

УДК:621.762.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ



М.В.Тумилович

Начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации БГУИР, доктор технических наук, доцент



Л.П.Пилиневич

Профессор кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, доктор технических наук, профессор, кавалер медали Франциска Скорины



А.Г.Кравцов

Заместитель академика-секретаря физико-технического отделения наук Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор

Белорусский Государственный университет информатики и радиоэлектроники, П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь, tumilovich@bsuir.by.

Отделение физико-технических наук Президиума Национальной академии наук Беларуси, пр. Независимости 66, Минск, 220012, Беларусь.

М. В. Тумилович

Начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации БГУИР, доктор технических наук, доцент.

Л. П. Пилиневич

Профессор кафедры инженерной психологии и эргономики БГУИР, доктор технических наук, профессор, кавалер медали Франциска Скорины.

А. Г. Кравцов

Заместитель академика-секретаря физико-технического отделения наук, Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор.

Аннотация. Проведено моделирование процесса тангенциальной фильтрации в пористых материалах. Установлены основные закономерности тангенциальной фильтрации жидкостей в пористых материалах, учитывающие, в отличие от существующих, распределение пор по размерам, скорость тангенциального потока, характеристики фильтруемой среды, полидисперсность частиц загрязнителя и перепад давления, позволившие смоделировать процессы тангенциальной фильтрации с учетом образования осадка и его смыва с поверхности фильтроэлементов.

Ключевые слова: Пористые материалы, тангенциальная фильтрация, фронтальная фильтрация, образование и смыв осадка, пористые структуры, фильтрующие элементы.

Фильтрация жидкостей через пористые материалы (ПМ), содержащей механические примеси, может осуществляться либо на поверхности (тангенциальная фильтрация), либо в глубине фильтрующего материала (объемная, фронтальная фильтрация).

Под тангенциальной фильтрацией понимают способ фильтрования, при котором осадок с поверхности фильтрующего элемента постоянно смывается либо собственно потоком суспензии вдоль этой поверхности либо воздействием при определенных условиях других факторов (например, центробежных сил) [1].

Принцип тангенциальной фильтрации отличается от других видов и типов фильтрации как направлением потока относительно фильтрующего элемента, так и его воздействием на частицы суспензии.

При тангенциальной фильтрации поток суспензии направлен параллельно поверхности фильтрующего элемента. Это вызывает действие на оседающие частицы сил сдвига и всплывания, которые предотвращают образование осадка. Фильтрат течет перпендикулярно направлению потока суспензии через образующийся относительно тонкий осадок и фильтрующий элемент (рисунок 1).

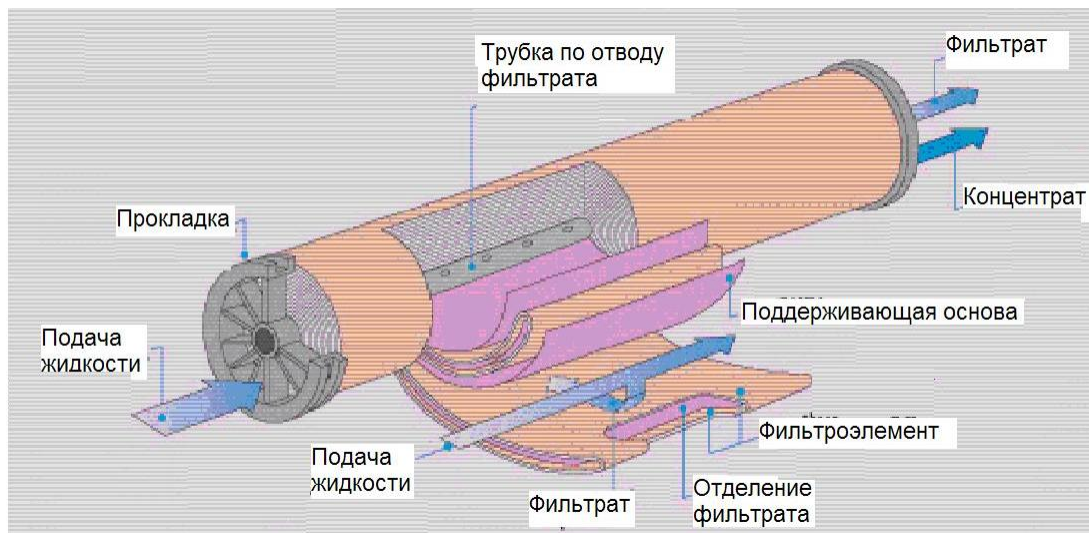


Рисунок 1. Элемент тангенциального фильтра

При тангенциальной фильтрации необходимо учитывать влияние не только таких традиционных для любого типа фильтрации величин, как давление, концентрация твердой и жидкой фазы, свойства фильтрующего элемента, но и специфические параметры, важнейшие среди которых – тангенциальная скорость потока и вызываемая им сила сдвига вблизи стенок канала.

При организации тангенциальной фильтрации в некоторых случаях не удается добиться стопроцентного задержания твердых частиц суспензии на фильтрующей поверхности и избежать их проникновения в поры. Фильтрация с закупоркой пор характерна для разделения суспензий, содержащих в небольшой концентрации относительно малые частицы, взвешенные в жидкости с высокой вязкостью, и наблюдается, например, при очистке сахарных сиропов, прядильных растворов и трансформаторных масел. Проникновение твердых частиц в поры ПМ нежелательно, т. к. это приводит к резкому увеличению его сопротивления, понизить которое последующей промывкой значительно труднее, чем при осаждении твердых частиц на поверхности. Поэтому для разработки методов предотвращения проникновения твердых частиц в поры фильтра целесообразно предварительно аналитически рассмотреть условия кольтматации пор в ПМ при тангенциальной фильтрации.

В литературе имеется исчерпывающее рассмотрение процесса кольтматации лишь для модельного пористого тела, представленного в виде набора на фильтрующей перегородке одинаковых цилиндрических пор одного диаметра [2, 33–7]. Однако реальные ПМ характеризуются более, или менее широким распределением пор по размерам, что является важным фактором, влияющим на характер процессов фильтрации и кольтматации пор ПМ. В связи с изложенным, в настоящем разделе рассмотрена задача теоретического описания процесса кольтматации пор разного размера при тангенциальной фильтрации в ПМ.

Для учета разброса пор по размерам, в ряде работ принимается, что распределение пор можно описать тем или иным аналитическим выражением, например, логарифмически нормальным законом, однако такие аналитические представления имеют ограниченную область применения, поскольку действительное распределение пор ПМ может значительно отличаться от принятого. В связи с этим в расчетах следует использовать данные о реальной структуре ПМ,

полученные экспериментально.

Для изучения продвижения частиц суспензии в поровом пространстве ППМ была использована статистическая модель пористого тела [8], которая предполагает, что пористое тело состоит из набора цилиндрических звеньев различного диаметра (рисунок 2).

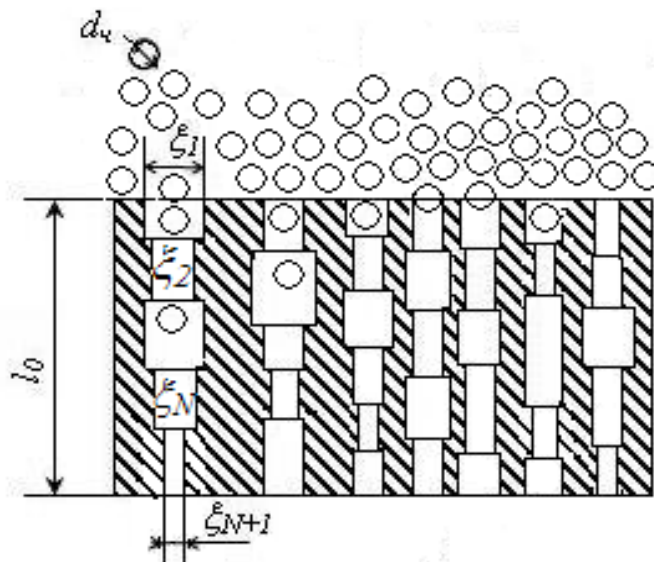


Рисунок 2. Статистическая модель пористого тела

При попадании в пористое тело, характеризующееся функцией распределения диаметра ξ цилиндрических звеньев $\Phi(\xi)$ общей длиной l_0 частица с диаметром d_p проникает в N по глубине звеньев, если $d_p < \xi_1 \dots \xi_N$, и осаждается в нем, когда $d_p > \xi_{N+1}$. Тогда для функции распределения глубины проникновения частицы $Q(\sigma)$ получим уравнение Вольтера второго рода.

$$Q(\sigma) = \int_0^{\sigma} \Phi_p(x) (1 - \mu_c + \mu_c Q(\sigma - x)) dx. \quad (1)$$

дающее решение, которое при $\sigma > 0$ может быть аппроксимировано функцией.

$$Q(\sigma) = 1 - \mu_c \frac{\sigma - 1}{2}, \quad (2)$$

где σ – глубина проникновения частицы;

$\mu_c = \mu(d_p)$ – относительное число звеньев, имеющих диаметр больше диаметра частиц d_p .

Дифференцируя последнее выражение по σ , получим выражение для концентрации задержанных частиц в зависимости от расстояния вглубь ППМ:

$$C(\sigma) = -n \frac{\ln \mu_c}{l_0} \mu_c^{\frac{\sigma - 1}{2}}, \quad (3)$$

где n – число вошедших через единицу площади ППМ частиц.

Соответствующие графические зависимости для различных d_p показаны на рисунке 3.

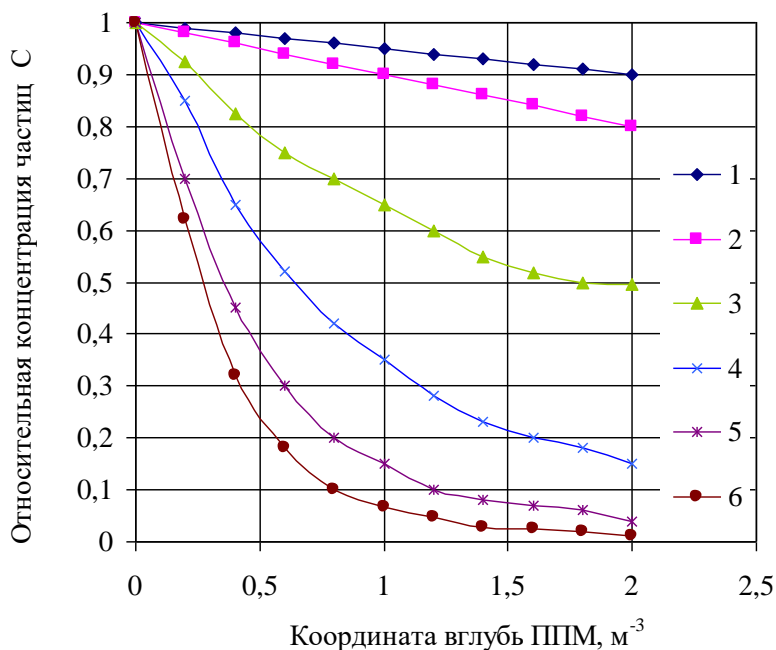


Рисунок 3. Зависимость концентрации задержанных частиц C разных диаметров от координаты вглубь ППМ : 1 – $d_{ч}= 40$ мкм; 2 – $d_{ч}=50$ мкм; 3 – $d_{ч}= 60$ мкм; 4 – $d_{ч}=70$ мкм; 5 – $d_{ч}=80$ мкм; 6 – $d_{ч}= 100$ мкм

В связи с отмеченным выше наличием различных типов фильтрации, связь между количеством задержанных частиц и проницаемостью ПМ должна в каждом случае выводиться на основе эксперимента. Рассмотрим для примера случай с закупориванием поры одной частицей.

В рамках принятой модели пористого тела для расчета проницаемости ПМ воспользуемся законом Пуазейля, согласно которому проницаемость цилиндрического канала пропорциональна четвертой степени его диаметра. Для коэффициента проницаемости ПМ можно записать выражение:

$$k_0 = b \int_0^{\infty} \xi^4 \frac{d\mu}{d\xi} d\xi, \quad (4)$$

где b – численный коэффициент.

Учитывая разветвленность порового пространства ПМ, сделаем предположение, что блокировка задержанной частицей отдельного звена не сказывается на течении суспензии в остальной части канала, т. е. что в свободную часть канала за заблокированным звеном суспензия некоторым образом без сопротивления попадает из других каналов. Поскольку одна частица блокирует отдельное звено l_0 , то в любом перпендикулярном потоке единичном по площади сечения ПМ на глубине σ заблокировано $C(\sigma)N_0$ звеньев, имеющих диаметр от 0 до $d_{ч}$, где N_0 – общее число каналов на единицу площади.

Поскольку задержание частицы в звеньях разного диаметра в интервале от 0 до $d_{ч}$ равновероятно, а общее число звеньев в этом интервале равно $N_0(1-\mu_{ч})$, то относительное число заблокированных звеньев с диаметром в любом интервале $\xi, \dots, \xi+d\xi$ равно:

$$\frac{C(\sigma)}{(1-\mu_{ч})}. \quad (5)$$

Умножая эту величину на число звеньев с диаметром в интервале $\xi, \dots, \xi+d\xi$, равное $N_0 \frac{d\mu}{d\xi} d\xi$, получим число заблокированных на глубине σ звеньев с диаметром в интервале $\xi, \dots, \xi+d\xi$:

$$dN_{\sigma, \xi} = \frac{C(\sigma)N_0}{1 - \mu_c} \frac{d\mu}{d\xi} d\xi. \quad (6)$$

Величина уменьшения коэффициента проницаемости на глубине σ составит:

$$\Delta k = \frac{bC(\sigma)}{1 - \mu_c} \int_0^{d_c} \xi^4 \frac{d\mu}{d\xi} d\xi. \quad (7)$$

Из уравнений (3), (4) и (7) получаем выражение для зависимости коэффициента проницаемости от глубины проникновения σ :

$$\frac{k(\sigma)}{k_0} = 1 + \frac{n\mu_c^{\frac{\sigma-1}{2}} \ln \mu_c}{(1 - \mu_c)} \cdot \frac{\int_0^{d_c} \xi^4 \frac{d\mu}{d\xi} d\xi}{\int_0^{\infty} \xi^4 \frac{d\mu}{d\xi} d\xi}. \quad (8)$$

Таким образом, на основе модельных представлений пористого тела проведены теоретические исследования процесса кольтматации пор разного размера при фильтрации суспензий с частицами одного размера. Разработанная теория пригодна для описания процесса на начальном этапе, когда порораспределение материала и проницаемость можно считать неизменными. С течением процесса фильтрации и увеличением числа задержанных частиц происходит постепенное изменение порораспределения, причем последнее становится неоднородным вдоль потока суспензии, уменьшается коэффициент проницаемости, что, в свою очередь, влияет на изменение концентрации частиц.

Заключение. На основе статистической модели пористого тела разработан метод расчета концентрации задержанных частиц загрязнителя в зависимости от глубины их проникновения, позволяющий оценить уменьшение коэффициента проницаемости вследствие блокировки отдельных пор. Показано, что с ростом тангенциальной скорости потока распределение частиц в фильтрате смещается в сторону меньших размеров, что ведет к повышению тонкости фильтрации в 1,4 – 2,2 раза по сравнению с фронтальной фильтрацией, при этом уменьшается и суммарная концентрация загрязнений в фильтрате.

Список литературы

- [1] Ерошенко, В.М. Гидродинамика и тепло-массообмен на проницаемых поверхностях/ В.М. Ерошенко, Л.И. Зайчик. – Москва: Наука, 1984. – 274 с.
- [2] Жужиков, В.А. Фильтрование/ В.А. Жужиков. – Москва: Химия, 1980. – 400 с.
- [3] Жевноватый, А.Ю. Основы фильтрации суспензий с образованием осадка// Журнал прикладной химии. –1973. –N 48. – С.334-338.
- [4] Henry, J.D. Cross Flow Filtration// Recent Developments in Separation Science. J.D/. Henry. – New-York: CRC Press, 1980. – 312 p.
- [5] Rushton, A. Shear Effects in Cake Formation Mechanisms/ A. Rushton M. Hosseini// Filtration & Separation 16. –1979. – N5. – P.458459.

[6] Bagdasarian, A. High-Pressure, Thin-Cake. Stage of Filtration/ A. Bagdasarian, F.M. Tiller, J. Donovan// Filtration & Separation 14. –1977. – N5. –P.455-460.

[7] Feet–Fluessig–Trennung/ hrsg. W.Stahl, 10 Auflage: TU Karlsruhe, 1989. – 849 S.

[8] Маркин, В. С. О свойствах межфазной границы в одной модели пористого тела/ В. С. Маркин// Известия АН СССР. ОХН. – 1963. – N 9. –С.1690-1692.

MODELING THE PROCESS OF TANGENTIAL FILTRATION IN POROUS MATERIALS

M.V. TUMILOVICH

*Head of the Department for the
Training of Scientific Personnel of
Higher Qualification of BSUIR,
Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor.*

L.P. PILINEVICH

*Professor of Engineering
Psychology and Ergonomics
BSUIR, Doctor of Technical
Sciences, Professor, holder of the
Francis Skaryna Medal.*

A.G. KRAVTSOV

*Deputy Academician-Secretary of
the Physical and Technical
Department of Sciences of the
Presidium of the National
Academy of Sciences of Belarus,
Doctor of Technical Sciences,
Professor*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovka, 6, Minsk, 220013, Belarus,
tumilovich@bsuir.by*

Abstract. The modeling of the process of tangential filtration in porous materials has been carried out. The main regularities of tangential filtration of liquids in porous materials have been established, taking into account, in contrast to the existing ones, the pore size distribution, the tangential flow velocity, the characteristics of the filtered medium, the polydispersity of the pollutant particles and the pressure drop, which made it possible to simulate the tangential filtration processes taking into account the formation of sediment and its washout filter element surfaces.

Keywords. Porous materials, tangential filtration, frontal filtration, sediment formation and washout, porous structures, filter elements