

УДК:621.762.2

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ И СМЫВА ОСАДКА ПРИ 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

<sup>1</sup> Белорусский Государственный университет информатики и радиоэлектроники, П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь, tumilovich@bsuir.by

<sup>2</sup> 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 образования и смыва осадка при тангенциальной фильтрации в пористых материалах. Показано, что свойствами образующегося осадка (толщиной, гранулометрическим составом и гидравлическим сопротивлением) можно управлять посредством изменения параметров фильтрации (скорость суспензии, скорость фильтрата, перепад давления) и конструктивных параметров фильтроэлементов.

**Ключевые слова.** Пористые материалы, тангенциальная фильтрация, фронтальная фильтрация, образование и смыв осадка, параметры фильтрации, 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). При тангенциальной фильтрации образующийся 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].

При фильтрации с образованием и смывом осадка направление потока суспензии перпендикулярно к направлению потока фильтрата и тем самым параллельно фильтрующей поверхности. В связи с этим процесс сепарации частиц здесь имеет совершенно другую природу, чем при фронтальной фильтрации. Действие увлекающей силы со стороны потока на частицы,

оседающие на фильтрующей поверхности, приводит к предотвращению образования осадка или, по меньшей мере, ограничению скорости его роста. Фильтрат течет в этом случае через образовавшийся тонкий слой осадка и фильтрующую перегородку. При этом можно ожидать более высокой производительности по фильтрату, т.к. преодолевается гидравлическое сопротивление только фильтрующего и тонкого слоя осадка частиц твердой фазы. Если же удастся толщину слоя последнего по истечении некоторого промежутка времени обеспечить постоянной либо предотвратить образование осадка вообще, то тогда процесс фильтрации становится непрерывным. Таким образом, определение режимов образования и смыва осадка на фильтрующей поверхности является важной практической задачей.

Для теоретического рассмотрения указанной задачи воспользуемся модельными представлениями, исходящими из учета действия на отдельную твердую частицу сил со стороны потока. Рассмотрим твердую частицу диаметром  $d$ , расположенную на фильтрующей поверхности или поверхности уже образовавшегося слоя осадка (рисунок 1).

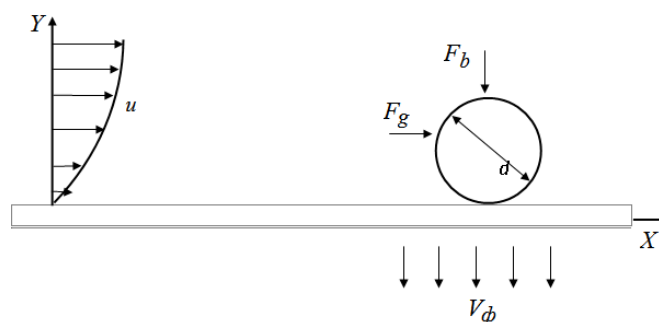


Рисунок 1 – Силы, действующие на отдельную частицу со стороны потока

При скорости фильтрата  $V_\phi$  на эту частицу диаметром  $d$  со стороны потока суспензии параллельно поверхности действует сила тяжести  $F_b$ , увлекающая сила  $F_q$ , пропорциональная площади частицы и квадрату скорости  $u$ :

$$F_q = \frac{C_w \rho}{2} u^2 \frac{\pi d^2}{4}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $u$  – скорость потока;  $C_w$  – коэффициент сопротивления, который зависит от числа Рейнольдса следующим образом [2]:

$$C_w = \frac{55,2}{Re}, \quad (2)$$

где число Рейнольдса  $Re_w$  вычисляется как

$$Re_w = \frac{u_w d}{\nu}, \quad (3)$$

где  $u_w$  – скорость натекания в ламинарном слое в центре изображенной на рис. 1 частицы,

$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости.

Скорость натекания вблизи поверхности пропорциональна градиенту скорости, поэтому можно записать:

$$u_w = \frac{d\tau_w}{2\eta}, \quad (4)$$

где  $\tau_w$  – касательное напряжение,  $\eta$  – динамическая вязкость.

С учетом (1) – (4) получаем:

$$F_q = 3,45 \cdot \pi d^2 \tau_w \quad (5)$$

Сила, действующая со стороны потока фильтрата, перпендикулярного потоку суспензии, на частицу в вертикальном направлении при небольшой скорости фильтрата  $V_\phi$  пропорциональна последней и может быть вычислена по формуле Стокса:

$$F_b = 3\pi\eta d V_\phi \quad (6)$$

Другие силы, например сила упругости, моменты, возникающие из-за несимметричного обтекания, в этой простой модели не рассматриваются. Предположим, что частица расположена на абсолютно плоской поверхности так, что можно рассматривать равновесие между увлекающей силой  $F_q$  и силой трения  $\zeta F_b$  как граничное условие удержания частицы:

$$F_q = \zeta \cdot F_b, \quad (7)$$

где  $\zeta$  – коэффициент трения между частицей и поверхностью ППМ.

Из (1) – (7) можно получить выражения для граничного размера частицы  $d_o$ , которая еще будет удерживаться на фильтрующей поверхности при заданных режимах фильтрации:

$$d_o = \frac{\zeta \eta V_\phi}{1,15 \tau_w}. \quad (8)$$

Частицы с диаметром  $d > d_o$  транспортируются потоком суспензии дальше вдоль фильтрующей поверхности, а частицы с диаметром  $d < d_o$  задерживаются на ней или на поверхности слоя осадка.

Из (7) видно, что важное влияние на течение процесса тангенциальной фильтрации оказывает касательное напряжение в непосредственной близости от фильтрующей поверхности. Если бы скорость фильтрата была равна нулю, то для касательного напряжения можно было бы записать известное соотношение [3]:

$$\tau_o = 0,343 \sqrt{\frac{\eta \rho V^3}{x}}, \quad (9)$$

где  $x$  – координата вдоль направления потока суспензии;  $V$  – средняя по сечению канала скорость течения суспензии.

Интегрируя (9) от 0 до  $l$ , найдем среднее по длине значение касательного напряжения ( $l$  – длина ФЭ):

$$\tau_0 = \frac{1}{l} \int_0^l \tau_0(x) dx = 0,646 \sqrt{\frac{\eta \rho V^3}{l}}. \quad (10)$$

Из-за влияния потока фильтрата на фильтрующей поверхности действует также дополнительное касательное напряжение, выражение для которого можно получить из баланса импульса для элементарного объема:

$$\tau_x = \rho V_\phi V \quad (11)$$

При упрощающем предположении, что напряжение трения  $\tau_r$  не изменяется из-за влияния потока фильтрата, что справедливо при существенно меньшей скорости фильтрата по сравнению с тангенциальной скоростью потока суспензии, можно записать для результирующего напряжения с учетом выражений (10) – (11):

$$\tau_w = \rho V_\phi V + 0,646 \sqrt{\frac{\eta \rho V^3}{l}}. \quad (12)$$

Таким образом, выражение для граничного диаметра частиц имеет вид:

$$d_0 = \frac{\zeta \eta V_\phi}{1,15 \rho V_\phi V + 0,737 \sqrt{\frac{\eta \rho V^3}{l}}}. \quad (13)$$

На рис. 2 изображены зависимости расчетного граничного диаметра частиц  $d_0$  от скорости отвода фильтрата при различных скоростях тангенциального потока.

Так как величина  $\zeta$ , обозначенная коэффициентом трения, точно не определена, зависимость на рисунке 2 носит качественный характер. С ростом скорости потока граничный диаметр  $d_0$  сдвигается в сторону меньших значений. При малых скоростях потока диаметр  $d_0$  пропорционален скорости фильтрата  $V_\phi$ , а при высоких – практически не зависит от нее. Ввиду роста гидравлического сопротивления ППМ из-за увеличения слоя осадка с течением времени скорость отвода фильтрата постепенно уменьшается. Поэтому граничный размер частиц, удерживаемых на фильтрующей поверхности, также зависит от времени, а именно смещается в область меньших значений.

1 –  $V=10$  см/с; 2 –  $V=20$  см/с; 3 –  $V=30$  см/с; 4 –  $V=40$  см/с; 5 –  $V=50$  см/с

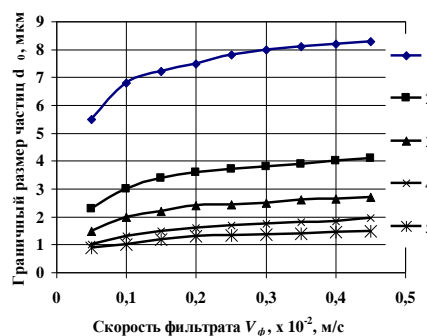


Рисунок 2 – Зависимость расчетного граничного размера частиц осадка  $d_0$  от скорости отвода фильтрата  $V_\phi$  при различных скоростях потока суспензии ( $\eta=10^{-3}$  Па·с,  $\rho=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $l=0,5$  м)

Анализ приведенных на рисунке 2 результатов позволяет сделать вывод, что влияние режимов течения суспензии на сопротивление слоя осадка проявляется двояко: во-первых, скорость роста слоя осадка с ростом скорости тангенциального потока уменьшается; во-вторых, распределение осевших частиц по размерам из-за влияния течения потока суспензии смещается в сторону меньших диаметров. Это обусловлено повышением тонкости очистки в 1,4 – 2,2 раза по сравнению с фронтальной фильтрацией и уменьшением суммарной концентрации загрязнений в фильтрате. Так как обе величины – толщина и гранулометрический состав осадка, определяют гидравлическое сопротивление последнего, результирующий поток фильтрата зависит от того, какой из этих двух факторов преобладает. При неблагоприятных условиях (широкий гранулометрический состав частиц суспензии, шероховатая структура поверхности) доминирует влияние второго фактора. При фильтрации тонкодисперсных суспензий с узким распределением размеров частиц поток фильтрата зависит только от изменения толщины слоя осадка.

Таким образом, проведенное теоретическое исследование показывает, что свойствами образующегося осадка (толщиной, гранулометрическим составом и гидравлическим сопротивлением) можно управлять посредством изменения параметров фильтрации (скорость суспензии, скорость фильтрата, перепад давления) и конструктивных параметров.

*Заключение.* С помощью методов математического моделирования из условия баланса сил на отдельной частице суспензии в тангенциальном потоке получено приближенное выражение для расчета граничного диаметра частицы, удерживаемой на фильтрующей поверхности, в зависимости от скорости потока суспензии и скорости отвода фильтрата. Показано, что с ростом тангенциальной скорости потока распределение частиц в фильтрате смещается в сторону меньших размеров, что обусловлено повышением тонкости очистки в 1,4 – 2,2 раза по сравнению с фронтальной фильтрацией и уменьшением суммарной концентрации 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] Rubin, G. Widerstands- und Auftriebsbeiwerte von ruhenden, kugelfoermigen Partikeln in stromungsnahe wandnahen laminaren Grenzschichten/ G. Rubin// Dissertstion Universitaet Karlsruhe. – TH. – 1977. – S.136–143.
- [3] Тепло-, и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник/ Е.В. Аметактов [др.]. – Москва: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

### **MODELING OF SEDIMENT FORMATION AND FLUSHING DURING 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.** Modeling of the process of sediment formation and flushing during tangential filtration in porous materials is carried out. It is shown that the properties of the resulting sediment (thickness, granulometric composition and hydraulic resistance) can be controlled by changing the filtration parameters (suspension velocity, filtrate velocity, pressure drop) and the design parameters of filter elements.

**Keywords.** Porous materials, tangential filtration, frontal filtration, sediment formation and flushing, filtration parameters, filter elements.