

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ ГЛУБИННОМ ФИЛЬТРОВАНИИ И ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МОТОРНОГО МАСЛА

В.М. Капцевич,

заведующий каф. технологии металлов БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

В.К. Корнеева,

ст. преподаватель каф. технологии металлов БГАТУ

А.Н. Леонов,

профессор каф. основ научных исследований и проектирования БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

Т.А. Богданович,

студент БГАТУ

Проведен анализ основных механизмов, приводящих к столкновению частиц загрязнений со стенками поровых каналов. На примере моторного масла установлены зависимости вероятностей осаждения частиц загрязнений в фильтрующем материале от размеров его частиц, природы частиц загрязнений, температуры очищаемой среды и скорости фильтрации.

Ключевые слова: глубинное фильтрование, фильтрующие материалы, механизмы осаждения, прямое столкновение, инерция, седиментация, диффузия, вероятность столкновения, моторное масло

This article deals with the analysis of the main mechanisms leading to the collision of contamination particles with the walls of pore channels. Using the example of engine oil, the dependencies of probabilities of contaminants particles precipitation in a filtering material on the size of its particles, the nature of the particles of contamination, the temperature of the medium to be cleaned and the rate of filtration are established.

Keywords: deep filtration, filter materials, precipitation mechanisms, direct collision, inertia, sedimentation, diffusion, collision probability, engine oil.

Введение

Процесс фильтрования является наиболее простым и эффективным способом удаления загрязнений при очистке жидкостей и газов [1-5]. Известными и широко применяемыми примерами фильтрования являются: очистка моторных масел и рабочих жидкостей гидравлических систем, также стерилизационное фильтрование напитков, соков, пива, вина, медицинских и биохимических продуктов и др.

Фильтрование – наиболее полное удаление всех частиц из смазочных материалов, когда доля твердой фазы в ней невелика ($1-10 \text{ г/м}^3$).

Фильтрование является гидродинамическим процессом, скорость которого прямо пропорциональна разности давлений, создаваемых по обеим сторонам фильтрующего материала (ФМ), и обратно пропорциональна сопротивлению, испытываемому жидкостью при ее движении через поры ФМ и слой образовавшегося осадка. В зависимости от решаемой задачи фильтрование разделяют на поверхностное (рис. 1, а) и глубинное (рис. 1, б). При очистке смазочных материалов основным является глубинное фильтрование.

При глубинном фильтровании основными процессами осаждения (кольматации) являются как непосредственный механический захват частиц твердой фазы, так и их адсорбция под действием физических и химических сил на внутренней поверхности пор ФМ. При этом методе фильтрования удается отделить значительную долю частиц твердой фазы, размеры которых меньше размеров пор, хотя на основании чисто геометрических соотношений этих размеров, кажется, что указанные частицы могли бы свободно пройти через ФМ.

Процесс осаждения частиц загрязнений в ФМ зависит от свойств частиц загрязнений, свойств ФМ и очищаемой жидкости, а также режимов ее течения. При решении вопросов, связанных с эффективностью фильтрования, важнейшая роль отводится определению в каждом конкретном случае влияния тех или иных механизмов осаждения [6, 7].

Цель настоящей работы – провести анализ основных физических механизмов, приводящих к столкновению частиц загрязнений со стенками поровых каналов, и на примере моторного масла, в рамках существующих представлений, оценить вероятности этих столкновений.

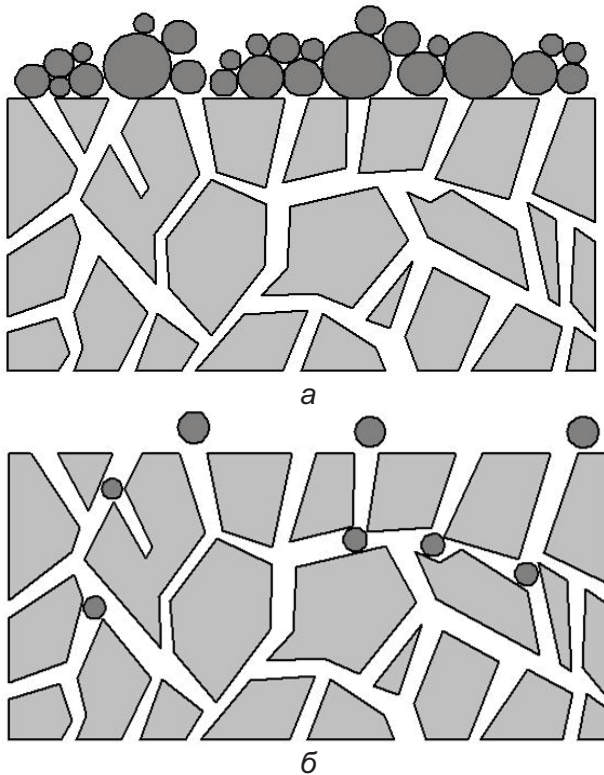


Рисунок 1. Поверхностное (а) и глубинное (б) фильтрование

Основная часть

Известно [6, 7], что процессы осаждения частиц загрязнений из очищаемой среды в поровых каналах ФМ представляют собой сложные физико-химические процессы, зависящие, во-первых, от свойств частиц загрязнений, основными из которых являются размеры частиц, их плотность и концентрация, во-вторых, от свойств ФМ, к которым относятся размеры частиц, образующих ФМ (диаметр частиц порошка $D_ч$ или диаметр волокна $D_в$), пористость и

коэффициент проницаемости, в-третьих, от характеристик очищаемой жидкости – кинематической и динамической вязкости, плотности и режимов ее течения – скорости фильтрования.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса осаждения частиц загрязнений в ФМ направлены на установление приведенных выше зависимостей. При решении этих вопросов важнейшая роль отводится определению в каждом конкретном случае влияния тех или иных механизмов осаждения, к основным из которых относятся механизмы прямого столкновения, диффузии, седиментации и инерции [7, 8]. Рассмотрим эти механизмы (рис. 2).

Механизм прямого столкновения (Interception). Осаждение частиц загрязнений в результате прямого столкновения возникает всякий раз, когда линии тока, по которым движутся частицы, проходят рядом с поверхностью препятствия на расстоянии, меньшем или равном половине их диаметра (рис. 2, а). При этом, если размер частицы больше размера поры, происходит ее закупоривание, так называемый, ситовой эффект, которое наблюдается также и при поверхностном фильтровании, и является частным случаем эффекта прямого столкновения.

Основным параметром, характеризующим прямое столкновение, является отношение d/D , где d – диаметр частиц загрязнений, а D – диаметр частиц, образующих ФМ (диаметр частиц порошка $D_ч$ и диаметр волокна $D_в$). Величина этого параметра оказывает существенное воздействие на процесс осаждения в пористых средах. Так, по данным авторов источника [9], при $d/D > 0,12$ наблюдается быстрое и необратимое забивание ФМ. Если $d/D < 0,12$, то наблюдается обратимый режим забивания – процесс коагуляции протекает одновременно с процессом декоагуляции. Аналогичные результаты были получены авторами источника [10], которые экспериментально установили, что при $d/D > 0,15$ пористая среда необратимо забивается, а при $d/D < 0,065$ забивка остается незначительной и происходит лишь частичное осаждение

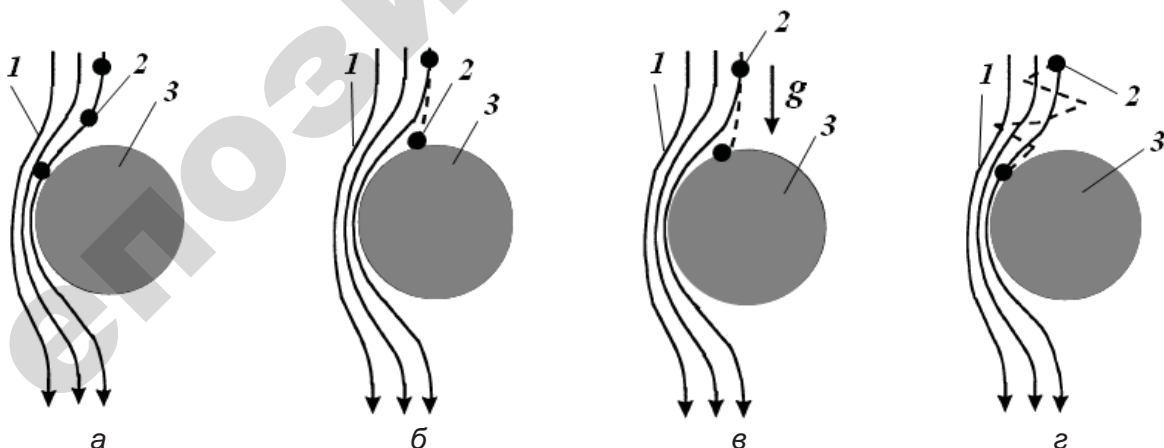


Рисунок 2. Механизмы осаждения: а – прямое столкновение; б – инерция; в – седиментация; г – диффузия; 1 – линия тока; 2 – частица загрязнений; 3 – частица, образующая пористый каркас ФМ

загрязнителя в ФМ, при котором процессы захвата частиц загрязнений (кольматация) уравниваются их срывом и удалением (декольматация) из ФМ.

Анализ многочисленных экспериментальных данных, проведенный С.В. Беловым [11], показывает, что отношение среднего размера пор ФМ к среднему размеру частиц, из которого они изготовлены, при пористости $\Pi = 0,4$ изменяется от 0,25 до 0,5. Учитывая эти данные, нетрудно определить соотношение размеров частиц загрязнений и средних размеров пор ФМ $d_{п\text{ ср}}$, при которых забивание необратимо. Тогда неравенству $d/D > 0,12$ соответствует $d/d_{п\text{ ср}} > 0,24-0,48$, а $d/D > 0,15$ – неравенству $d/d_{п\text{ ср}} > 0,3-0,6$.

Механизм инерции (Inertia). Осаждение под действием этого механизма является следствием действия сил инерции, вынуждающих частицы загрязнений отклоняться от линий тока, в результате чего они приходят в столкновение с препятствием и удерживаются на нем (рис. 2, б).

Механизм инерции характеризуется числом Стокса, которое равно [12, 13]

$$St = \frac{\rho_t d^2 v_\phi}{18\mu D},$$

где v_ϕ – скорость фильтрации, м/с;

μ – динамическая вязкость очищаемой жидкости, Па·с;

ρ_t – плотность частиц загрязнений, кг/м³.

В работе [14] авторы определили критическое значение числа Стокса, меньше которого инерционным осаждением можно пренебречь. Это критическое значение оказалось равным 1/16, т.е. при $St < 1/16$ осаждение частиц загрязнений на препятствии из-за эффекта инерции не происходит.

Механизм седиментации (Gravity). Этот механизм обусловлен вертикальным отклонением частиц загрязнений от линии тока во время прохождения их через ФМ под действием силы тяжести (рис. 2, в).

Если предположить, что сила тяжести при движении частиц уравнивается силой сопротивления Стокса, то скорость седиментации частиц загрязнений v_c можно определить из выражения [12]:

$$v_c = \frac{d^2(\rho_t - \rho_{ж})g}{18\mu},$$

где $\rho_{ж}$ – плотность очищаемой жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

На практике, при оценке влияния седиментации на процесс осаждения, считают [7], что при $v_c/v \leq 0,01$ (где v – действительная скорость жидкости в поровых каналах, $v = v_\phi/\Pi$, Π – пористость) осаждением частиц загрязнений под действием седиментации можно пренебречь.

Механизм диффузии (Diffusion). Под действием этого механизма осаждение частиц загрязнений в фильтровальном элементе происходит в результате их столкновения с молекулами жидкости. В результате этих столкновений частица загрязнений, двигаясь с

несущим потоком, испытывает случайные смещения с линий тока и приходит в контакт со стенками поровых каналов и задерживается на них (рис. 2, з).

Диффузия характеризуется коэффициентом диффузии, который связан со средним квадратичным смещением частицы соотношением [15]:

$$\bar{x}^2 = 2D_{бр} t,$$

где \bar{x} – среднее квадратичное смещение, м;

$D_{бр}$ – коэффициент броуновской диффузии, м²/с;

t – время, с.

Величина коэффициента броуновской диффузии выражается законом Эйнштейна [15]:

$$D_{бр} = \frac{k_B T}{3\pi\mu d},$$

где k_B – постоянная Больцмана, равная $1,3804 \cdot 10^{-23}$, Дж/К;

T – абсолютная температура, К;

d – диаметр частиц загрязнений, м.

Броуновская диффузия тем интенсивнее, чем выше температура жидкости, чем меньше ее вязкость и размер частиц загрязнений.

Реальные процессы осаждения частиц загрязнений в ФМ характеризуются совместным воздействием вышеописанных механизмов осаждения. При этом, при различных характеристиках частиц загрязнений, свойств ФМ и режимов течения очищаемой жидкости, те или иные механизмы осаждения будут преобладать над другими. Так, например, авторы источника [16] считают, что основными механизмами осаждения являются прямое столкновение и диффузия, авторы источника [13] отдают предпочтение диффузии и инерционному осаждению, а в работе [17] – только одному инерционному осаждению.

Осаждение частиц в пористой среде описывается экспериментально установленной зависимостью Ивасаки [18]:

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -\lambda C, \quad (1)$$

где C – объемная концентрация частиц, %;

x – направление движения очищаемой жидкости, м;

λ – коэффициент фильтрования.

Теоретически можно показать, что коэффициент λ , входящий в уравнение (1) для порошковой λ_n и волоконной λ_b пористых сред, соответственно равны

$$\lambda_n = \frac{3(1-\Pi)\eta_0\alpha}{2D_n},$$

$$\lambda_b = \frac{4(1-\Pi)\eta_0\alpha}{\pi D_b},$$

где η_0 – вероятность столкновения частиц загрязнений с пористым каркасом;

α – вероятность осаждения.

При проведении теоретических расчетов многие авторы [19] принимают $\alpha = 1$, а при определении значений η_0 учитывают роль таких механизмов осаждения, как диффузия, прямое столкновение, седиментация и инерция, и считают, что

$$\eta_0 = \eta_{\text{пр ст}} + \eta_{\text{ин}} + \eta_{\text{сед}} + \eta_{\text{диф}}, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{пр ст}}$, $\eta_{\text{ин}}$, $\eta_{\text{сед}}$, $\eta_{\text{диф}}$, соответственно, вероятности столкновения под действиями механизмов прямого столкновения, инерции, седиментации и диффузии.

По данным авторов источников [19-21], вероятность столкновения в результате действия этих механизмов определяется следующими зависимостями:

– прямое столкновение [19]

$$\eta_{\text{пр ст}} = \frac{3}{2} \left(\frac{d}{D} \right)^2; \quad (3)$$

– инерция [21]

$$\eta_{\text{ин}} = \frac{\rho_{\text{т}} d^2 v_{\text{ф}}}{18 \mu D}; \quad (4)$$

– седиментация [19]

$$\eta_{\text{сед}} = \frac{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) d^2 g}{18 \mu v_{\text{ф}}}; \quad (5)$$

– диффузия [20]

$$\eta_{\text{диф}} = 0,9 \left(\frac{k_{\text{д}} T}{\mu d D v_{\text{ф}}} \right)^{2/3}. \quad (6)$$

Проиллюстрируем возможности использования выражений (2) – (6) для оценки вероятности столкновения частиц загрязнений на единичном коллекторе. В

качестве очищаемой среды выбрано моторное масло М-6/10Г₂ ($\rho_{\text{ж}} = 850,21 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,012 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при температуре $T = 373 \text{ К}$). Размеры частиц загрязнений выбирались в диапазоне $d = 10^{-8} \dots 10^{-4} \text{ м}$. Авторами публикации рассмотрены следующие варианты процесса осаждения частиц загрязнений на единичном коллекторе:

– при различных диаметрах единичного коллектора D , равных 250, 500, 750 и 1000 мкм; частицы загрязнений SiO₂ ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$); температура очищаемого масла $T = 293 \text{ К}$, скорость фильтрования $v_{\text{ф}} = 0,0013 \text{ м/с}$ (рис. 3);

– при различной температуре T , равной 293 ($\rho_{\text{ж}} = 900 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,836 \text{ Па}\cdot\text{с}$); 313 ($\rho_{\text{ж}} = 888 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,135 \text{ Па}\cdot\text{с}$); 333 ($\rho_{\text{ж}} = 875 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,046 \text{ Па}\cdot\text{с}$); 353 ($\rho_{\text{ж}} = 863 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,022 \text{ Па}\cdot\text{с}$) и 373 К ($\rho_{\text{ж}} = 850 \text{ кг/м}^3$, $\mu = 0,012 \text{ Па}\cdot\text{с}$); частицы загрязнений SiO₂ ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$); скорость фильтрования $v_{\text{ф}} = 0,0013 \text{ м/с}$; диаметр коллектора $D = 500 \text{ мкм}$ (рис. 4);

– при различных скоростях фильтрации $v_{\text{ф}}$, равных 0,0013; 0,004; 0,007 и 0,01 м/с; частицы загрязнений SiO₂ ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$); диаметр коллектора $D = 500 \text{ мкм}$; температура очищаемого масла $T = 293 \text{ К}$ (рис. 5);

– при фильтровании различных частиц загрязнений: асфальтены ($\rho_{\text{т}} = 1140 \text{ кг/м}^3$); сажа ($\rho_{\text{т}} = 2000 \text{ кг/м}^3$); SiO₂ ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$); железо ($\rho_{\text{т}} = 7870 \text{ кг/м}^3$); скорость фильтрования $v_{\text{ф}} = 0,0013 \text{ м/с}$; диаметр коллектора $D = 500 \text{ мкм}$; $T = 293 \text{ К}$ (рис. 6).

Пористые волоконные материалы

Предназначены для очистки жидкостей, газов от твердых частиц и жидких аэрозолей.



Основные технические данные

Тонкость очистки ППМ

- | | |
|----------------------------|--------------|
| - при фильтрации газов | 0,5...20 мкм |
| - при фильтрации жидкостей | 1...100 мкм |

Фильтры используются для очистки сжиженных и сжатых газов при их производстве и практическом использовании, отходящих газов в технологических циклах химического, биотехнологического, металлургического, цементного и др. производств, для очистки воды, горюче-смазочных материалов, пищевых продуктов (соки, пиво и др.), смол, основ для лаков, расплавов солей и полимеров.

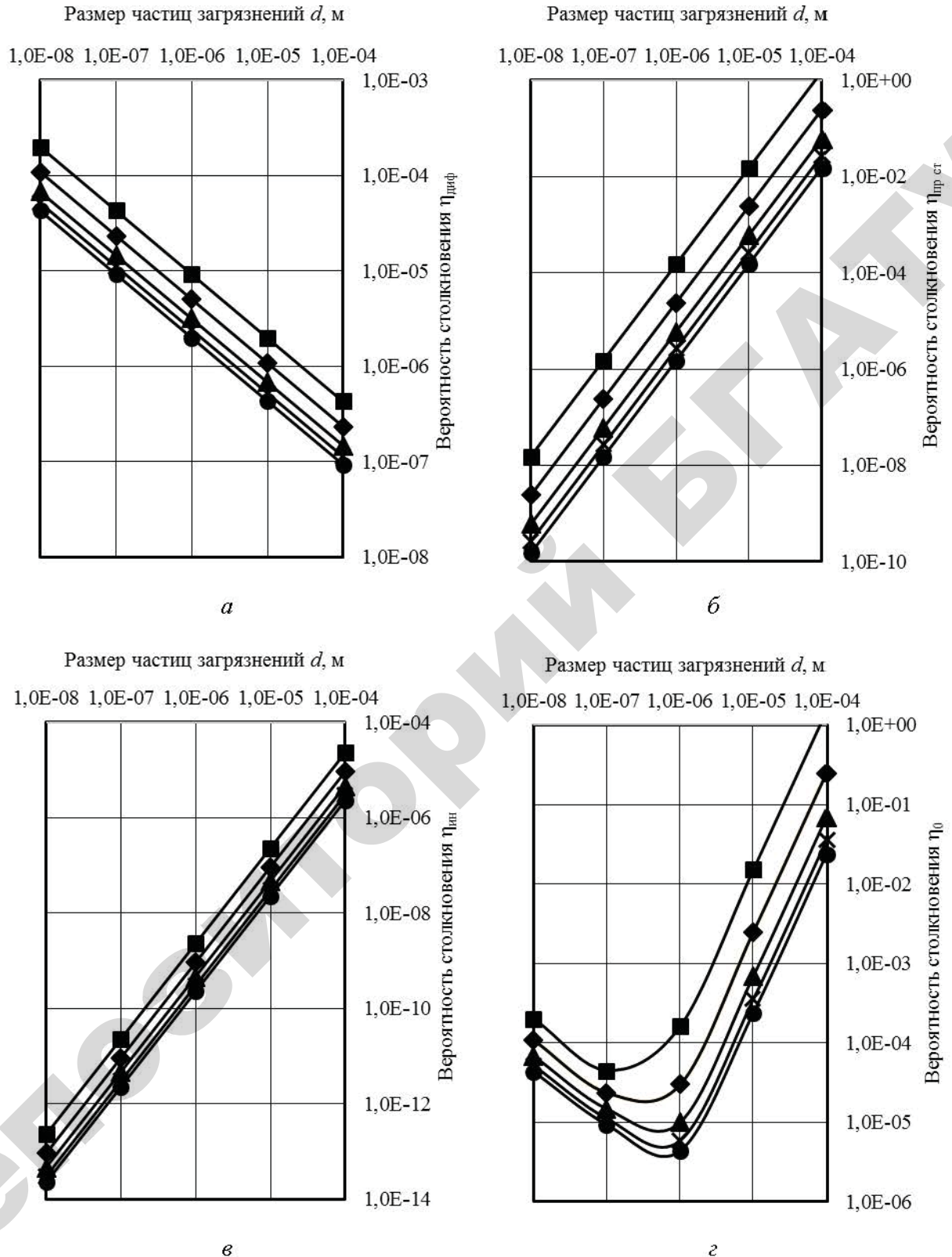


Рисунок 3. Зависимости вероятности столкновения η частиц загрязнений от их размера d в результате действия различных механизмов осаждения: а – диффузии $\eta_{\text{диф}}$; б – прямого столкновения $\eta_{\text{пр ст}}$; в – инерции $\eta_{\text{ин}}$; г – суммарное действие всех механизмов η_0 , при различных размерах коллектора D : ■ – 100; ♦ – 250; ▲ – 500; × – 750; ● – 1000 мкм

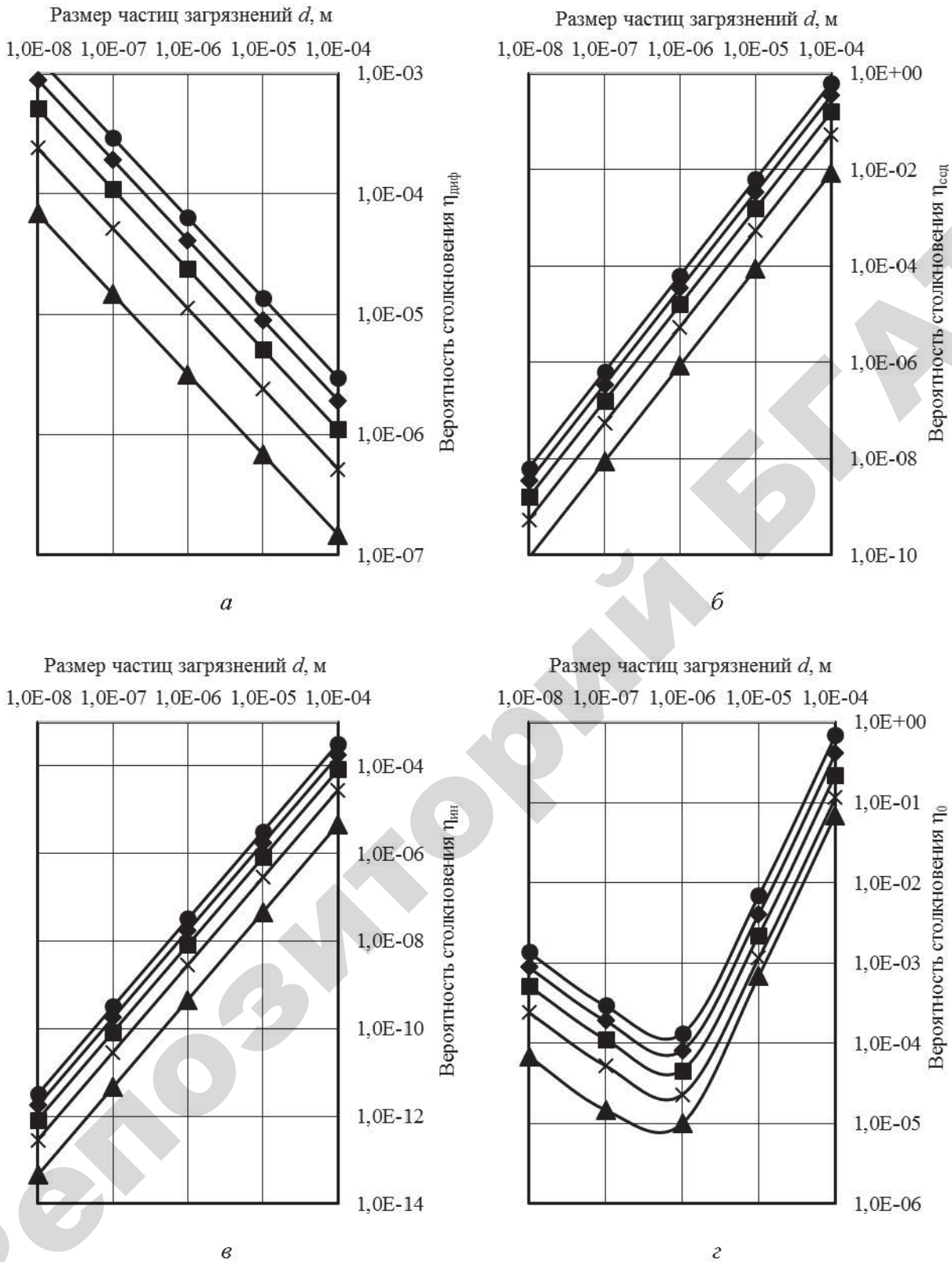


Рисунок 4. Зависимости вероятности столкновения η частиц загрязнений от их размера d в результате действия различных механизмов осаждения: а – диффузии $\eta_{\text{диф}}$; б – седиментации $\eta_{\text{сед}}$; в – инерции $\eta_{\text{ин}}$; г – суммарное действие всех механизмов η_0 , при различных температурах T : ▲ – 293; x – 313; ■ – 333; ◆ – 353; ● – 373 К

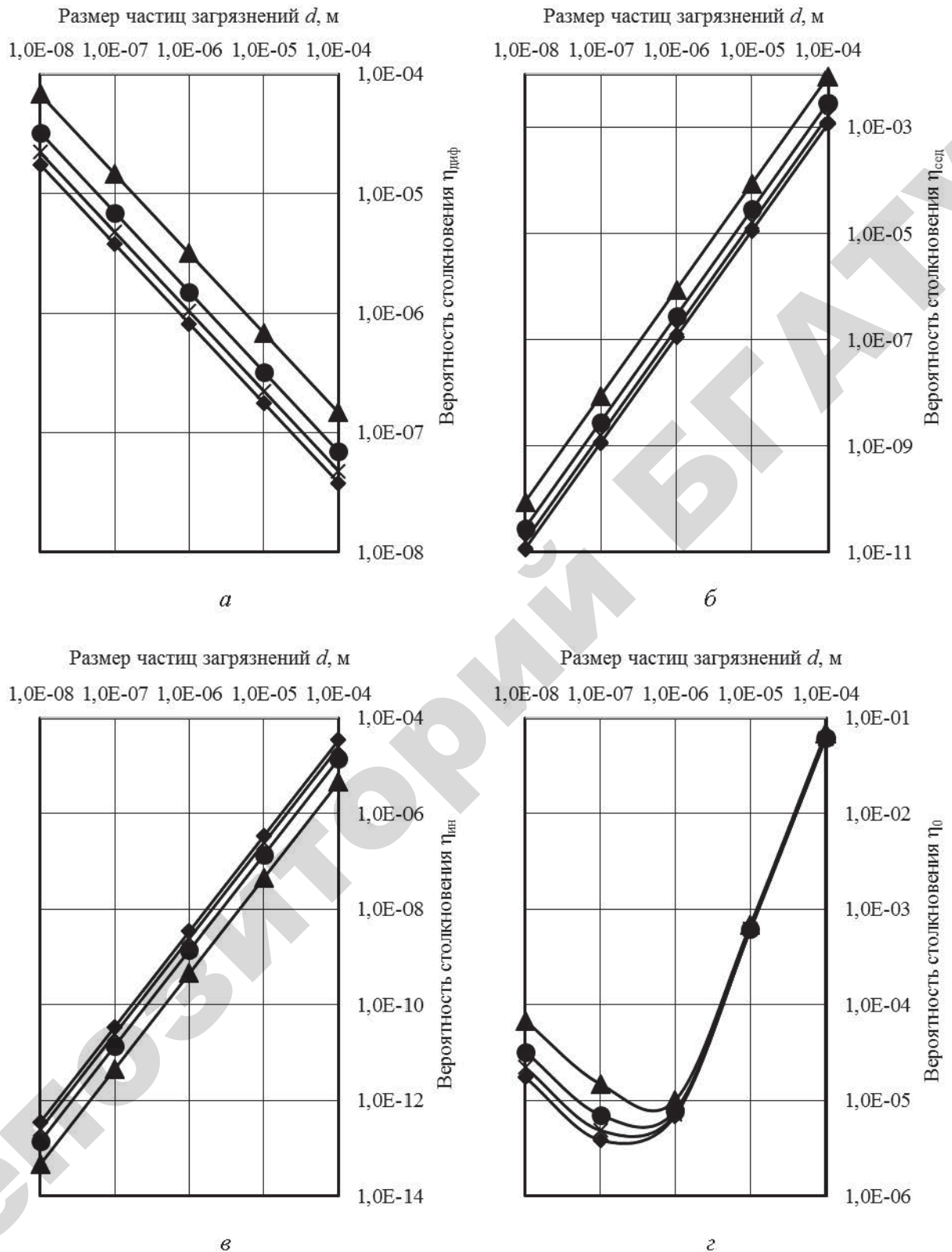


Рисунок 5. Зависимости вероятности столкновения η частиц загрязнений от их размера d в результате действия различных механизмов осаждения: а – диффузии $\eta_{диф}$; б – седиментации $\eta_{сед}$; в – инерции $\eta_{ин}$; г – суммарное действие всех механизмов η_0 , при различных скоростях фильтрации $v_{ф}$: \blacktriangle – 0,0013; \bullet – 0,004; \times – 0,007; \blacklozenge – 0,01 м/с

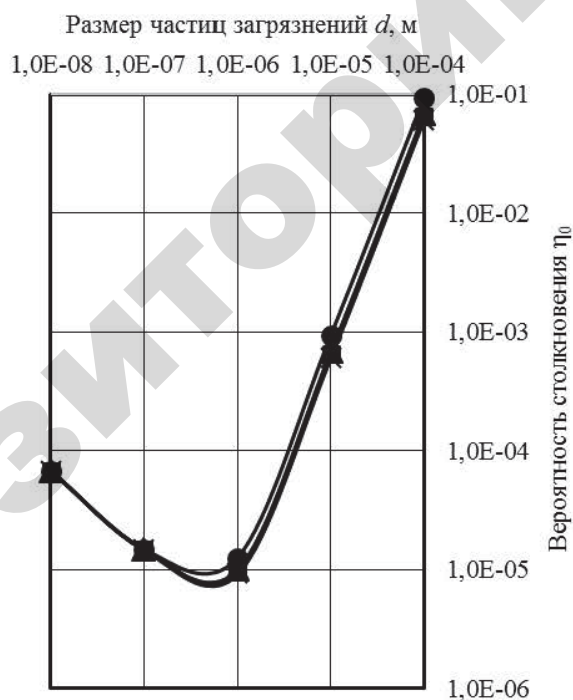
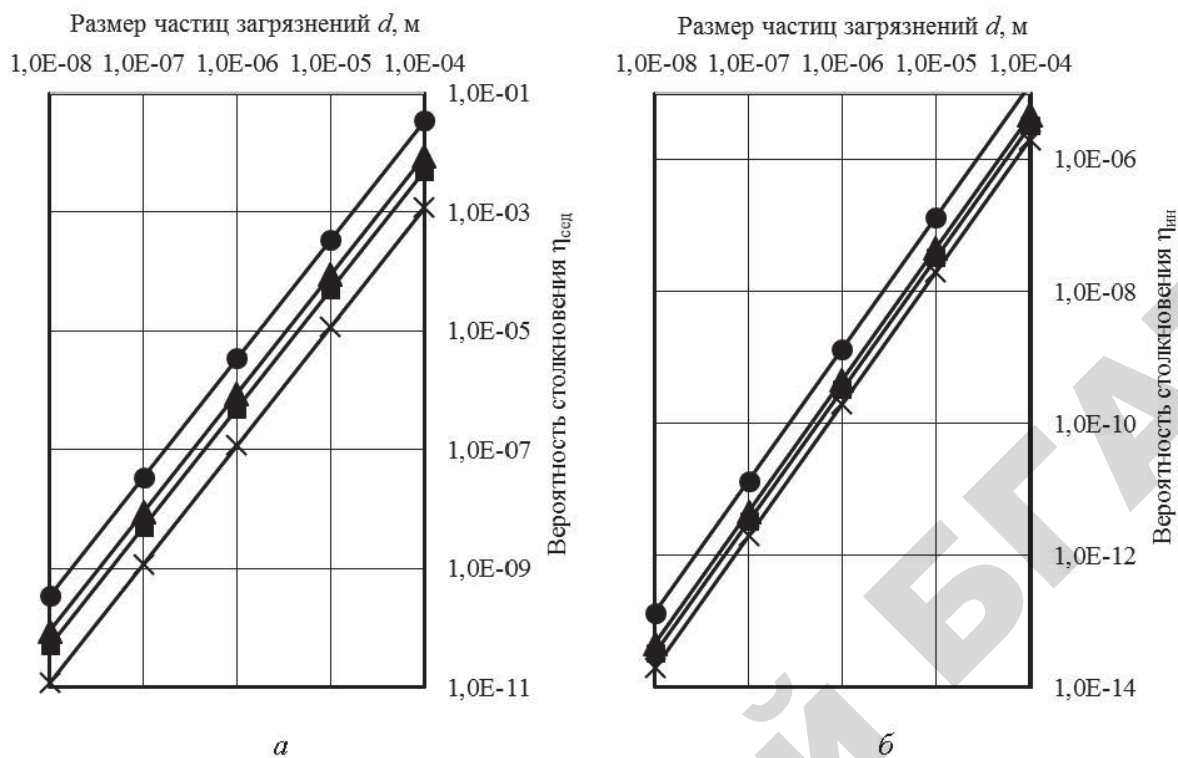


Рисунок 6. Зависимости вероятности столкновения η частиц загрязнений от их размера d в результате действия различных механизмов осаждения: а – седиментации $\eta_{сед}$; б – инерции $\eta_{ин}$; в – суммарное действие всех механизмов η_0 , при различных частицах загрязнений: х – асфальтены ($\rho_m = 1140 \text{ кг/м}^3$); ■ – сажа ($\rho_m = 2000 \text{ кг/м}^3$); ▲ – SiO_2 ($\rho_m = 2650 \text{ кг/м}^3$); ● – железо ($\rho_m = 7870 \text{ кг/м}^3$)

Заключение

Проведен анализ основных физических механизмов, приводящих к столкновению частиц загрязнений со стенками поровых каналов. Показано, что наиболее трудноудаляемыми частицами являются частицы загрязнений размером порядка 1 мкм. При таком размере частиц загрязнений суммарная вероятность столкновения в результате действия механизмов осаждения минимальна (рис. 3-6).

Наибольшая вероятность столкновения частиц загрязнений наблюдается на единичном коллекторе диаметром 100 мкм (рис. 3). При этом наибольшую вероятность столкновения для частиц размерами свыше 1 мкм обеспечивает механизм прямого столкновения, а для частиц меньших размеров – диффузия. Вероятность столкновения частиц загрязнений в результате механизма седиментации от размеров коллектора не зависит.

С ростом температуры суммарная вероятность столкновения частиц загрязнений с единичным коллектором возрастает на порядок для частиц с размером более 1 мкм, и на полтора порядка для частиц размером менее 1 мкм за счет существенного влияния диффузии (рис. 4).

С ростом скорости фильтрации возрастает вероятность столкновения частиц загрязнений с единичным коллектором за счет механизма инерции и уменьшается за счет механизмов диффузии и седиментации (рис. 5). Суммарное действие механизмов для частиц загрязнений размером более 1 мкм от скорости фильтрования не зависит.

Суммарное действие всех механизмов осаждения практически не зависит от вида частиц загрязнений (рис. 6).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутов, Н.П. Научные основы проектирования малоотходной технологии переработки и использования отработанных минеральных масел / Н.П. Бутов. – М.: ВНИПТИМЭСХ, 2000. – 410 с.
2. Бродский, Г.С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин / Г.С. Бродский // Горная промышленность: НПК «ГЕМОС Лтд.», 2003. – 360 с.
3. Коваленко, В.П. Очистка нефтепродуктов от загрязнений / В.П. Коваленко, В.Е. Турчанинов. – М.: Недра, 1990. – 160 с.
4. Удлер, Э.И. Повышение эффективности очистки нефтепродуктов в сельском хозяйстве средствами фильтрации / Э.И. Удлер. – Томск: Томский инженерно-строительный институт, 1988. – 124 с.
5. Капцевич, В.М. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства: монография / В.М. Капцевич [и др.].

– Минск: БГАТУ, 2007. – 232 с.

6. Ison, C.R. Removal mechanisms in bed filtration / C.R., Ison, K.J. Ives // Chem. Eng. Sei. – 1969. – V. 24. – P. 717-724.

7. Herzig, J.P. Flow of suspensions through porous media / J.P. Herzig, D.M. Leclerc, Le Goff P. // Application to deep filtration. – Ind. Eng. Chem. – 1970. – V. 62. – № 5. – P. 8-35.

8. Удов, В.Н. Очистка промышленных газов фильтрами / В.Н. Удов, Б.И. Мягков. – М.: Химия, 1970. – 320 с.

9. Le Goff, P. Etude sur modele du colmatage d'un milieu filtrant. Ecoulement d'une suspension de microspheres a travers un empilement de macrospheres / Le Goff P., Delachambre G. // Revue Francaise des Corps Gras. – 1965. – № 1. – P. 3-11.

10. Maroudas, A. Particle deposition in granular filter media / A. Maroudas // Pt. II. – Filtr. Separ. – 1965. – V. 2. – № 5 – P. 369-372.

11. Белов, С.В. Пористые металлы в машиностроении / С.В. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.

12. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: АН СССР, 1955. – 352 с.

13. Чен, Ч. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами / Ч. Чен // Успехи химии, 1956. – Т. 25. – № 3. – С. 368-392.

14. Stairmand C.J. Influence of Inertion on the process of Deposition In Granular media / C.J. Stairmand // Trans.Inst.Ch.Eng. – 1950. – V. 28. – P. 130.

15. Эйнштейн, А. Собрание научных трудов / А. Эйнштейн. – М.: Наука, 1966. – Т. 3. – 632 с.

16. Стечкина, И.Б. Исследование в области волокнистых аэрозольных фильтров. Расчет диффузионного осаждения аэрозолей в волокнистых фильтрах / И.Б. Стечкина, Н.А. Фукс // Коллоидный журнал, 1967. – Т.29. – № 2. – С. 260-263.

17. Кирш, А.А. Инерционное осаждение аэрозолей в модельных фильтрах при малых числах Рейнольдса / А.А. Кирш, И.Б. Стечкина // Коллоидный журн, 1977. – Т. 39. – № 1. – С. 36-43.

18. Iwasaki, T. Some notes on sand filtration / T. Iwasaki // Jour. AWWA. – 1937. – № 29. – P. 1591-1602.

19. Yao, K. Water and Waste Water Filtration: Concepts and Application / K. Yao [et al.]. // Environmental Science and Technology. – 1971. – Vol. 5. – № 12. – P. 1105-1112.

20. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Государственное издательство физико-химической литературы, 1959. – 700 с.

21. Bliss, T. Suspended Solids Washing Overview / T. Bliss, M. Ostoj-Starzewski. // IPST Technical Paper Series Number 679. – 1997. – 13 p.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 04.04.2017