Чем меньше величина α , тем ниже скорость стока дисперсионной среды и выше эффективность осаждения аэрозольных частиц и агрегатов. Математический расчет процесса осаждения твердых частиц из аэрозольного потока дает уравнение для вычисления минимального размера аэрозольных частиц, улавливаемых циклоном на 100% [13]:

$$D_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{9\mu R \alpha^{0,25} (1-\beta)}{\pi N \rho_a W}} \quad (9)$$

где N — количество витков спирали, описываемых аэрозольным потоком; β — отношение радиусов выходной трубы и цилиндрической части циклона-концентратора; $R = 0,5 \sqrt{\frac{(V+v)}{396W}}$ — радиус цилиндрической части циклона; W — скорость входа аэрозольного потока в циклон.

На эффективность осаждения в циклоне пористых агрегатов дисперсного углерода, кажущаяся плотность ρ_a которых для активных и электропроводных марок дисперсного углерода в 15–30 раз ниже истинной, оказывают влияние турбулентные пульсации дисперсионной среды [14, 15]. Эффективность осаждения частиц из аэрозольного потока в циклоне-концентраторе можно рассчитать по уравнению:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A}{\alpha^{1,5}}\right) \quad (10)$$

где $A = \frac{4\pi W r_c^2 \rho_a H}{9\mu b h}$ (величины H, b, h — см. рис. 2)

Уравнение (10) позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью рассчитать эффективность осаждения аэрозоля в циклоне-концентраторе с учетом величины α . Эффективность осаждения аэрозоля

повышается с возрастанием скорости входящего аэрозольного потока в циклон-концентратор в интервале 12–18 м/с, а также с увеличением размера агрегатов частиц дисперсного углерода и уменьшением α в интервале 0,9–0,7. При $\alpha = 0,8$ и скорости входящего аэрозоля в циклон 15 м/с эффективность осаждения составляет 92–93%, а в системе из двух последовательно установленных циклонов она равна 95–96% [12].

Фильтрация аэрозоля дисперсного углерода в рукавном фильтре

Фильтрацию аэрозоля дисперсного углерода активных марок в мировой практике осуществляют в основном на стеклотканевых фильтрах с предварительным осаждением целевого продукта в циклоне (фильтрация аэрозоля при начальной концентрации частиц $C_n = 3–10 \text{ г/м}^3$) или на фильтре с коагуляторами (фильтрация при $C_n = 70–80 \text{ г/м}^3$) с использованием ворсистой стеклотканей [7, 16–35]. Термохимическая обработка стеклотканей композицией, в состав которой входят полиметилфенилсилоксаны ПФМС-4, суспензия фторопласта 4Д и сульфат бис(этилендиамин)-меди, улучшает гидрофобные свойства материала (регенерируемость ткани) [17].

Известно, что чистая стеклоткань с ворсистой утолщенной нитью и высокой газопроницаемостью не обладает эффективной фильтрующей способностью, а служит лишь подложкой для образования и удержания фильтрующего слоя осажденных агрегатов дисперсного углерода [36]. Способность частиц аэрозоля коагулировать с образованием прочных и рыхлых агрегатов позволяет создать на ворсистой поверхности стеклоткани пористый фильтрующий слой и обеспечить фильтрацию аэрозоля за счет осаждения и адгезии частиц и их агрегатов на поверхности осажденных частиц. Если предполагать, что осаждающиеся агрегаты дисперсного углерода частично накапливаются как в порах ткани и находятся в них в равновесном состоянии, так и в пористом слое углерода в период его восстановления после регенерации стеклоткани, то общее сопротивление системы «ткань—слой осажденных агрегатов углерода» можно принять равным сумме остаточного сопротивления равновесно запыленной ткани и сопротивления пористого слоя, осажденного в период между регенерациями ткани:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 \quad (11)$$

Сопротивление стационарного пористого слоя частиц при ламинарном режиме движения среды определяется уравнением Козени—Кармана:

$$\Delta P_2 = \frac{45\mu(1-m_{\text{сл}})W_{\text{ф}} \Pi}{\rho_a m_{\text{сл}}^3 r_n^2} \quad (12)$$

где $m_{\text{сл}} = (\rho_a - \rho_{\text{сл}})/\rho_a$ — пористость слоя осадка; $W_{\text{ф}}$ — скорость фильтрации, м/с; r_n — средний квадратичный (по поверхности) радиус частиц, м; μ — динамическая вязкость, Н·с/м²; Π — пылеемкость, кг/м²; $\Pi = W_{\text{ф}} C \tau_{\text{ф}}$; C — концентрация агрегатов в аэрозоле;

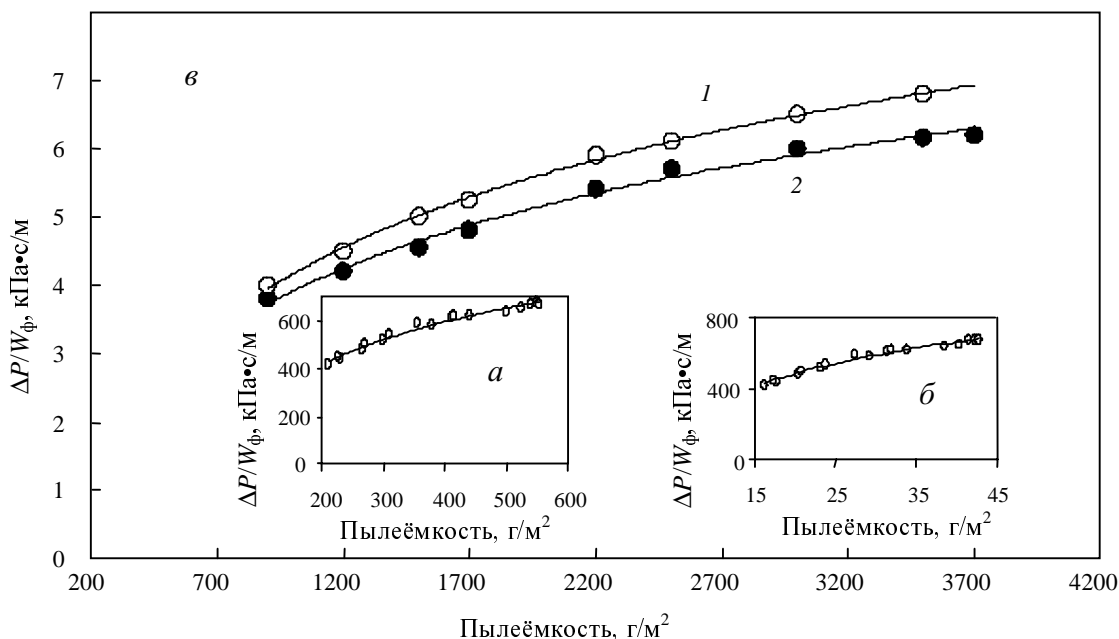


Рис. 3. Зависимость удельного аэродинамического сопротивления от пылеемкости фильтра:

a — фильтрация малоконцентрированного аэрозоля (стеклоткань); *б* — фильтрация высококонцентрированного аэрозоля (стеклоткань); *в* — фильтрация малоконцентрированного аэрозоля (зернистый слой углеродных гранул): 1 — $d_3 = 0,6-1,6$ мм; 2 — $d_3 = 0,3-1,0$ мм

τ_ϕ — время фильтрации аэрозоля между процедурами регенерации стеклоткани; ρ_a — кажущаяся плотность частиц, кг/м^3 .

Основной характеристикой, описывающей работу фильтра в реальных условиях, является зависимость удельного сопротивления $\Delta P/W_\phi$ фильтрующей перегородки от ее пылеемкости (рис. 3). Если принять, что удельное сопротивление ткани с пористым слоем агрегатов углеродных частиц в течение периода фильтрации линейно возрастает по мере накопления слоя, то можно записать:

$$\Delta P/W_\phi = \Delta P^l/W_\phi + K_{\text{сл}}\Pi$$

где $\Delta P^l/W_\phi$ — удельное сопротивление ткани перед регенерацией, которое несколько больше остаточного удельного сопротивления равновесно запыленной ткани. Коэффициент удельного сопротивления пористого слоя $K_{\text{сл}}$ характеризует структуру слоя на ткани фильтра и численно равен тангенсу угла наклона кривой зависимости $\Delta P/W_\phi$ от Π .

Коэффициент $K_{\text{сл}}$ зависит от величины пористости слоя, плотности и размера осаждаемых агрегатов частиц. Чем больше пористость слоя и размеры агрегатов углеродных частиц и ниже плотность фильтрующего слоя, тем меньше $K_{\text{сл}}$ и аэродинамическое сопротивление фильтра, тем большей может быть толщина слоя осадка и эффективнее протекать процессы фильтрации аэрозоля и регенерации ткани. Установлено, что регенерацию стеклоткани в восьмисекционных фильтрах следует вести соответственно циклограмме: фильтрация аэрозоля от 5 до 15 мин; регенерация стеклоткани 20 с [8]. Продолжительность фильтрации аэрозоля между регенерациями стеклоткани зависит от скорости фильтрации и дисперсного состава агрегатов, а также от концентрации дисперсного углерода в аэрозольном потоке. Предварительная

градиентная, турбулентная и кинематическая коагуляция аэрозоля в специальных коагуляторах и газоохладителях позволяет получить полидисперсный аэрозоль, в котором отсутствуют частицы размером менее 1,0 мкм, а среднемедианный размер агрегатов d_{50} достигает 80 мкм. На ворсистой стеклоткани образуется массивный пористый слой агрегатов дисперсного углерода, который легко разрушается при регенерации стеклоткани и в виде крупных агломератов осажается в бункер фильтра. Сопротивление системы ΔP при фильтрации высококонцентрированного аэрозоля ниже, чем при фильтрации малоконцентрированного аэрозоля, и эта разница тем больше, чем выше скорость фильтрации (рис. 4).

Несмотря на определенные успехи, достигнутые в области исследований и освоения процессов высо-

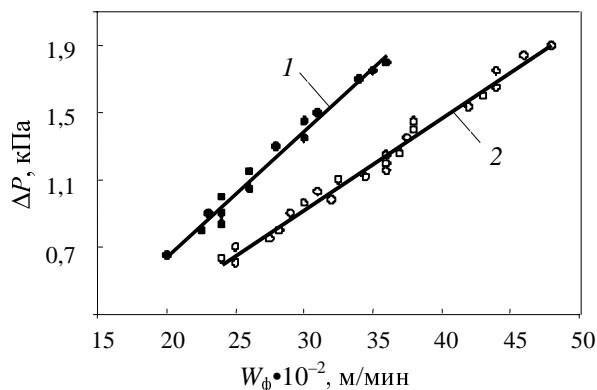


Рис. 4. Зависимость аэродинамического сопротивления фильтров от скорости фильтрации:

1 — фильтрация с предварительным осаждением аэрозоля в циклоне-концентраторе; 2 — фильтрация с коагуляторами

котемпературной фильтрации аэрозолей в производстве технического углерода как в нашей стране [8, 16—32], так и за рубежом [33, 34, 37], они не устраняют такие основные недостатки этих процессов, как низкая скорость фильтрации аэрозолей, 0,004—0,005 м/с; высокая стоимость фильтрующих материалов; необходимость сложного ручного труда при замене фильтрующих элементов; ненадежность системы фильтрации аэрозоля в рукавном фильтре, так как повреждение хотя бы одного рукава из сотен в фильтре, приводит к резкому снижению эффективности процесса.

В последние годы появились публикации о новых исследованиях процесса осаждения частиц на волокнистых фильтрах [38—46], которые расширяют знания в области фильтрации аэрозолей. Однако результаты этих исследований касаются фильтрации аэрозолей при концентрациях дисперсной твердой фазы в интервале 0,5—10 мг/м³ и не могут быть реализованы в существующих технологиях осаждения дисперсного углерода.

Фильтрация аэрозоля дисперсного углерода на зернистом фильтре

Рядом преимуществ по сравнению с фильтрацией аэрозолей на тканевых фильтрах обладает разрабатываемый в ИППУ СО РАН процесс осаждения аэрозоля дисперсного углерода на стационарном слое пористых углеродных гранул. Это

- высокая эффективность улавливания частиц всех размеров (до 100%);
- скорость фильтрации в 50—100 раз выше, чем на стеклотканевом фильтре;
- компактность установок и экономичность процесса фильтрации;
- полная автоматизация процесса.

Результаты исследований процесса фильтрации высокодисперсных аэрозолей на слое пористых углеродных гранул представлены в работах [47—54]. В экспериментах в качестве исходного материала для приготовления аэрозоля использовали дисперсный углерод класса 100 (диаметр частиц по измерениям с помощью электронного микроскопа 19 нм) и класса 200 (диаметр частиц 21 нм). Среднемедианный размер агрегатов в аэрозоле составлял 1,7—5,5 мкм — аэрозоль по дисперсному составу был близок к промышленным аэрозолям, получаемым на стадии перед фильтрацией на стеклотканевых фильтрах. Фильтруемый поток аэрозоля проходил сверху вниз через стационарный слой гранул, размещенных на аэродинамической решетке.

В качестве материала фильтрующего слоя использовали гранулы углерода класса 500 (диаметр первичных частиц 50—60 нм, гранулометрический состав 0,6—1,0 мм, насыпная плотность 0,38 г/см³, удельный объем пор 1,35 см³/г). Условия экспериментов: высота фильтрующего слоя от 150 до 200 мм; концентрацию агрегатов частиц дисперсного углерода в аэрозоле варьировали от 200 до 10 г/м³, скорость фильтрации от 0,3 до 0,4 м/с; концентрация частиц в потоке очищенного воздуха после фильтра составляла от 1 до 25 мг/м³; пылеемкость фильтра от 0,2 до 12 кг/м³. Регенерация слоя в режиме псевдооживления (унос агрегатов частиц из слоя) при скорости 0,5—0,6 м/с в

течение 20 с обеспечивает восстановление начального аэродинамического сопротивления слоя. Отмечено возрастание высоты слоя по мере увеличения числа регенераций, что объясняется адгезией агрегатов частиц к поверхности гранул.

На основании результатов экспериментов была установлена эмпирическая зависимость аэродинамического сопротивления запыленного слоя фильтра от скорости фильтрации аэрозоля W_ϕ , концентрации аэрозольных частиц в потоке аэрозоля C и их дисперсного состава d_{50} , времени фильтрации τ_ϕ , а также от усредненного размера гранул d_3 в зернистом слое фильтра и высоты слоя H [51—58]:

$$\Delta P = 46,5 W_\phi^{1,5} \cdot C^{0,2} \cdot d_{50}^{-0,08} \cdot \tau_\phi^{0,06} \cdot d_3^{-0,34} \cdot H^{0,74} \quad (13)$$

Эффективность фильтрации аэрозоля в стационарном зернистом слое гранул и в зависимости от аэродинамического сопротивления запыленного слоя описывается вероятностным законом:

$$\eta = 0,5(1 + \operatorname{erf} \lambda) \quad (14)$$

где $\operatorname{erf} \lambda$ — табулированный интеграл, $\lambda = \gamma \cdot \Delta P^{0,5}$,

$$\gamma = A \frac{\delta}{\mu} \left[C \cdot \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_3} \cdot (1 - \varepsilon) \right]^{0,5}, \quad \varepsilon — \text{пористость слоя гранул.}$$

Уравнения (13) и (14) позволяют с достаточно высокой степенью точности провести инженерные расчеты аэродинамического сопротивления зернистого фильтра и эффективности фильтрации на нем аэрозоля дисперсного углерода. Экспериментальные исследования зернистого фильтра производительностью 100000 м³/ч на опытно-промышленной установке в производстве дисперсного углерода К354 (среднемедианный размер аэрозольных частиц 40—50 нм) [59] показали, что при средней входной концентрации частиц 300—400 мг/м³ проскок частиц через фильтрующий слой гранул углерода не превышает 20 мг/м³.

Изучение факторов, определяющих процесс регенерации фильтрующих элементов тканевого и зернистого фильтров, позволило установить следующее. При регенерации фильтрующей ткани на элемент пылевого слоя действуют силы, удерживающие его на поверхности ткани, а именно, нормальная F_H и тангенциальная F_T составляющие силы сцепления слоя частиц с поверхностью, обусловленной адгезионно-аутогезионными свойствами частиц (рис. 5).

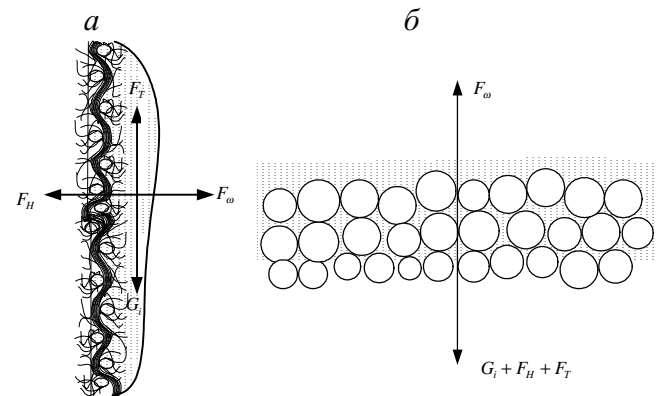


Рис. 5. Диаграмма сил, действующих при псевдооживлении слоя уловленных агрегатов частиц: а — тканевый фильтр; б — зернистый фильтр

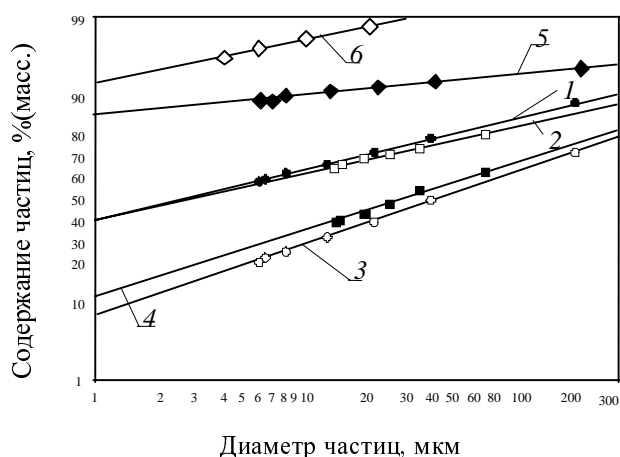


Рис. 6. Логарифмически нормальное распределение дисперсного состава аэрозоля до и после фильтрации на стеклоткани и зернистом фильтре:

1 — перед стеклотканью, дисперсия $\sigma = 30$; 2 — перед зернистым фильтром, $\sigma = 50$; 3 — при разрушении фильтрующего слоя на стеклоткани, $\sigma = 13$; 4 — при псевдооживлении зернистого слоя, $\sigma = 16$; 5 — после стеклоткани, $\sigma = 200$; 6 — после зернистого фильтра, $\sigma = 150$

Отрыв элемента слоя частиц от ткани осуществляется под действием силы тяжести слоя частиц, отнесенной к единице поверхности G_b и внешней силы, возникающей под воздействием очищенного газа F_{ω} . Отсюда условие отрыва слоя агрегатов частиц от поверхности ткани может быть записано так:

$$F_{\omega}^2 > F_T^2 + F_H^2 - G_b^2$$

Что касается запыленного зернистого фильтра, то условием начала его псевдооживления является

$$F_{\omega} > G + F_H + F_T$$

Результаты исследований процессов фильтрации аэрозоля дисперсного углерода на стеклотканевом и зернистом фильтрах и регенерации фильтрующей перегородки представлены на рис. 6. Основным преимуществом зернистого фильтра перед тканевым является значительно более высокая скорость фильтрации аэрозолей, что позволяет создавать высокоэффективные малогабаритные установки улавливания дисперсных материалов из аэрозольных потоков.

Заключение

На основе проведенных исследований нами предлагается принципиально новая технологическая схема выделения нанодисперсного углерода классов 100 и 200 из аэрозольных потоков. Она включает два последовательно установленных циклона-концентратора и зернистый углеродный фильтр производительностью до 100 тыс. м³/ч. Для реализации данной технологии предусматривается создание технологических установок для улавливания твердых загрязняющих веществ из промышленных газовых выбросов в нефтехимии, черной и цветной металлургии, ряде других отраслей промышленности.

В заключение отметим, что в Институте проблем переработки углеводородов СО РАН продолжаются

работы по изучению процессов выделения углеродных частиц из аэрозольных потоков. В частности, представляют интерес исследования по коагуляции и эффективному осаждению на зернистом фильтре сажевых частиц из выхлопных газов дизельного агрегата, для которых фильтрация в тканевом фильтре малоэффективна [55, 60].

Автор выражает благодарность чл.-корр. РАН В.А. Лихолобову и докт. техн. наук профессору В.Ф. Суворикину за полезное обсуждение при подготовке данной статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суворикин В.Ф., Горюнов Г.Л. В: Совершенствование технологии производства активных и среднеактивных марок технического углерода. Сб. научных трудов ВНИИТУ. М., 1986, с. 24—35.
2. Гилязетдинов Л.П. Коагуляционный рост частиц сажевого аэрозоля. Физика аэродисперсных систем, вып. 7. Киев: изд-во Киевского университета, 1972.
3. Шукин Е.Д. Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 2004, 445 с.
4. Траус В. Промышленная очистка газов. М.: Химия, 1981, 616 с.
5. Yutaka Hisaeda e. a. Proc. 2000 Int. Joint Power Generation Conf. Miami Beach, Florida, 2000.
6. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. Изд. Академии наук СССР, 1955, 351 с.
7. Шопин В.М. Дисс. ...канд. техн. наук, Л., ЛТИ им. Ленсовета, 1975.
8. Шопин В.М., Супонев К.В., Дмитриев К.И. Тр. IX межд. науч.- практ. конф. «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты», Кемерово, 2006, с. 302—305.
9. Авт. свид. СССР № 580914. опубл. 25.11.1977, бюл. № 43.
10. Шопин В.М. Научные труды ВНИИСП. Омск, 1972, с. 253—259.
11. Патент РФ № 2285025, опубл. 10.10.2006, бюл. № 28.
12. Патент РФ № 2290420, опубл. 27.12.2006, бюл. № 36.
13. Шопин В.М. Тр. VIII межд. науч.-практ. конф. «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты», Кемерово, 2005, с. 271—274.
14. Kirch R., Schmidt M., Löffler F. Staub-Reinhalting der Luft, 1990, Bd. 50, № 3, S. 113—118; № 4, S. 151—155.
15. Шопин В.М., Исаков В.П. В сб.: Пути развития промышленности технического углерода. М., 1978, с. 136—145.
16. Авт. свид. СССР № 674768, опубл. 25.07.1977, бюл. № 27.
17. Авт. свид. СССР № 718390, опубл. 29.02.1980, бюл. № 8.
18. Авт. свид. СССР № 858890, опубл. 30.08.1981, бюл. № 32.
19. Ермолин Е.В., Шопин В.М. Автоматизация производства технического углерода. Сб. научн. тр. ВНИИТУ. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1982, с. 27—37.
20. Авт. свид. СССР № 1263309, опубл. 15.10.1986, бюл. № 38.
21. Авт. свид. СССР № 1400648, опубл. 07.06.1988, бюл. № 21.
22. Шопин В.М., Ерохина В.С. Процессы получения технического углерода на высокопроизводительном оборудовании, его свойства и применение. Сб. научн. тр. ВНИИТУ. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1983, с. 48—55.
23. Авт. свид. СССР № 1139478, опубл. 15.02.1985, бюл. № 6.
24. Авт. свид. СССР № 1173593, приоритет 24.08.1983; переоформлено в патент РФ в 1996 г., опубл. 03.10.1997.
25. Авт. свид. СССР № 812317, опубл. 15.03.1981, бюл. № 10.
26. Шопин В.М., Рябчиков С.Я., Горячев И.К. Производство технического углерода и охрана окружающей среды. Матер. Всес. научно-технич. сов. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1987, с. 29—35.
27. Ерохина В.С., Луговская Е.К. Производство технического углерода и охрана окружающей среды. М., 1987, с. 36—41.
28. Авт. свид. СССР № 1391684, опубл. 30.04.1988, бюл. № 16.

29. Орлов В.Ю., Комаров А.М., Ляпина Л.А. Производство и использование технического углерода для резин. Изд-во Александр Рутман, Ярославль, 2002, 512 с.
30. Ивановский В.И. Технический углерод. Процессы и аппараты. Учебное пособие. Омск: Полиграф, 2004, 228 с.
31. Шопин В.М., Тукие В.И., Бойко Г.Н., Дмитриев К.И., Супонев К.В. Тр. IX межд. науч.-практ. конф. «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты», Кемерово, 2006, с. 297—300.
32. Шопин В.М., Ивановский В.И., Супонев К.В. Тр. VIII межд. науч.-практ. конф. «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты». Кемерово, 2005, с. 274—277.
33. Миллер Э. Улавливание пыли с помощью тканевого фильтра в промышленности технического углерода. Докл. на межд. конф. по техническому углероду. Carbon Black World, 2000, Япония, 1999.
34. Hammond M., Miller A. Докл. на межд. конф. по техническому углероду. Increasing Carbon Black Production Rates and Lowering Emissions with the Use of ВНА-ТЕХ, ePTFE Membrane Filtration Media, США, 2000.
35. Шопин В.М., Тукие В.И., Бойко Г.Н., Дмитриев К.И., Супонев К.В. Тр. IX межд. науч.-практ. конф. «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты», Кемерово, 2006, с. 297—300.
36. Ужов В.Н., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов фильтрами. М.: Химия, 1970, 320 с.
37. Dubey V., Savage T., Maindola V. Textiles a Usage Techniques, 2002, № 43, с. 26—30.
38. Черняков А.Л. Коллоид. ж., 2005, т. 67, № 5, с. 709—717.
39. Кири В.А. Там же, 2005, т. 67, № 3, с. 352—356.
40. Кири В.А. Ж. физ. химии, 2005, т. 79, № 12, с. 2292—2295.
41. Ролдугин В.И., Кири В.А., Стечкина И.Б. Там же, 2005, т. 79, № 5, с. 889—894.
42. Стечкина И.Б., Кири В.А. Коллоид. ж., 2001, т. 63, № 4, с. 517.
43. Кири В.А. Там же, 2001, т. 63, № 1, с. 73—78; 2004, т. 66, № 4, с. 497—503; 2006, т. 68, № 2, с. 198—206; 2006, т. 68, № 3, с. 293—298.
44. Ролдугин В.И. Успехи химии, 2003, т. 72, № 10, с. 931—959; 2004, т. 73, № 2, с. 123—156.
45. Кири В.А. Теоретические основы химической технологии, 2005, т. 39, № 1, с. 50—55.
46. Shinhao Yang, Lee W.M. J. Aerosol Sci., 2005, v. 36, № 4, p. 419—437.
47. Патент США № 4295867, опубл. 20.10.1981.
48. Шопин В.М., Супонев К.В., Теплоухов В.Л. Совершенствование технологии производства активных и среднеактивных марок технического углерода. Сб. научн. тр. ВНИИ-ТУ. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1986, с. 58—76.
49. Шопин В.М. Тр. междунар. симпозиума по адсорбции и хроматографии макромолекул. М.: Паимс, 1994, с. 101—104.
50. Шопин В.М., Супонев К.В., Крицкий А.В. Тез. докл. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Углеродные материалы», Новокузнецк, 1995, с. 12.
51. Шопин В.М. Тр. междунар. науч.-практ. конф. «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты», Кемерово, 2004, с. 121—124, 2004, с. 125—128.
52. Шопин В.М., Супонев К.В. Там же, 2004, с. 121—124.
53. Шопин В.М., Дмитриев К.И., Супонев К.В., Синникова В.Ф., Генрих Т.Н. Тр. IX междунар. науч.-практ. конф. «Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты». Кемерово, 2006, с. 293—296.
54. Шопин В.М., Супонев К.В., Теплоухов В.Л. В сб.: Производство технического углерода и охрана окружающей среды. Матер. Всес. научно-технического совещ. М., ЦНИИТЭнефтехим, 1987, с. 50—59.
55. Шопин В.М., Гладков О.А., Медяник А.Н., Шпраер В.К. Двигателестроение, 1984, № 12.
56. Авт. свид. СССР № 833285, опубл. 30.05.1981, бюл. № 20.
57. Авт. свид. СССР № 869797, опубл. 07.10.1981, бюл. № 37.
58. Шопин В.М. Сантехника, отопление, кондиционирование, 2005, №1, с. 100—101.
59. Шопин В.М., Супонев К.В. Там же, 2005, № 1, с. 98—99.
60. Kingsley S.J. Reavell J.S., Olfert B.W., Campbell S.J. J. Aerosol. Sci., 2007, v. 38, № 1, p. 52—68.

ABSTRACTS

Investigation of molecular mechanism formation of supported platinum catalysts Pt/Al₂O₃ type. O.B.Belskaya, V.K.Duplyakin Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I.Mendeleeva), 2007, v. LI, № 4.

In the work some stages of classic procedure of alumina-platinum catalysts preparation on molecular level are considered. Their understanding is important both from fundamental point of view and from the practical one. Nonuniformity of the properties of both participants of sorption process (of the solution of an active component precursor and oxide surface) able to influence on the manner of their interaction on the adsorption stage is shown. Existent opinions (and their evolution) on the adsorption mechanism of platinum complexes on alumina surface from water solutions are presented. The influence of chemical processes nature taking place at the precursor adsorption on electron and structural properties of supported metal formed is demonstrated. It is determined that realization of strong «metal complex — support» interaction is able to provide specific adsorption and catalytic properties of platinum in reactions of hydrocarbons conversion.

Modern concepts of platinum state in supported catalysts for engine fuels obtaining. A.S.Belyi, M.D.Smolikov, D.I.Kir'yanov, I.E.Udras Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn.

Ross. Khim. ob-va im. D.I.Mendeleeva), 2007, v. LI, № 4.

Modern models of disperse platinum state in low-percentage industrial catalysts for engine fuels obtaining (reforming process catalysts) are considered. The original approach based on the surface center division by atoms condition into metal (Pt⁰) and ionic platinum (Pt) is used for the evaluation of platinum surface atoms state. Physicochemical properties of specific surface centers Pt⁰ and Pt and their role in the main reactions of catalytic reforming process are discussed.

The distribution design of active components throughout the pores with different sizes in catalysts of hydrocatalytic processes of oil refinery. M.D.Smolikov, A.S.Belyi, I.E.Udras, D.I.Kir'yanov Ross. Khim. Zhurn. (Zhurn. Ross. Khim. ob-va im. D.I.Mendeleeva), 2007, v. LI, № 4.

The current state of the problems of distribution of an active catalyst component in porous support is analyzed. The experimental approach for measurement of number of Pt and Mo surface centers in pores with different sizes of hydrocatalytic processes catalysts on the basis of SiO₂ and Al₂O₃ is suggested. The results of the influence of preparation conditions on distribution of the active components on the surface of the pores of different size in the catalysts are cited.