

**ФИЛЬТРОВАНИЕ СТОКОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ
И ХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
С ОТЛОЖЕНИЯМИ НА СТЕНКАХ СКВОЗНЫХ ПОР**

**FILTRATION OF TEXTILE AND CHEMICAL INDUSTRIES
EFFLUENTS WITH SEDIMENTATION ON THE WALLS OF THROUGH PORES**

Ю.А. ТАРАН, А.В. КОЗЛОВ

YU.A. TARAN, A.V. KOZLOV

(МИРЭА – Российский технологический университет,
Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова)

(MIREA – Russian Technological University,
Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies))

E-mail: capsula2@mail.ru

В работе рассмотрена и изучена модель и кинетика процесса закупоривания пор фильтровального блока. Показана формальная аналогия с процессами со структурной перестройкой исходной системы. Определены линейная и объемная скорости закупоривания пор фильтра. Показано влияние концентрации твердых частиц в суспензии и перепада давления в системе на процесс закупоривания пор. Найден период стабильной работы фильтра.

The paper considers and investigates the model and kinetics of the process of clogging the pores of the filter unit. A formal analogy with processes with a structural restructuring of the original system is shown. Linear and volumetric rates of filter pore clogging were determined. The influence of the concentration of solid particles in the suspension and the pressure drop in the system on the process of pore clogging is shown. The period of stable operation of the filter has been found.

Ключевые слова: фильтрация, закупоривание пор, формальная аналогия.

Keywords: filtration, pore clogging, formal analogy.

Фильтрация широко применяется в химической, текстильной и других отраслях промышленности для разделения (очистки) жидкой и твердой фракций пропусканием суспензии через фильтровальную перегородку. Процесс фильтрации является лимитирующей стадией во многих технологических процессах. Очистка сточных вод предприятий разных отраслей промышленности имеет ряд сходных особенностей: многоступенчатость, наличие стадий предварительной и глубокой очистки, широкий диапазон веществ, входящих в состав сточных вод, и их концентраций.

Стоки текстильной промышленности образуются в результате крашения пряжи и волокон, шлихтования пряжи, химической обработки волокнистых материалов, в процессах дубления, изготовления шерсти и акрилового волокна и прочих технологических процессов. Отсюда присутствие в стоках волокон, частичек замасливателей, красителей, синтетических ПАВ, отделочных препаратов, солей тяжелых металлов, взвешенных веществ и прочих нерастворимых примесей. Одним из необходимых этапов очистки является фильтрация. Для этого системы комплектуются оборудованием,

способным выводить из загрязненных вод мусор, крупные взвешенные частицы, песок и прочие механические примеси. В качестве стадии глубокой очистки используют варианты процесса фильтрования от тонкого мембранного разделения диффузией через сплошные мембраны и до паузейлева течения в порах фильтровальной перегородки [1...5]. Решающее значение имеет состояние фильтровальной перегородки и ее взаимодействие с исходным и изменяющим свои параметры фильтруемым потоком [1...5]. Усложнение также вызывает то, что поступают стоки от производств на предприятиях текстильной отрасли неравномерно по времени и по уровню загрязненности.

Для глубокой очистки применяют мембранное оборудование с физическим, а лучше с химическим взаимодействием проникающего компонента и материала мембраны [1]. Выбор аппаратно-технологического оформления данной стадии является вариативной задачей [1], [6].

В процессе фильтрования суспензии через пористую фильтровальную перегородку, с определенного момента времени, на поверхности и внутри пор перегородки начинают формироваться слои осадков. Слой, который образуется на фильтровальной перегородке, можно удалить с нее физически в ходе фильтрования, но очистка пор от осадка требует остановки процесса, что приводит к дополнительным затратам ресурсов и времени. Динамика процесса закупоривания пор требует более детального исследования. Рассмотрим работу простого и эффективного барабанного вакуум-фильтра [6]. Он представляет собой горизонтальный цилиндр (фильтровальная ячейка) с пористой поверхностью, помещенный в специальный лоток, в который поступает суспензия. Внутри цилиндра, с помощью масляного вакуумного насоса, создается разрежение. Из-за разницы давления внутри и снаружи цилиндра суспензия начинает двигаться внутрь ячейки и фильтроваться. Далее образующийся фильтрат всасывается в специальную трубу и выводится из фильтра. Объем фильтрата измеряется и по нему оценивают ход процесса

фильтрования: скорость, индукционный период, сопротивление осадка, сопротивление перегородки и др.

Для изучения процесса был использован барабанный вакуум-фильтр БОН1-1,0-1У. Осадок с поверхности фильтровальной перегородки срезался ножом. Массу продуктов фильтрации измеряли весовым методом. Данные в реальном времени записывались на компьютер. Проводили серию экспериментов, в которых исследовали фильтрование суспензии конверсионного мела с концентрацией от 0,005 до 0,08 м³тв/м³ при перепаде давления от 2,45 до 39,2 кПа. Каждый эксперимент проводили при постоянных перепадах давления и температуре и при одном значении концентрации твердых частиц в суспензии до тех пор, пока скорость фильтрования не снижалась до 10% от начального значения. Далее фильтр регенерировали промывкой и продувкой.

По аналогии проводили эксперимент с другими значениями концентрации твердых частиц в суспензии и перепадами давлений. Частью проверки методики является воспроизводимость экспериментов. Каждая серия экспериментов сопровождалась рядом дублирующих экспериментов.

С помощью лазерного анализатора частиц Микросайзер-201А были определены размеры твердых частиц для каждой отфильтрованной фракции. На примере фильтруемой суспензии с концентрацией 0,01 м³тв/м³ построены интегральные кривые распределения частиц (рис. 1 – интегральное распределение частиц по размерам: а) осевших на фильтровальной перегородке; б) осевших внутри пор фильтровальной перегородки; в) прошедших сквозь фильтровальную перегородку. Характерный размер пор перегородки 50 мкм). Частицы, размер которых превышает размер пор (50 мкм), не проходят через фильтр. Фракция частиц размером 30...50 мкм обладала наибольшей закупоривающей способностью. Это объясняется повышенным трением частиц о стенки поры при прохождении через нее, из-за их размера и формы, что вызывало замедление, столкновение друг с другом и полную остановку. Частиц размером (0...10 мкм) в забивающем поры осадке практически

ки нет, поэтому на рис. 1-б они не показаны. Это обусловлено тем, что их содержание в исходной суспензии было низким, и основное их количество прошло через фильтр. Фракция 0...30 мкм, обнаруженная

в фильтрате, меньше трети о стенку поры, и столкновение столь малых в сравнении с сечением канала частиц, как правило, не приводит к его перекрытию.

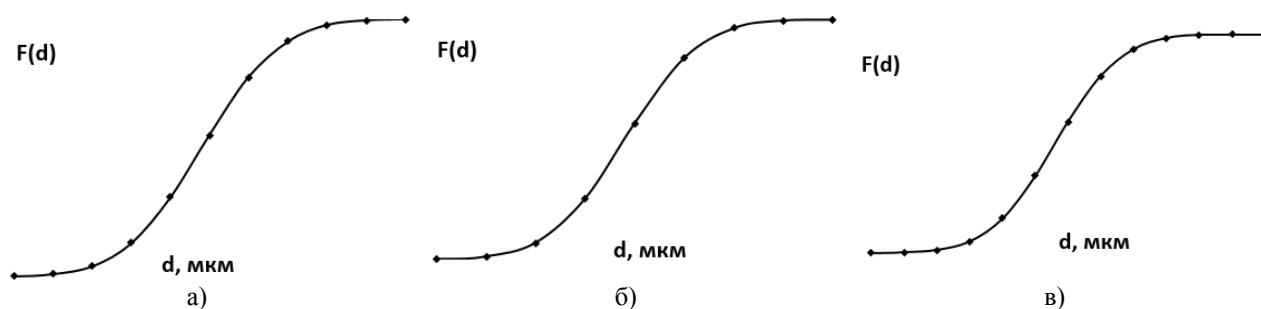


Рис. 1

В начале процесса объем фильтрата увеличивается прямо пропорционально времени. Это свидетельствует о постоянной скорости фильтрования и отсутствии зародышей центров отложений. Отклонение от прямолинейности является следствием окончания индукционного периода $\tau_{инд}$ и свидетельствует о возникновении и росте зародышей отложений. Вероятностный характер и малую чувствительность способа определения $\tau_{инд}$ компенсировали увеличением выборки экспериментов. Свяжем поток суспензии фильтрата и массовый поток твердых частиц в единицу времени через единицу поверхности фильтра $q_{мн}$, q_m .

До момента появления зародышей отложений, закупоривающих сквозные каналы фильтровальной перегородки, массовый поток постоянен и равен:

$$q_{мн} = \frac{\rho C V_H}{S \tau_{инд}}. \quad (1)$$

$$\eta = 1 - \frac{q_m}{q_{мн}} = 1 - \frac{A_{мс} C + A_{мп} \Delta P}{q_{мн}} = 1 - \exp\left(-\beta \frac{1}{n+1} \omega_3 v_l^n \tau^{n+1}\right), \quad (3)$$

где ΔP – перепад давления на фильтровальной перегородке, Па; $A_{мс}$, $A_{мп}$ – коэффициент переноса массы за счет концентрации твердых частиц в фильтруемой суспензии и перепада давлений на фильтровальной перегородке соответственно ($\text{кг} \cdot \text{м}^3$)/($\text{м}^3 \text{тв} \cdot \text{с}$) и $\text{кг}/(\text{Па} \cdot \text{с})$; ω_3 – скорость зарождения,

После образования и роста центров отложений поток уменьшается:

$$q_m = \frac{\rho C V}{S \tau}, \quad (2)$$

где V_H , V – объем фильтрата до и после образования первого отложения в порах, м^3 ; $\tau_{инд}$, τ – время фильтрования до и после образования первого отложения в порах, с; S – площадь фильтрования, м^2 ; C – концентрация твердых частиц в фильтруемой суспензии, $\text{м}^3 \text{тв}/\text{м}^3$; ρ – плотность фильтруемой суспензии, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Зная, как изменяется поток q_m во времени, выразим через него степень превращения (долю "закупоренности" проточных каналов фильтровальной перегородки отложениями на стенке):

$1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; v_l – скорость линейного роста, м/с; β – фактор формы; n – фактор роста.

Тогда возможно представить динамику закупоривания фильтра от влияния разности давлений и концентрации взвешенных частиц зеленого пигмента в модельном стоке фабрики нетканых материалов (рис. 2

– степень превращения (закупоренности) от времени: при различных концентрациях твердых частиц в суспензии и постоянной разности давлений $\Delta P = 0,2$ МПа (сплошные линии): 1 – 0,29 г/л; 2 – 0,2 г/л; 3 – 0,13 г/л; при различных разностях давлений в системе и постоянной концентрации взвешенных частиц $C = 0,2$ г/л (штриховые линии): 4 – 0,3 МПа; 5 – 0,2 МПа; 6 – 0,1 МПа).

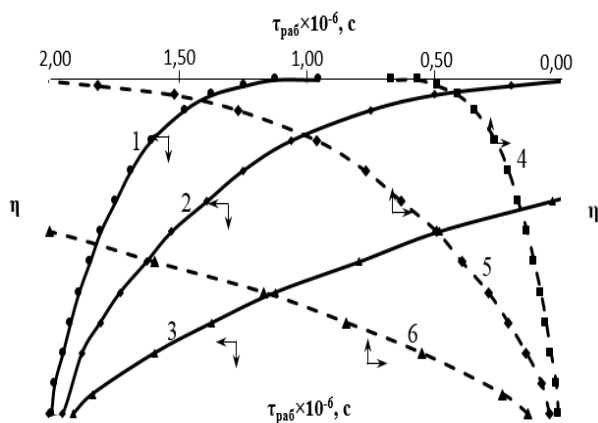


Рис. 2

Чтобы оценить общность подхода и диапазон его применения, воспроизводимость полученных результатов, исследование проведено на различных промышленных объектах: в том числе модельном стоке текстильного производства (зеленый пигмент – 0,2 г/л, аппретат 9211 – 50 г/л, КМЦ марки 70/300 – 5 г/л) и водной суспензии конверсионного мела. Закономерности фильтрования стока текстильного производства качественно согласуются с фильтрованием конверсионного мела [8], следовательно, данный процесс можно описать аналогич-

ным образом. По зависимости степени превращения от времени при различных значениях движущих сил можно сделать вывод, что с ростом перепада давления на фильтровальном блоке поры засоряются отложениями быстрее, так как поток суспензии увеличивается. Аналогичная картина наблюдается и с увеличением концентрации твердых частиц.

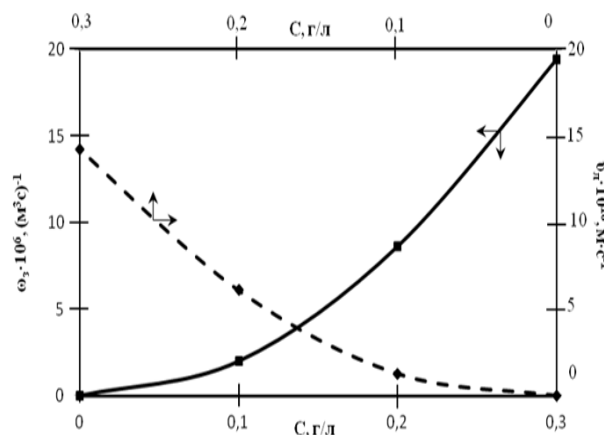


Рис. 3

Можно выразить зависимость скоростей зарождения и роста от концентрации твердых частиц в фильтруемой суспензии: $\omega_з = f(C)$ и $v_{\text{л}} = f(C)$ (рис. 3 – зависимость скорости роста новой фазы (сплошная линия) и скорости зарождения центров новой фазы (штриховая линия) от концентрации твердых частиц в системе при постоянном значении перепада давлений $\Delta P = 0,2$ МПа). Для этого нужно условно выразить уравнение (3) через одну движущую силу:

$$\eta = 1 - \frac{q_m}{q_{\text{мн}}} = 1 - \Delta P \frac{\left(\frac{A_{\text{мс}} C}{\Delta P} + A_{\text{мп}} \right)}{q_{\text{мн}}} = 1 - \exp \left(-\beta \frac{1}{n+1} \omega_з v_{\text{л}}^n \tau^{n+1} \right). \quad (4)$$

С позиций формальной аналогии [7], применимость которой мы подтвердили выше, в том числе согласованием результатов физического и вычислительного эксперимента [8], для получения зависимостей $v_{\text{л}}$ и $\omega_з$ можно воспользоваться апробированными ранее формулами. Скорость зарождения

и скорость роста будут определяться как:

$$\omega_з = V_{\text{зр}} \Delta P^{n_{\text{зр}}} \text{ и } \omega_з = V_{\text{зс}} C^{n_{\text{зс}}}, \quad (5)$$

$$v_{\text{л}} = V_{\text{лр}} \Delta P^{n_{\text{лр}}} \text{ и } v_{\text{л}} = V_{\text{лс}} C^{n_{\text{лс}}}, \quad (6)$$

где $V_{зс}$, $V_{лс}$ и $V_{зр}$, $V_{лр}$ – интерполяционные коэффициенты для скоростей зарождения и линейного роста под действием движущих сил – разницы концентраций и перепада давления, $m^3/(m^3 \cdot c \cdot m^3 \text{ тв})$ и $(m^3 \cdot c \cdot \text{Па})^{-1}$; $n_{зс}$, $n_{лс}$ и $n_{зр}$, $n_{лр}$ – фактор роста (z – объемного, l – линейного) под действием движущих сил – разницы концентрации и перепада давления.

Кривые на рис. 3 показывают, что с увеличением концентрации твердых частиц в

суспензии возрастают и скорость зарождения, и линейная скорость роста. Преобразовав кривые, можно получить интерполяционные зависимости для обработки экспериментальных данных (табл. 1 – пример параметров интерполяционных зависимостей скоростей зарождения и роста центров новой фазы для стока текстильного производства).

Т а б л и ц а 1

C, г/л	ΔP , МПа	Сток текстильного производства			
		V_z , ($m^3 c$) ⁻¹ /Па и ($m^3 c$) ⁻¹ /(г/л)	n_z	V_l , (м/с)/Па и (м/с)/(г/л)	n_l
0,2	0,1	$7,85 \cdot 10^{-18}$	2,1	$4,70 \cdot 10^{-22}$	2,2
	0,2				
	0,3				
0,29	0,2	$1,34 \cdot 10^{-4}$	2,1	$2,16 \cdot 10^{-8}$	2,0
0,2					
0,13					

Данная методика позволяет определить скорость закупоривания пор фильтра, которая напрямую связана с производительностью фильтровального блока, следовательно, и всего технологического процесса и может быть использована, в том числе и при проектировании систем очистки сточных вод промышленных предприятий.

ВЫВОДЫ

1. В работе была доказана правомерность рассмотрения механизма закупоривания пор фильтровальной перегородки, как процесса со структурной перестройкой исходной системы.

2. Показано распределение частиц конверсионного мела, оседающих на разных частях фильтровальной перегородки.

3. Рассмотрен механизм закупоривания пор фильтра на примере модельного стока текстильного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жужиков В.А. Фильтрация. Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1971.
2. Федосов С.В., Осадчий Ю.П., Маркелов А.В., Теленов А.Т. Исследование механизма закупоривания пор полимерных мембран // Международный

научно-исследовательский журнал. – 2015, вып. №1-3 (32). С. 18...20.

3. Самохвалов Н.М., Скачков Е.В., Сенотова С.А. Моделирование процесса фильтрования с закупориванием пор // Вестник ИрГТУ. – 2009, №2 (38). С. 181...185.

4. Федосов С.В., Осадчий Ю.П., Маркелов А.В. Механизм закупоривания полимерных мембран при разделении отработанных моторных масел // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2015. Том 58. №8. С. 123...124. ISSN 0579-2991/

5. Маркелов А.В., Осадчий Ю.П. Разделение сточных вод, содержащих активные красители, ультрафильтрацией // Вестник ТГУ. – 2016. Т. 21. Вып. 6. С. 2380...2384.

6. Айништейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., Захаренко В.В., Зиновкина Т.В., Таран А.Л., Костянян А.Е. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. – М.: Теревинф, 2015.

7. Таран Ю.А., Таран А.В. Теория и практика изучения кинетики фазовых и формально аналогичных им превращений / Под общ. ред. А.Л. Тарана. – М.: Московский технологический университет (МИРЭА), 2016. ISBN 978-5-600-01695-8

8. Таран Ю.А., Козлов А.В., Таран А.Л. Влияние образования отложений в порах фильтровальной перегородки на процесс фильтрации // Тонкие химические технологии. – 2019. Т. 14. № 2. С. 15...22.

REFERENCES

1. Zhuzhikov V.A. Fil'trovaniye. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy. – M.: Khimiya, 1971.

2. Fedosov S.V., Osadchiy Yu.P., Markelov A.V., Telenov A.T. Issledovanie mekhanizma zakuporivaniya por polimernykh membran // *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. – 2015, vyp. №1-3 (32). S.18...20.

3. Samokhvalov N.M., Skachkov E.V., Senotova S.A. Modelirovanie protsessa fil'trovaniya s zakuporivaniem por // *Vestnik IrGTU*. – 2009, №2 (38). S. 181...185.

4. Fedosov S.V., Osadchiy Yu.P., Markelov A.V. Mekhanizm zakuporivaniya polimernykh membran pri razdelenii otrabotannykh motornykh masel // *Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. – 2015. Tom 58. №8. S. 123...124. ISSN 0579-2991/

5. Markelov A.V., Osadchiy Yu.P. Razdelenie stochnykh vod, soderzhashchikh aktivnye krasiteli, ul'tra-fil'tratsiy // *Vestnik TGU*. – 2016. T. 21. Vyp. 6. S. 2380...2384.

6. Aynshteyn V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A., Zakharenko V.V., Zinovkina T.V., Taran A.L., Kostanyan A.E. *Obshchiy kurs protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii*. – M.: Terevinf, 2015.

7. Taran Yu.A., Taran A.V. *Teoriya i praktika izucheniya kinetiki fazovykh i formal'no analogichnykh im prevrashcheniy / Pod obshch. red. A.L. Tarana*. – M.: Moskovskiy tekhnologicheskiy universitet (MIREA), 2016. ISBN 978-5-600-01695-8

8. Taran Yu.A., Kozlov A.V., Taran A.L. Vliyanie obrazovaniya otlozheniy v porakh fil'troval'noy peregorodki na protsess fil'tratsii // *Tonkie khimicheskie tekhnologii*. – 2019. T. 14. № 2. S. 15...22.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И. РТУ (МИРЭА). Поступила 13.04.21.