

УДК:621.762.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРУЕМОЙ СРЕДЫ НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ПОРИСТЫХ ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛАХ



М.В.Тумилович

Начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации БГУИР, доктор технических наук, доцент
tumilovich@bsuir.by



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

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 влияния характеристик фильтруемой среды на процессы образования и смыва осадка при тангенциальной фильтрации в пористых градиентных материалах. Показано, что существует принципиальная возможность предотвратить процесс забивки (кольматации) пор фильтроэлементов частицами загрязнителя путем соответствующего выбора скорости тангенциального потока и давления фильтрации. При этом следует соблюдать главное требование к структуре фильтроэлементов – она должна обеспечивать режим поверхностной фильтрации.

Ключевые слова: пористые градиентные материалы, тангенциальная фильтрация, поверхностная фильтрация, образование и смыв осадка, кольматация, фильтрующие элементы.

Введение.

В работах [1] и [2] проведено моделирование процессов тангенциальной фильтрации, при которой образующийся осадок постоянно смывается с поверхности фильтрующего элемента (ФЭ) либо собственно потоком суспензии вдоль этой поверхности, либо под воздействием при определенных условиях других факторов (например, центробежных сил). 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 ФЭ.

При моделировании процесса тангенциальной фильтрации определяющее влияние имеют два фактора: сдвиговые напряжения вдоль поверхности ФЭ t_w и падение (перепад) давления на этом элементе P . Соотношение этих величин используется в качестве критерия блокировки или кольматации пор и названо характеристическим числом Q_0 [3].

$$Q_0 = \frac{P}{t_w} = f \frac{d_c}{\xi_n}, \quad (1)$$

где: d_c – размер частиц;
 ξ_n – размер пор ФЭ.

Число Q_0 и входящие в него величины P и t_w , однозначно определяют некоторый критический размер частицы d' , находящейся в стабильном пристеночном положении: частицы размером больше d' не проникают в ФЭ и уносятся тангенциальным потоком. Путем несложных преобразований можно получить модифицированную формулу для расчета Q_0 по значению перепада давления на ФЭ и скорости тангенциального потока. Кроме того, в формулу входят величины плотности жидкости и коэффициента трения [3].

Для оценки влияния тангенциального потока на сопротивление ФЭ были изготовлены образцы ФЭ из градиентного композиционного пористого материала со слоистой структурой: селективный слой выполнен из порошка меди марки ПМС-Н с размером частиц 0,063–0,1 мм, основа – из волокна меди диаметром 50 мкм. Данные фильтроэлементы имели средний размер пор селективного слоя 28–35 мкм. В дальнейшем они обозначены, как ФЭ–1. Данные ФЭ получали методами порошковой металлургии путем послойного формования, прессования и спекания в защитной атмосфере. Фотография поперечного сечения такого градиентного композиционного пористого материала приведена на рисунке 1.

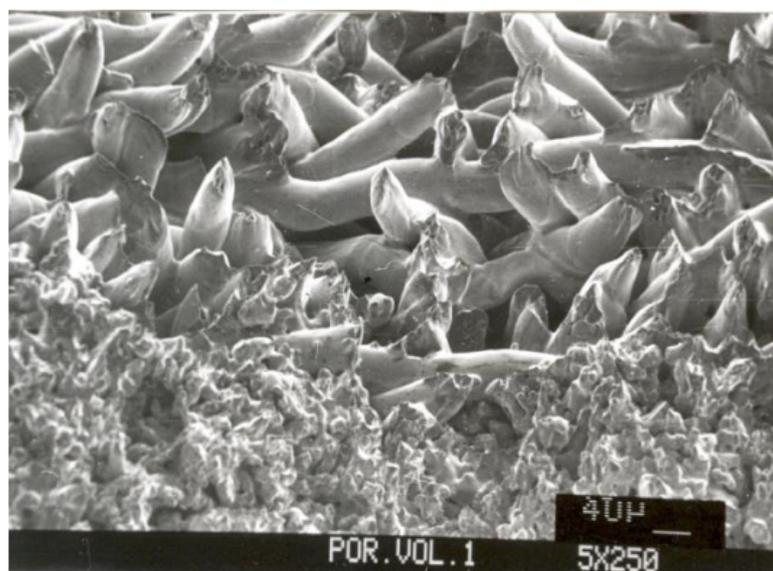
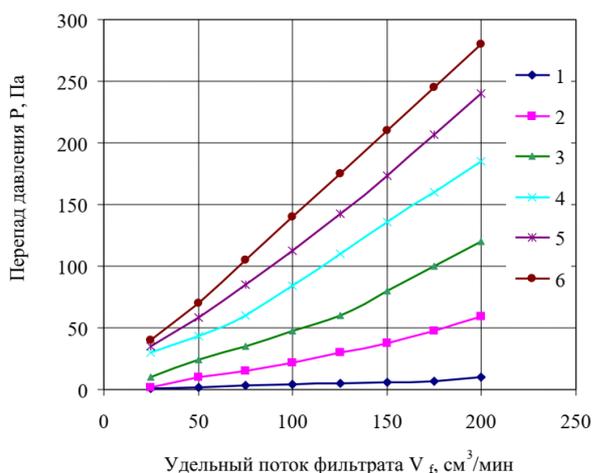


Рисунок 1. Фрактограмма градиентного композиционного пористого материала, полученного из медного порошка и волокна, увеличение $\times 250$

Экспериментальные исследования проводились на дистиллированной воде в диапазоне скоростей тангенциального потока $V=0,5–10,5$ м/с на установке, описанной в [4]. Результаты исследований представлены на рисунке 1 в виде зависимости перепада давления в центре ФЭ–1 (на расстоянии 150 мм от входа) от удельного потока фильтрата, который искусственно дросселировался при постоянном давлении 400 Па.



1 – $V=0,5$ м/с; 2 – $V=1,39$ м/с;
 3 – $V=3,78$ м/с; 4 – $V=6,03$ м/с; 5 – $V=8,33$ м/с; 6 – $V=10,5$ м/с

Рисунок 2. Зависимость перепада давления на ФЭ – 1 от удельного потока фильтрата V_f при различных скоростях тангенциального потока V

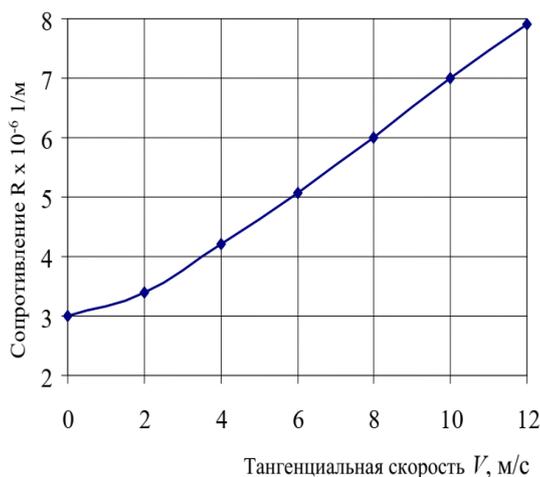


Рисунок 3. Зависимость сопротивления ФЭ – 1 от скорости тангенциального потока

Из зависимостей, приведенных на рисунке 2 видно, что при постоянных скоростях тангенциального потока перепад давления на ФЭ – 1 прямо пропорционален потоку фильтрата. Это, в свою очередь, позволило рассчитать сопротивление потоку R по формуле:

$$R = \frac{P}{V_f} \cdot \eta \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость жидкости.

Зависимость сопротивления ФЭ – 1 от тангенциальной скорости потока дистиллированной воды представлена на рисунке 3. Данная зависимость имеет принципиально важное значение. Физический смысл зависимости сопротивления ФЭ от скорости

тангенциального потока пока ясен не до конца. Можно предположить, что причины данного феномена следует изучать в точном рассмотрении соотношения давлений в приближении к поверхности ФЭ.

В работе [3] получена зависимость безразмерной скорости $V^*=V/V_1$ от безразмерной координаты $G=x/L_f$ для модели канала тангенциального фильтра, изображенной на рисунке 4, дающая представление о характере изменения скорости потока по длине канала, часть стенки которого выполнена проницаемой с длиной L_f .

По аналогии с вышеуказанной зависимостью проведено моделирование изменения скорости потока по длине канала для граничных условий ячейки модуля тангенциального фильтра, описанного в работе [4]. Результаты расчетов представлены на рисунках 5 и 6.

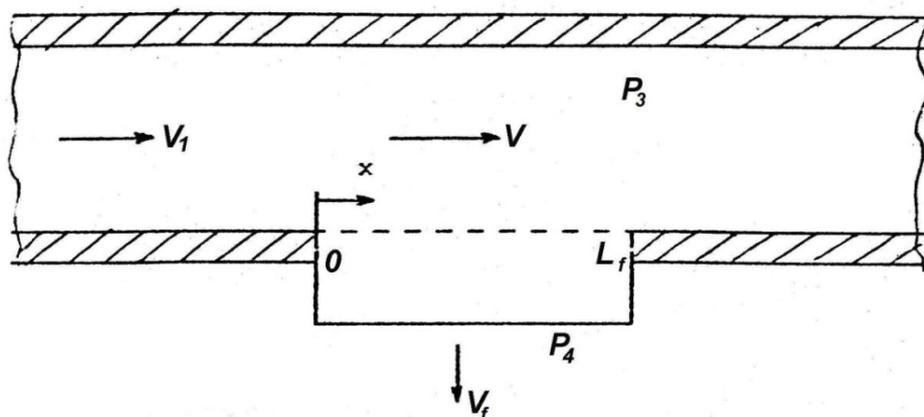
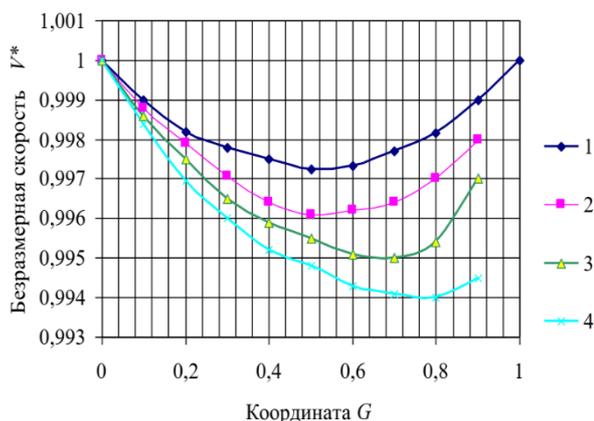


Рисунок 4. Схема модели канала тангенциального фильтра

На рисунке 5 показана зависимость $V^*=f(G)$ при разных скоростях тангенциального потока и нулевой скорости отвода фильтрата V_f (при закрытом вентиле), а на рисунке 6 – при фиксированной тангенциальной скорости 8,33 м/с и различных скоростях отвода фильтрата.

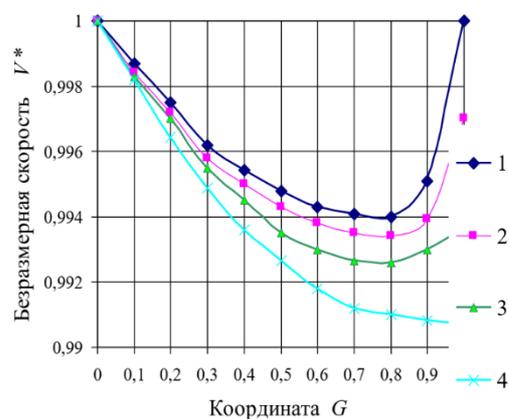
Как видно из рисунка 5, в начале ФЭ безразмерная скорость V^* уменьшается, а затем вновь возрастает до начального значения к концу ФЭ. Хотя это изменение скорости не превышает 1 %, оно увеличивается с ростом скорости тангенциального потока и ростом скорости отвода фильтрата (рисунок 6).

На рисунках 7 и 8 показано изменение перепада давления P_3-P_4 по длине фильтроэлемента ФЭ–1 от безразмерной координаты при нулевой скорости отвода фильтрата V_f (при закрытом вентиле) и при фиксированной тангенциальной скорости $V_1=6,03$ м/с и различных скоростях отвода фильтрата. При этом на рисунке 7 показано изменение перепада давления по длине фильтроэлемента тогда, когда фильтрат течет через фильтроэлемент назад в канал фильтра. Анализ характера изменения зависимостей, приведенных на рисунках 7 и 8, показывает, что в первой рабочей части ФЭ жидкость проникает через пористый материал в пространство для фильтрата, а во второй периферийной части вытекает назад в канал. Соответственно этому перепад давления P_3-P_4 в этой области становится отрицательным или положительным (рисунок 7).



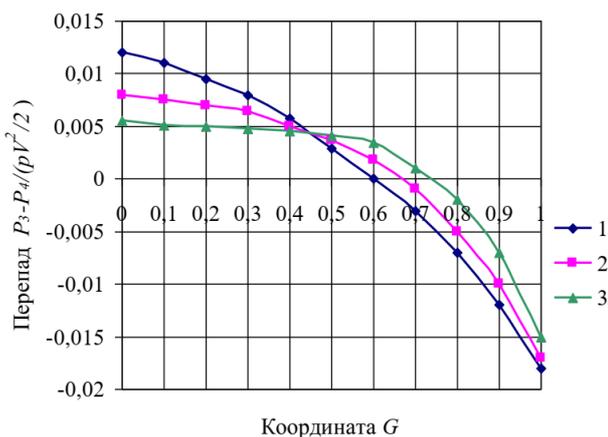
1 – $V_t = 1,39$ м/с; 2 – $V_t = 3,78$ м/с;
3 – $V_t = 6,03$ м/с; 4 – $V_t = 10,5$ м/с

Рисунок 5. Зависимость безразмерной скорости потока V^* от безразмерной координаты G



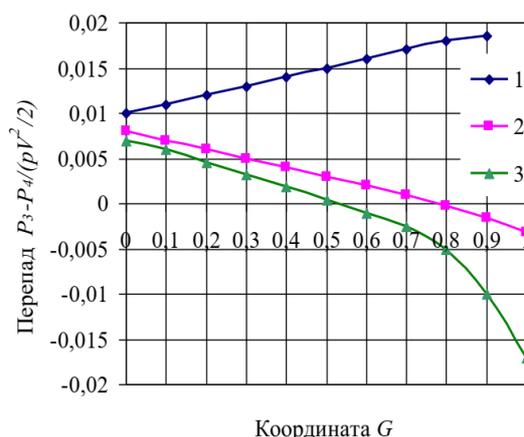
1 – $V_f = 0,008$ м/с; 2 – $V_f = 0,04$ м/с;
3 – $V_f = 0,08$ м/с; 4 – $V_f = 0,12$ м/с

Рисунок 6. Зависимость безразмерной скорости потока V^* от безразмерной координаты G при фиксированной тангенциальной скорости $V_t = 8,33$ м/с



1 – $V_t = 1,39$ м/с; 2 – $V_t = 6,03$ м/с;
3 – $V_t = 10,5$ м/с

Рисунок 7. Изменение перепада давления по длине фильтроэлемента ФЭ – 1 при $V_f = 0$



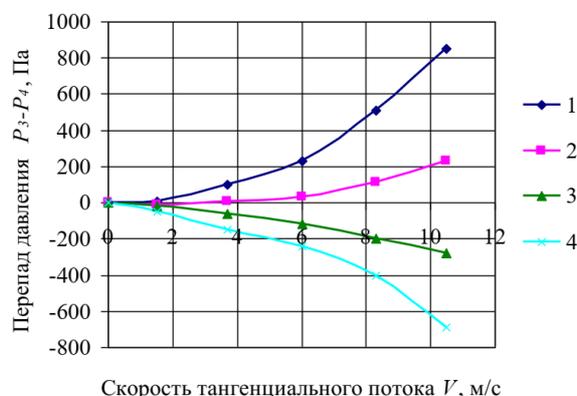
1 – $V_f = 0,16$ м/с; 2 – $V_f = 0,08$ м/с;
3 – $V_f = 0,0016$ м/с

Рисунок 8. Изменение перепада давления по длине фильтроэлемента ФЭ – 1 при $V_t = 6,03$ м/с

Попробуем объяснить этот феномен из предположения, что при $V_f = 0 - V > 0$, а координата точки перехода от «плюса» к «минусу» $G > 0,5$. Для очень высоких значений потоков фильтрата вышеуказанный перепад давлений во всей области положительный и повышается вдоль поверхности фильтра по экспоненте. При небольших же скоростях фильтрации всегда существует еще и область, в которой фильтрат течет через ФЭ в обратном направлении.

Данный эффект подтверждает и эксперимент по составлению зависимостей изменения перепада давления $P_3 - P_4$ от скоростей тангенциального потока при перемещении точки измерения давления P_3 вдоль поверхности ФЭ – 1 (рисунок 9). «Перемещение» точки измерения давления P_3 на практике осуществляли путем его контроля манометрами, установленными последовательно в разных зонах канала ячейки тангенциального микрофильтра. Результаты изменений еще раз показали, что в области значений $G < 0,5$ при скорости отвода фильтрата, равной нулю, перепад давления на фильтре – положительный, а при $G > 0,5$ отрицательный,

причем с ростом тангенциальной скорости потока эта разность растет. Данный эффект имеет важное практическое значение – с его помощью можно легко и просто регенерировать ФЭ обратным потоком фильтрата, увеличивая скорость циркуляции.



1 – $G=0,1$; 2 – $G=0,3$; 3 – $G=0,7$; 4 – $G=0,9$

Рисунок 9. Зависимость перепада давления $P_3 - P_4$ от скорости тангенциального потока V при различных значениях безразмерной координаты G

Таким образом, проведенное моделирование процессов тангенциальной фильтрации в пористых материалах, а также проведенные экспериментальные исследования процессов фильтрации позволили установить, что при определенных условиях можно предотвратить блокировку пор пористого материала твердыми частицами и обеспечить регенерацию ФЭ потоком фильтрата.

Заключение.

На градиентном композиционном пористом материале проведено моделирование влияния характеристик фильтруемой среды на процессы образования и смыва осадка при тангенциальной фильтрации. Показано, что существует принципиальная возможность предотвратить или, по крайней мере, замедлить процесс забивки (кольматации) пор фильтроэлементов частицами загрязнителя путем соответствующего выбора скорости тангенциального потока и давления фильтрации. При этом следует соблюдать главное требование к структуре фильтроэлементов – она должна обеспечивать режим поверхностной фильтрации.

Список литературы

- [1] Тумилович, М. В. Моделирование процессов тангенциальной фильтрации в пористых материалах/ М. В.Тумилович, Л. П.Пилиневич, А. Г.Кравцов // Сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф. “Big Data and Advanced Analytics”(Минск, Республика Беларусь, 19–20 мая 2021 г.): редкол. :В. А. Богуш [и др.]– Минск: Бестпринт, 2021. – С.305–310.
- [2] Тумилович, М. В. Моделирование процесса образования и смыва осадка при тангенциальной фильтрации в пористых материалах / М. В. Тумилович, Л. П. Пилиневич, А. Г. Кравцов // Сб. материалов VIII Междунар. науч.-практ. конф. “Big Data and Advanced Analytics”(Минск, Республика Беларусь, 11–12 мая 2022 г.): редкол. : В. А. Богуш [и др.]– Минск: Бестпринт, 2022. – С.110–117.
- [3] Fischer; E. Untersuchungen zum Trennprozess bei der Querstromfiltration/ E. Fischer. – Duesseldorf: VDI-Verlag GmbH. – 1987. – 134 S.
- [4] Тумилович, М.В. Очистка жидкостей тангенциальной фильтрацией в пористых порошковых материалах /М.В. Тумилович, В.В. Мазюк, Л.П. Пилиневич, В.В. Савич// Порошковая металлургия. – Минск: Белорусская наука. –2008. – Вып.31. – С. 239–245.

MODELING OF THE EFFECT OF THE CHARACTERISTICS OF A FILTERED MEDIUM ON THE REGULARITIES OF TANGENTIAL FILTRATION IN POROUS GRADIENT 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, Minsk, Belarus
E-mail: tumilovich@bsuir.by*

Abstract. The influence of the characteristics of the filtered medium on the processes of sediment formation and washout during tangential filtration in porous gradient materials was modeled. It is shown that there is a fundamental possibility to prevent the process of clogging (clotting) of the pores of the filter elements with pollutant particles by appropriately choosing the tangential flow rate and filtration pressure. At the same time, the main requirement for the structure of filter elements should be observed - it should provide a surface filtration mode.

Keywords: porous gradient materials, tangential filtration, surface filtration, sediment formation and washout, clogging, filter elements.