

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. Н. Леонов, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева

**КОМБИНИРОВАННЫЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМ
И ОБЪЕМНЫМ МЕХАНИЗМАМИ ФИЛЬТРОВАНИЯ**

МИНСК
БГАТУ
2017

УДК 621.762: 669-405.8

Леонов, А. Н. Комбинированные фильтрующие системы на основе фильтров с поверхностным и объемным механизмами фильтрации / А. Н. Леонов, В. М. Капцевич, В. К. Корнеева. – Минск : БГАТУ, 2017. – 124 с.: ил. – ISBN 978-985-519-879-7.

В монографии предложена разработка концепции создания комбинированных фильтровальных систем, позволяющей методом многокритериальной оптимизации создавать систему с приемлемым компромиссом конфликтующих между собой эксплуатационных параметров. Приведены примеры расчета комбинированных фильтровальных систем на основе порошковых и волоконных пористых проницаемых материалов.

Для научных и инженерно-технических работников, может быть полезна магистрантам и аспирантам.

Табл. 10. Ил. 34. Библиогр.: 43 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Учреждения образования «Белорусский государственный
аграрный технический университет»
(протокол № 1 от 10 февраля 2017 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *К. Е. Белявин*,
кандидат технических наук *В. В. Савич*

ISBN 978-985-519-879-7

© БГАТУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	11
Глава 1. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ.....	15
1.1. Независимые факторы, влияющие на процесс фильтрования.....	15
1.2. Обоснование областей применения фильтровальных элементов из пористых проницаемых материалов, получаемых методами порошковой металлургии.....	20
1.3. Разработка критериев работоспособности фильтровальных систем для очистки жидкостей в различных областях применения.....	22
Глава 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОВЕРХНОСТНЫМ МЕХАНИЗМОМ ФИЛЬТРОВАНИЯ.....	37
2.1. Общие сведения о поверхностном механизме фильтрования.....	37
2.2. Динамическое моделирование процесса поверхностного фильтрования с учетом образующегося кейк-слоя.....	42
Глава 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ОБЪЕМНЫМ МЕХАНИЗМОМ ФИЛЬТРОВАНИЯ.....	51
3.1. Общие сведения по объемному механизму фильтрования....	51
3.2. Сравнительный анализ различных механизмов объемного фильтрования.....	54
3.3. Моделирование и оптимизация анизотропной поровой структуры для реализации объемного механизма фильтрования.....	60
3.4. Взаимосвязь степени и тонкости очистки при объемном механизме фильтрования.....	69
3.5. Динамическое моделирование процесса объемного фильтрования с учетом осаждения частиц загрязнений в поровом пространстве.....	79

Глава 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИЗ ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМ И ОБЪЕМНЫМ МЕХАНИЗМАМИ ФИЛЬТРОВАНИЯ.....	88
4.1. Сравнительный анализ пористых проницаемых элементов с поверхностным и объемным механизмами фильтрации.....	88
4.2. Динамическое моделирование комбинированных фильтровальных систем.....	90
Глава 5. ТЕОРИЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПРИЕМЛЕМЫМ КОМПЛЕКСОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ.....	97
Глава 6. РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ ВОЛОКНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	102
6.1. Предварительная обработка экспериментальных данных.....	102
6.2. Многофакторное моделирование и многокритериальная оптимизация фильтровальной системы для очистки моторного масла.....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120

ПРЕДИСЛОВИЕ

В монографии обобщены результаты научных исследований, выполненных на кафедре «Основы научных исследований и моделирования» БГАТУ в рамках гранта № Т15-165 по теме «Научные основы создания фильтрующих систем из пористых проницаемых материалов с требуемым комплексом эксплуатационных параметров методом многокритериальной оптимизации» Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (2015–2017 гг.).

Авторы выражают благодарность Министерству сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь за оказанную финансовую поддержку при издании данной монографии.

Авторы благодарны профессору К. Е. Белявину и доценту В. В. Савичу за полезные замечания, сделанные ими при рецензировании монографии.

Авторы выражают благодарность коллегам, доценту М. М. Дечко и старшему научному сотруднику ИПМ НАН Беларуси А. И. Маруковичу, за полезные дискуссии, которые способствовали уточнению ряда теоретических положений и за первые совместные публикации по многокритериальной оптимизации.

Усилия авторов при работе над монографией были распределены следующим образом: введение, заключение, главы 1, 2, 4, 5 и разделы 3.3, 3.4, 3.5, 6.2 написаны А. Н. Леоновым, разделы 3.1, 3.2, 6.1 – В. М. Капцевичем и В. К. Корнеевой (совместно).

Авторы выражают признательность аспирантке Ли Цинчжень (КНР) за помощь в оформлении иллюстраций.

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

1 – индекс, характеризующий кейк-слой, образованный из крупных частиц загрязнений диаметром D ;

2 – индекс, характеризующий мембранный фильтровальный элемент;

3 – индекс, характеризующий глубинный фильтровальный элемент;

ППМ – пористые порошковые материалы;

ПВМ – пористые волокновые материалы;

ПСМ – пористые сетчатые материалы;

ВПСМ – высокопористые сотовые материалы;

ВПЯМ – высокопористые ячеистые материалы.

Параметры исходной жидкости и конечного фильтрата:

$\mu_{ж}$ – коэффициент динамической вязкости очищаемой жидкости и конечного фильтрата, Па·с;

$\rho_{ж}$ – плотность очищаемой жидкости и конечного фильтрата, кг/м³;

$\sigma_{ж}$ – коэффициент поверхностного натяжения очищаемой жидкости и конечного фильтрата, Н/м;

D_1 – диаметр крупных частиц загрязнений в очищаемой жидкости, м;

C_1 – объемная концентрация крупных частиц загрязнений (диаметр D_1) в очищаемой жидкости, м³/м³;

d_3 – диаметр мелких частиц загрязнений в исходной жидкости, м;

C_3 – объемная концентрация мелких частиц загрязнений (диаметр d) в очищаемой жидкости, м³/м³;

γ – коэффициент степени очистки;

T – температура очищаемой жидкости и конечного фильтрата, °С;

ψ – степень очистки;

a – тонкость очистки, м;

D_f – коэффициент самодиффузии очищаемой жидкости, м²/с.

Первый пористый проницаемый слой (кейк-слой):

$V_{ф1}(t)$ – скорость фильтрования (филтрации) очищаемой жидкости, м/с;

$V_{\phi 1}(0)$ – начальная скорость фильтрования (фильтрации) очищаемой жидкости, м/с;

$V_{\pi 1}(t)$ – скорость очищаемой жидкости в порах кейк-слоя, м/с;

$V_{\pi 1}(0)$ – начальная скорость очищаемой жидкости в порах кейк-слоя, м/с;

D_1 – диаметр сферических частиц, из которых образован кейк-слой, м;

Π_1 – пористость;

$d_{\max 1}$ – максимальный размер пор, м;

$d_{\text{ср}1}$ – средний размер пор, м;

$H_1(t)$ – толщина кейк-слоя, м;

$H_1(0)$ – начальная толщина кейк-слоя м;

B_1 – коэффициент извилистости пор;

$k_{\mu 1}$ – вязкостный коэффициент проницаемости, м;

k_{r1} – инерционный коэффициент проницаемости, м;

$S_{\phi 1}$ – фронтальная поверхность фильтрования (фильтрации), м²;

R_1 – ресурс работы, с;

ΔP_1 – перепад давления, Па;

$V_1(t)$ – объем образующегося кейк-слоя, м³.

Второй пористый проницаемый слой (мембранный фильтровальный элемент):

$V_{\phi 2}(t)$ – скорость фильтрования (фильтрации) очищаемой жидкости, м/с;

$V_{\phi 2}(0)$ – начальная скорость фильтрования (фильтрации) очищаемой жидкости, м/с;

$V_{\pi 2}(t)$ – скорость очищаемой жидкости в порах элемента, м/с;

$V_{\pi 2}(0)$ – начальная скорость очищаемой жидкости в порах элемента, м/с;

Π_2 – пористость;

D_2 – диаметр сферических частиц, из которых изготовлен пористый элемент, м;

$d_{\max 2}$ – максимальный размер пор, м;

$d_{\text{ср}2}$ – средний размер пор, м;

H_2 – толщина элемента, м;

B_2 – коэффициент извилистости пор;

$k_{\mu 2}$ – вязкостный коэффициент проницаемости, м^2 ;

$k_{\rho 2}$ – инерционный коэффициент проницаемости, м;

$S_{\text{ф}2}$ – фронтальная поверхность фильтрования (фильтрации), м^2 ;

ΔP_2 – перепад давления, Па;

V_2 – объем фильтровального элемента, м^3 .

Третий пористый проницаемый слой (глубинный фильтровальный элемент):

$V_{\text{ф}3}(t)$ – скорость фильтрования (фильтрации) очищаемой жидкости, м/с;

$V_{\text{ф}3}(0)$ – начальная скорость фильтрования (фильтрации) жидкости, м/с;

$V_{\text{п}3}(t)$ – скорость очищаемой жидкости в порах элемента, м/с;

$V_{\text{п}3}(0)$ – начальная скорость очищаемой жидкости в порах элемента, м/с;

D_3 – диаметр сферических частиц (волокон), из которых изготовлен пористый элемент м;

l – длина волокна, м;

$\text{П}_3(t)$ – пористость;

$\text{П}_3(0)$ – начальная пористость;

$d_{\text{ср}3}(t)$ – средний размер пор, м;

$d_{\text{ср}3}(0)$ – начальный средний размер пор, м;

H_3 – толщина элемента, м;

B_3 – коэффициент извилистости пор;

$k_{\mu 3}(t)$ – вязкостный коэффициент проницаемости, м^2 ;

$k_{\mu 3}(0)$ – начальный вязкостный коэффициент проницаемости, м^2 ;

$k_{\rho 3}(t)$ – инерциальный коэффициент проницаемости, м;

$k_{p3}(0)$ – начальный инерциальный коэффициент проницаемости, м;
 $S_{ф3}$ – фронтальная поверхность фильтрования (фильтрации), м²;

ΔP_3 – перепад давления, Па;

V_3 – объем фильтровального элемента, м³;

R_3 – ресурс работы, с;

λ – глубина проникновения, м.

Комбинированная фильтровальная система:

$V_{ф}(t)$ – скорость фильтрования (фильтрации) очищаемой жидкости, м/с;

$V_{ф}(0)$ – начальная скорость фильтрования (фильтрации) очищаемой жидкости, м/с;

Q – производительность процесса очистки, м³/с;

U – удельная производительность процесса очистки, с⁻¹;

V – объем фильтровальной системы, м³;

R – ресурс работы, с.

Общие термины:

t – время процесса фильтрования (фильтрации), с;

Re – число Рейнольдса;

$Re_{кр1}$ – критическое число Рейнольдса, при котором ламинарный режим потока жидкости (газа) переходит в промежуточный;

$Re_{кр2}$ – критическое число Рейнольдса, при котором промежуточный режим потока жидкости (газа) переходит в турбулентный;

S_v – удельная поверхность пористого материала фильтра, м⁻¹;

$\Delta P_{вх}$ – перепад давления на фильтровальном элементе, вызванный входным сопротивлением, Па;

$\Delta P_{кап}$ – перепад давления на фильтровальном элементе, вызванный капиллярными силами, Па;

ΔP_{μ} – перепад давления на фильтровальном элементе, вызванный вязкостью фильтрата, Па;

ΔP_{ρ} – перепад давления на фильтровальном элементе, вызванный инерцией фильтрата, Па;

$\Delta P_{\text{вых}}$ – перепад давления на фильтровальном элементе, вызванный выходным сопротивлением, Па;

ΔP_{max} – максимально допустимый перепад давления на фильтровальной системе, Па;

$k_{\text{б}}$ – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$, Дж/К;

k – константа скорости удаления частиц загрязнений, м/с.

ВВЕДЕНИЕ

Получение широкого спектра жидкостей с высокой химической и физической чистотой – актуальная научная проблема, которой уделяется пристальное внимание со стороны крупнейших мировых фирм, занимающихся производством точной механики, лекарственных препаратов, пищевых продуктов, питьевой воды и др. Фильтровальные системы, выполняя вспомогательную функцию, в значительной степени снижают износ трущихся поверхностей, повышают ресурс работы дорогостоящего оборудования, снижают токсичность пищевых продуктов и лекарственных препаратов, позволяют эффективно бороться с экологическим загрязнением окружающей среды.

Проблема очистки жидкостей от механических примесей – традиционная научная и инженерная проблема, которая в XX в. получила достаточно глубокое теоретическое обоснование и широкое практическое внедрение. Достаточно упомянуть относительно небольшую часть фильтровальных систем, используемых в мире: миллиарды фильтров для очистки моторного масла и воздуха для автомобилей, самолетов, морских и речных судов; миллиарды фильтров для очистки воздуха в пылесосах и кондиционерах; миллиарды фильтровальных систем для очистки воды, пищевых продуктов и лекарственных препаратов, чтобы понять, что рынок фильтровальных систем в XXI в. будет достаточно большим и стабильным.

Достигнутое в настоящее время углубленное понимание взаимосвязи химсостава, структурных, гидродинамических и фильтровальных свойств пористых проницаемых материалов с режимными параметрами процессов их получения, а также с процессами, происходящими при их эксплуатации, позволяет отказаться от эмпирических методов оценки фильтровальных систем и эволюционно перейти на более высокий теоретический уровень их проектирования. Тем не менее, создание большого разнообразия пористых проницаемых материалов с заданным комплексом физико-механических свойств, решению которой посвящено большое количество работ, выполненных на очень высоком научном уровне, в высшей степени необходимо, но не является достаточным для создания конкурентоспособных фильтровальных систем с требуемым комплексом эксплуатационных параметров. Можно смело утверждать, что безвозвратно уходит то время, когда здравый смысл и инженерная интуиция позволяли находить приемлемое техническое решение по созданию

фильтровальных систем для очистки жидкостей с приемлемым комплексом эксплуатационных параметров.

Следует отметить, что фильтровальные системы относятся к ряду так называемых сложных систем, специфическая особенность которых заключается в том, что в этих системах тезис и антитезис одинаково справедливы. В связи с этим любое простое решение, направленное на повышение эффективности их функционирования, не является оптимальным. Рабочий инструмент изучения таких систем должен быть основан на методе, включающем в себя системное моделирование всех этапов создания фильтровальных систем и многокритериальную оптимизацию, так как два важнейших эксплуатационных параметра фильтровальных систем – производительность процесса и фильтровальные параметры (тонкость и степень очистки) – имеют конфликтующий характер изменения. Поэтому стратегия теоретического исследования фильтровальных систем включает в себя следующие этапы: 1) моделирование процессов эксплуатации (фильтрация, инфильтрация, фильтрование), происходящих в пористых проницаемых материалах; 2) моделирование взаимосвязи эксплуатационных параметров с физико-механическими свойствами пористых материалов и конструктивными параметрами фильтровальных систем; 3) моделирование взаимосвязи физико-механических свойств пористых материалов (гидродинамические, фильтровальные, капиллярные, теплофизические) со структурными, каркасными факторами пористого материала и конструктивными размерами фильтровальных систем; 4) многокритериальная оптимизация по двум и более конфликтующим между собой параметрам оптимизации. Метод многокритериальной оптимизации позволяет рассчитать оптимальный комплекс независимых управляющих факторов (структурные и габаритные факторы, перепад давлений) путем нахождения приемлемого компромисса между параметрами оптимизации, который, в свою очередь, способствует разработке эффективных фильтровальных систем с приемлемым комплексом эксплуатационных параметров. Предлагаемый метод, включающий в систему научных исследований рыночные требования, обеспечивает высокую конкурентоспособность и рентабельность создаваемых систем. Следует еще раз отметить, что эффективность внедрения любых технических систем в промышленность и сельское хозяйство будет достаточно высокой только в том случае, если требования рынка будут включены в систему «наука», так как внутри себя наука концептуально не может создать критерий практической целесообразности.

Важно, что между тремя основными процессами эксплуатации, происходящими в пористых проницаемых материалах (фильтрация, инфильтрация, фильтрование), есть концептуальное различие в методологии их исследования и, в частности, в методе математического моделирования (стационарное и динамическое).

Процесс *фильтрации* жидкости в пористых проницаемых материалах является объектом только стационарного моделирования, так как параметры пористой среды и очищаемой жидкости в процессе фильтрации остаются постоянными (пористая среда и фильтрат не взаимодействуют между собой).

Процесс *инфильтрации* жидкости в пористых проницаемых материалах отличается от процесса фильтрации, так как он является объектом стационарного моделирования, в процессе которого параметры пористой среды и очищаемой жидкости остаются постоянными (например, инфильтрация воды стеклянными капиллярами), либо объектом динамического моделирования, в процессе которого параметры пористой среды меняются во времени (например, пропитка железного пористого каркаса жидкой медью, при которой в результате частичного растворения железа происходит изменение размеров пор, а вновь образованная жидкость имеет вязкость, отличающуюся от вязкости чистой меди).

В отличие от вышеописанных, процесс *фильтрования* всегда является объектом динамического моделирования, так как со временем увеличиваются габаритные размеры фильтровальной системы в связи с образованием и ростом кейк-слоя на мембранном (поверхностном) фильтровальном элементе и уменьшением размера пор в связи с осаждением частиц загрязнений в объеме глубинного (объемного) фильтровального элемента.

Следует отметить, что термины «поверхностный механизм фильтрования» и «мембранный механизм фильтрования», «объемный механизм фильтрования» и «глубинный механизм фильтрования» являются синонимами, которые применяются в отечественной и зарубежной научно-технической литературе.

В настоящее время благодаря усилиям мирового сообщества ученых разработано большое количество способов очистки жидкостей от различного рода загрязнений: механическое фильтрование, адсорбция, сорбция, седиментация, ионообменное фильтрование, химическое и электрохимическое фильтрование, биологическая, инерциальная и гравитационная очистка (гидроциклон, центрифуга),

перекристаллизация, флотация, сублимация, дистилляция, перегонка, осмос, обратный осмос.

Данная работа посвящена частному вопросу, а именно: очистке жидкостей от твердых частиц загрязнений через комбинированные системы (комбинация пористых элементов с поверхностным (мембранным) и объемным (глубинным) механизмами фильтрации), которые изготовлены из пористых проницаемых материалов, получаемых методами порошковой металлургии.

Специфика современного этапа прикладных исследований заключается в том, что наука вплотную подошла к решению крупномасштабных экологических и технологических проблем, решение которых связано, в частности, с созданием эффективных фильтровальных систем, и к которым предъявляется комплекс конфликтующих между собой требований, таких как высокие производительность и ресурс работы – высокие степень и тонкость очистки. Кроме того, эксплуатация таких систем может проходить в экстремальных условиях (высокие значения температуры и давления, агрессивные очищаемые среды), а новое поколение приборов и высокоточного оборудования требует для своей надежной работы использования рабочих жидкостей с механическими примесями менее 0,3 мкм. Еще более жесткие требования предъявляются к биологическим штаммам, которые должны быть очищены при комнатной температуре от бактерий, размеры которых 0,1–1,0 мкм.

Таким образом, разработка эффективных фильтровальных систем должна базироваться на системном математическом моделировании всех этапов их создания с последующей многокритериальной оптимизацией, которые, в свою очередь, являются базой для прогнозирования и принятия управленческих решений. В дальнейшем эта тенденция, обусловленная взрывным развитием методов и средств компьютерной математики, будет только усиливаться.

Однако, несмотря на достаточно обширную научно-техническую и патентную литературу, посвященную теории и практике проектирования и эксплуатации фильтровальных систем, существует целый ряд научных проблем, решение которых позволит повысить эффективность их проектирования. К ним, в частности, относятся задачи, связанные с динамическим моделированием процессов фильтрации на мембранных (поверхностных) и глубинных (объемных) фильтровальных элементах, которые напрямую связаны с расчетом производительности процесса очистки, ресурса работы и параметров очищенного фильтрата.

ГЛАВА 1. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1. Независимые факторы, влияющие на процесс фильтрования

XX век, в основном, прошел под знаком разработки большого разнообразия пористых проницаемых материалов, различающихся прежде всего структурой порового пространства (порошковая, волокновая, сетчатая, сотовая, ячеистая) и процессов их формования и спекания. За это время было создано большое число фильтрующих и фильтровальных систем различного назначения, которые нашли широкое применение в промышленности и сельском хозяйстве. Успешное внедрение таких систем было осуществлено и за счет изучения процессов, происходящих в пористых проницаемых материалах, таких как фильтрация, инфильтрация и фильтрование. Основной научный метод изучения процессов эксплуатации изделий из пористых проницаемых материалов базировался в основном на стационарном моделировании структуры пористых материалов с последующей однокритериальной оптимизацией. В настоящее время, с целью повышения эффективности фильтровальных систем нового поколения, выдвигается ряд новых, достаточно жестких требований по их созданию. Разумеется, что не существует четкой и однозначной временной границы между разработанными системами и методами их исследования и теми, которые предстоит разработать, так как наука развивается непрерывно, и преемственность является основным принципом ее развития. Поэтому границу между XX–XXI вв. следует понимать весьма условно. Новые требования, предъявляемые в настоящее время к фильтровальным системам, связаны, во-первых, с тенденцией повышения механической прочности, термостойкости и коррозионной стойкости пористых проницаемых материалов, в связи с возросшей агрессивностью очищаемых сред (высокие значения температуры, давления, вязкость, агрессивность среды); во-вторых, с конфликтностью выдвигаемых требований, например, увеличение тонкости очистки до 0,5 мкм и степени очистки более 99 % при сохранении высокой производительности и ресурса работы фильтровальных систем; в-третьих, с необходимостью создания новой методологии исследования и разработки фильтровальных систем,

основанной на динамическом моделировании и многокритериальной оптимизации (точнее, связанное с дальнейшим развитием теоретических методов, основы которых были заложены уже в XX в.); в-четвертых, с необходимостью снижения удельных материальных, энергетических и трудовых затрат при создании и эксплуатации фильтровальных систем (Дж/кг).

Для реализации новых требований можно выделить следующие задачи, решение которых создаст теоретическую базу для повышения эффективности фильтровальных систем: 1) обоснование ниши рыночного сегмента, в которой фильтровальные элементы, полученные методом порошковой металлургии, обладают высокой конкурентоспособностью; 2) создание фильтровальных комбинированных систем с требуемым комплексом эксплуатационных параметров (приемлемый компромисс между тонкостью и степенью очистки, ресурсом работы и удельной производительностью одновременно).

Проблеме фильтрации жидкостей в мировой литературе с начала XX в. посвящено большое количество научных публикаций, среди которых целесообразно отметить публикации А. Дарси, Ж. Дюпюи, Дж. Козени, научные исследования которых положили начало стационарному математическому моделированию взаимосвязи структуры, свойств и процессов, протекающих в пористых проницаемых материалах.

Если рассматривать процесс очистки жидкостей и газов от твердых частиц загрязнений через фильтровальные системы на основе пористых проницаемых материалов, то следует отметить, что эффективность процесса очистки определяется пятью группами независимых факторов.

1. Механизмы фильтрации [5, 27–31, 33, 36, 38–43]: мембранный и глубинный механизмы, предопределяемые соотношением максимального и среднего размера пор фильтрующей системы d_{\max} , d_{cp} и тонкости очистки a . Тонкость очистки при мембранном механизме фильтрации $a = d_{\max}$, при глубинном механизме должно выполняться неравенство $a \ll d_{\text{cp}}$. Невыполнение этого неравенства при глубинном механизме фильтрации приводит к тому, что твердые частицы загрязнений, размер которых лишь ненамного меньше среднего размера пор $d < d_{\text{cp}}$, в начальный период фильтрации «забивают» 2–3 внешних слоя фронтальной поверхности, после чего

глубинный фильтр начинает функционировать как мембранный с существенным снижением производительности процесса.

Оба механизма фильтрования имеют свои достоинства и недостатки. Достоинство мембранного механизма заключается в том, что твердые частицы загрязнений очищаемой жидкости, которые по размеру превышают максимальный размер пор d_{max} , со 100%-й вероятностью задерживаются фронтальной поверхностью мембраны. Недостаток мембранных фильтров – относительно большой перепад давления при высокой производительности процесса очистки жидкости с большой вязкостью и требовании высокой тонкости очистки (например 1 мкм).

Достоинство глубинных фильтров заключается в том, что они обеспечивают относительно низкий перепад давления на фильтровальном элементе при высокой производительности процесса очистки жидкости с высокой вязкостью и требовании высокой тонкости очистки. Этот эффект объясняется основным условием $d_{\text{cp}} \gg a$, так как относительно большой размер пор глубинного фильтра обеспечивает относительно низкий перепад давления на нем. Недостаток глубинных фильтров – относительно невысокий ресурс работы, так как их грязеемкость определяется объемом их порового пространства. Кроме того, для эффективного функционирования глубинных фильтров должно выполняться важное условие: объем частиц загрязнений, адсорбированных в поровом пространстве фильтрующего элемента, должен занимать относительно небольшую часть этого пространства, то есть $V_{\text{пр}} \ll V_{\text{пор}}$. В противном случае забивка порового пространства фильтровальной системы частицами загрязнений приводит к существенному повышению перепада давления, которая начинает функционировать как мембранный фильтр. Перспективным направлением повышения эффективности очистки жидкостей является создание комбинированных фильтровальных систем, в которых используется многоступенчатое фильтрование с чередованием мембранных и глубинных фильтровальных элементов.

2. Режимы фильтрации [2–4, 36, 38]: ламинарный ($Re < Re_{\text{кр}1}$), промежуточный ($Re_{\text{кр}1} \leq Re \leq Re_{\text{кр}2}$) и турбулентный ($Re > Re_{\text{кр}2}$),

которые определяются соотношением числа Рейнольдса $Re = V_{п} d_{ср} \rho_{ж} / \mu_{ж}$, характеризующим течение жидкости, и структурными числами Рейнольдса $Re_{кр1}$ и $Re_{кр2}$, которые определяются структурными факторами пористого проницаемого материала (прежде всего, средним размером пор).

Для ламинарного и турбулентного течения жидкости и газа в пористых проницаемых материалах гидравлические потери описываются, соответственно, следующими уравнениями [25, 26]:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\mu_{ж} V_{ф}}{k_{\mu}}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\mu_{ж} V_{ф}}{k_{\mu}} + \frac{\rho_{ж} V_{ф}^2}{k_{\rho}}. \quad (2)$$

3. Структурные факторы пористых проницаемых материалов: структура порошковая, волокновая, сетчатая, ячеистая и сотовая. Широкий диапазон изменения пористости $\Pi = 0,2 - 0,98$, размера пор $d_{ср} = 5 - 5000$ мкм, коэффициента извилистости $B = 1 - 5$, удельной поверхности $S_v = 10^3 - 10^6 \text{ м}^{-1}$, критического (структурного) числа Рейнольдса $Re_{кр} = 0,1 - 1000$ позволяют получать пористые проницаемые материалы с широким спектром физико-механических, гидродинамических, теплофизических и фильтровальных свойств.

Приведем несколько уравнений, использованных при разработке комбинированных фильтровальных систем:

— для пористых порошковых материалов, образованных сферическими частицами диаметром D [2, 11, 27, 34]:

$$d_{ср} = \frac{2 \Pi D}{3(1 - \Pi)}, \quad (3)$$

$$d_{\max} = 0,88 \Pi^{-0,27} d_{ср}, \quad (4)$$

$$S_v = \frac{6(1-\Pi)}{D} = \frac{4\Pi}{d_{cp}}, \quad (5)$$

$$k_\mu = \frac{\Pi^3 D^2}{72B^2(1-\Pi)^2} = \frac{\Pi d_{cp}^2}{32B^2}, \quad (6)$$

$$k_p = \frac{4\Pi^3 D}{3(1-\Pi)B^2} = \frac{2\Pi^2 d_{cp}}{B^2}. \quad (7)$$

– для пористых волоконных материалов из волокон цилиндрической формы диаметром D и длиной $l \approx 30D$ [2, 16]:

$$d_{cp} = \frac{\pi\Pi D}{4(1-\Pi)}, \quad (8)$$

$$d_{max} = 0,77\Pi^{-0,37} d_{cp}, \quad (9)$$

$$k_\mu = \frac{\Pi^3 D^2}{19,5B^2(1-\Pi)^2} = \frac{\Pi d_{cp}^2}{12B^2}. \quad (10)$$

В качестве структур пористых проницаемых материалов, для которых будут приведены формулы для расчета их свойств, ограничимся только порошковыми и волоконными структурами, так как все иллюстративные расчеты будут выполнены для пористых материалов с этими структурами.

Перспективным направлением в повышении эффективности очистки жидкостей является создание комбинированных систем, фильтровальные элементы которой изготовлены из различных многоструктурных материалов, что существенно расширяет эксплуатационные возможности таких систем.

4. Химический состав пористых материалов: металл, керамика, активированный уголь, цеолиты, полимеры и синтетические материалы, материалы органического происхождения (бумага, картон, хлопок, шелк). Для полной характеристики фильтровальных материалов необходимо указывать температуру их плавления или размягчения, механическую прочность, жаростойкость, термостойкость, жаропрочность, электропроводность, теплопроводность, теплоемкость, коррозионную стойкость в различных средах

(фильтрующий элемент не должен быть источником загрязнений), удельную стоимость в изделиях.

5. Конструкционные факторы фильтров: геометрические размеры фильтровального элемента (длина, ширина, толщина). Следует отметить, что такие параметры фильтровальных систем, как тонкость и степень очистки, перепад давления, производительность и ресурс работы, определяются структурными и конструктивными факторами пористого материала. Например, тонкость очистки глубинного фильтра определяется не только размерами пор фильтровального элемента, но и его толщиной; производительность процесса и ресурс работы определяются не только проницаемостью и пористостью фильтровального элемента, но и его объемом.

Анализ пяти групп факторов позволяет сделать вывод о том, что не существует оптимальных значений структурных факторов пористого проницаемого материала, а существует оптимальное соотношение структурных факторов пористого материала и конструктивных размеров фильтрующего элемента. Так как фильтровальная система в общем случае характеризуется комплексом структурных и конструктивных факторов, режимом фильтрации и механизмом фильтрования, то при создании фильтровальных систем необходимо найти оптимальное сочетание всех пяти групп факторов.

1.2. Обоснование областей применения фильтровальных элементов из пористых проницаемых материалов, получаемых методами порошковой металлургии

В данной работе рассматриваются системы, в которых активные фильтровальные элементы изготавливаются из пористых проницаемых материалов, получаемых методами порошковой металлургии. К таким материалам относятся, прежде всего, порошковые [2, 11, 15, 32, 36, 38], волокновые [4, 16, 32, 36–38], сотовые [11, 32, 36, 38], сетчатые [15, 32, 36, 38] и ячеистые [6, 11, 14, 15, 32, 34, 36, 38].

Хорошо известно, что пористые материалы, получаемые методом порошковой металлургии, производятся на основе металла и керамики, которые обладают высокой жаропрочностью, твердостью, термостойкостью. Кроме того, материалы на основе металлов обладают высокими электро- и теплопроводностью, а на основе керамики – высокой коррозионной стойкостью. Однако стоимость

их значительно превышает стоимость синтетических материалов и материалов органического происхождения (бумага, картон, хлопок, шелк), которые широко применяются для изготовления фильтровальных систем. Поэтому применение металла и керамики в качестве фильтровальных материалов для относительно «мягких» режимов эксплуатации (значения температуры биологического диапазона 20–100 °С, давления менее 100 кПа, нейтральный диапазон химической активности $pH \approx 7$) экономически невыгодно. Поэтому миллиарды фильтров для очистки моторного масла и воздуха в тракторах и автомобилях, воздуха в пылесосах и кондиционерах, большое количество фильтров для очистки жидких пищевых продуктов (молоко, пиво, вода) и лекарственных препаратов изготавливаются из бумаги, картона, полимерных волокон и пленок, активированного угля и цеолитов и нашли широкое применение в химической и пищевой промышленности, фармакологии, биологии, сельском хозяйстве.

Прежде чем приступить к разработке критерия работоспособности, предъявляемого к фильтровальным системам, необходимо обосновать выбор областей, в которых применение материалов, получаемых методом порошковой металлургии, является конкурентоспособным техническим решением.

Применение фильтровальных элементов из металла и керамики целесообразно при «экстремальных» режимах их эксплуатации: при высоких значениях температуры (200–1700 °С); давления (0,1–100 МПа); для очистки кислых ($pH \leq 6,5$) или щелочных ($pH \geq 7,5$) сред; при очистке технических жидкостей (технические масла, полимеры, глицерин, расплавы металлов), вязкость которых более 0,01 Па·с, то есть на порядок больше, чем вязкость воды (для сравнения: вязкость воды при комнатной температуре имеет значение 0,001 Па); при высокой производительности, например, $U > 5 \text{ с}^{-1}$ или $V_{\phi} > 0,1 \text{ м/с}$ и требовании высоких тонкости и степени очистки (менее 1 мкм и более 0,95).

Фильтры из металла и керамики для приведенных выше областей эксплуатации являются конкурентоспособными, и применение их рентабельно. Поэтому изготовление фильтровальных элементов для очистки расплавов полимеров при производстве химволокна и пленок, когда твердые частицы с даже самыми небольшими размерами нарушают сплошность материала, расплавов металлов и вы-

сокотемпературных сплавов в металлургии для повышения физико-механических свойств отливок, пищевых продуктов для обеспечения биологической безопасности и вкусовых качеств (например, пористые фильтры из титана и коррозионностойкой стали для очистки молока), для высокопроизводительной очистки технических масел в тех случаях, когда бумага, картон и полимерные материалы не смогут обеспечить механическую целостность и коррозионную стойкость фильтровального элемента, является целесообразным.

1.3. Разработка критериев работоспособности фильтровальных систем для очистки жидкостей в различных областях применения

Для разработки фильтровальных систем с требуемым комплексом эксплуатационных параметров предлагается новый методологический подход, заключающийся в том, что эффективным инструментом проектирования фильтровальных систем является метод, основанный на использовании динамического моделирования и многокритериальной оптимизации. Этот подход, предполагающий разработку критерия работоспособности для конкретной фильтровальной системы с последующей многокритериальной оптимизацией по конфликтующим между собой параметрам оптимизации, направлен на достижение приемлемого компромисса эксплуатационных параметров.

Общая схема этапов динамического моделирования и многокритериальной оптимизации фильтровальных систем следующая:

- А)* формулирование параметров очищаемой жидкости;
- В)* формулирование требований рынка к конечному фильтрату;
- С)* выбор и обоснование параметров оптимизации, всесторонне характеризующих функционирование фильтровальной системы, с учетом требований рынка к конечному фильтрату;
- Д)* выбор и обоснование типа фильтровальной системы для получения конечного фильтрата с требуемым комплексом эксплуатационных параметров;
- Е)* выбор физико-механических свойств пористых проницаемых материалов, конструкционных размеров фильтровальной системы параметров и гидродинамических параметров очищаемой жидкости;

F) динамическое моделирование процессов, протекающих в фильтровальных системах;

G) выбор комплекса независимых управляющих факторов, включающих структурные факторы пористых проницаемых материалов, конструкционные факторы фильтровальных элементов, гидродинамические факторы очищаемой жидкости;

H) моделирование процесса фильтрования в системе взаимонезависимых факторов (модель эксплуатации);

I) введение ограничений на область варьирования взаимонезависимых управляющих факторов, обусловленных технологическими возможностями;

J) выбор целевой функции;

K) введение функциональных ограничений на параметры оптимизации, обусловленных эксплуатационными и рыночными требованиями;

L) создание критерия работоспособности фильтровальной системы;

M) проведение многокритериальной оптимизации методами компьютерной математики.

Поясним физический и математический смысл сформулированных выше этапов создания оптимальной фильтровальной системы.

A) формулирование параметров очищаемой жидкости (параметры группы *A*).

Большое значение для создания эффективных фильтровальных систем имеет информация, включающая в себя полный перечень параметров очищаемой жидкости:

- температура T , °C;
- плотность $\rho_{ж}(T)$, кг/м³;
- вязкость $\mu_{ж}(T)$, Па·с;
- агрессивность очищаемой жидкости, рН;
- коэффициент поверхностного натяжения $\sigma_{ж}(T)$, Н/м;
- краевой угол смачивания твердых частиц загрязнений θ_p , град;
- коэффициент самодиффузии очищаемой жидкости D_f , м²/с;
- начальная объемная концентрация примесей C_1 и C_3 , м³/м³.

Перечисленные параметры группы *A*, в принципе, должны задаваться заказчиком (рынком). Но в связи с тем, что физико-

химические, физико-механические и теплофизические свойства очищаемой жидкости в значительной степени определяют выбор метода и способа очистки, то разработчик обязан принять участие в определении всего комплекса этих параметров.

В) формулирование требований рынка к конечному фильтрату (параметры группы *В*).

Еще бóльшее значение для создания эффективных фильтровальных систем имеет информация, включающая в себя полный перечень требований к конечному фильтрату. Поэтому этап *В* предлагаемой теории создания оптимальных фильтровальных систем связан с проведением научных исследований, направленных на количественную формулировку требований рынка к конечному фильтрату:

- тонкость очистки a , м;
- степень очистки $\psi = 1 - \gamma$;
- производительность процесса Q , м³/с.

Формулирование параметров группы *В*, по сравнению с параметрами группы *А*, требует дорогостоящих исследований. Чтобы дать четкий ответ на вопросы, что такое хорошая питьевая вода, хорошее молоко, хорошая техническая вода, хорошее моторное масло, необходимо провести научные исследования, не связанные с теорией создания фильтровальных систем. Ответы на эти вопросы требуют фундаментальных исследований, направленных на обоснование требуемого комплекса параметров конечного фильтрата, который при его дальнейшей эксплуатации будет определять эффективность функционирования дорогостоящего оборудования или качество жизни человека. Для определения требуемого комплекса параметров требуется глубокое понимание механизмов взаимодействия конечного фильтрата с механическими, гидродинамическими, термодинамическими и биологическими системами. К сожалению, на многие подобные вопросы исчерпывающие ответы в научно-технической литературе отсутствуют.

Для доказательства приведенных утверждений проиллюстрируем эту проблему на примере подготовки питьевой воды. Очевидно, что вода из открытых водоемов непригодна для потребления ее человеком, в том числе из-за микробного и вирусного загрязнения.

Также очевидно, что «сверхчистая» вода – дистиллированная, в

которой отсутствуют любые механические, химические и биологические объекты, также непригодна для тех же целей. Хорошо известно, например, что недостаток в воде ионов железа вызывает у человека анемию, а их избыток увеличивает вероятность онкологических заболеваний, и сказанное относится ко всем элементам периодической системы. Особое внимание следует обратить на правильное обоснование концентрации щелочных элементов (натрий, калий, магний, кальций), тяжелых элементов (ртуть, свинец, кадмий), допустимой величины радиоактивности, концентрации нитратов, антибиотиков, органолептических соединений и хлорорганики. Определение оптимальной концентрации перечисленных веществ – задача молекулярной биологии и генетики, и связана она с глубоким пониманием «функционирования» биологического объекта – человек.

Очевидно, что к воде для технических нужд предъявляются совсем другие требования. Например, вода, которая циркулирует в теплотехнических системах, не должна содержать элементы, образующие накипь. Такая вода должна иметь определенное значение рН, чтобы не вызывать коррозию труб, котлов и другого дорогостоящего оборудования. Идеальной технической водой для этих целей является дистиллированная вода, но получение ее путем дистилляции природной пресной или морской воды недопустимо дорого, так как процесс испарения связан с большими энергозатратами (испарение воды – фазовый переход 1-го рода).

Аналогичные проблемы возникают при получении молока высокого качества (концентрация соматических клеток, кисломолочных бактерий, тяжелых элементов и антибиотиков, радиоактивность, жирность, содержание белков и углеводов). Кроме того, требования к молочному сырью для производства детского питания, приготовления твердых сортов сыра высокого качества с высоким содержанием протеина и низким содержанием углеводов, кисломолочных продуктов, сухого молока существенно различаются.

Специфическая особенность очистки технического масла заключается в том, что при тонкости очистки 8 мкм следует «пропускать» частицы диаметром, например, 4–5 мкм, причем в достаточном количестве, необходимые для приработки поверхностей сопрягаемых деталей.

При формировании параметров исходной жидкости и требований к конечному фильтрату необходимо понимать, что рынок, даже если

он формулирует параметры исходной жидкости и требования к качеству конечного фильтрата (B) в полном объеме и с высокой точностью, не предлагает технического решения, с помощью которого можно получить конечный фильтрат. Обычно в этом случае заказчик для исполнителя формулирует задачу в общем виде: сделайте, что хотите, но обеспечьте получение конечного фильтрата при соблюдении параметров группы A и B .

Суммируя сказанное, можно утверждать, что формулирование параметров группы A и B , которое должно предшествовать разработке фильтровальной системы, – совместная задача заказчика и разработчика. Возлагать ее только на заказчика нецелесообразно, так как заказчик, являясь потребителем очищенной продукции, может не обладать соответствующими знаниями и исследовательским оборудованием и потому не сможет корректно сформулировать полный перечень параметров группы A и B , количественная информация о которых необходима для обоснованного выбора метода и способа очистки.

С) выбор и обоснование параметров оптимизации, всесторонне характеризующих функционирование фильтровальной системы, с учетом требований рынка к конечному фильтрату (параметры группы C).

Этот шаг прикладных исследований известен как разработка технического задания. Необходимо сформировать комплекс параметров оптимизации, описывающих функционирование технических систем. Фильтровальная система является сложной системой. Математически это означает, что полный комплекс параметров оптимизации носит конфликтующий характер. Поэтому для всестороннего описания закономерностей функционирования фильтровальной системы необходимо выбрать параметры оптимизации, которые отражают различные стороны процесса очистки, и к таким параметрам оптимизации можно отнести следующие:

- производительность процесса очистки Q_{ϕ} , $\text{м}^3/\text{с}$;
- удельная производительность процесса очистки U , с^{-1} ;
- тонкость очистки a , м ;
- степень очистки ψ ;
- ресурс работы фильтровальной системы R , с ;

– удельные эксплуатационные затраты s , у. ед./м³. (В данной работе этот параметр равен отношению стоимости фильтровальной системы к объему конечного фильтрата, полученного за время, равное ресурсу работы системы.)

D) выбор и обоснование типа фильтровальной системы для получения конечного фильтрата с требуемым комплексом эксплуатационных параметров.

Это – важнейший этап предлагаемой теории проектирования фильтровальных систем, тем более что он является неформализованным этапом. Выбор технического решения – неформализованный шаг предлагаемой методологии и реализуется на основе знаний, опыта, интуиции разработчика и наличия научной гипотезы, которая направлена на улучшение параметров фильтровальной системы. В данной работе научная гипотеза заключается в том, что, во-первых, эффективные фильтровальные системы для очистки жидкости от твердых частиц загрязнений должны быть комбинированными и состоять из чередующихся мембранных и глубинных фильтровальных элементов; во-вторых, необходима разработка критерия работоспособности конкретной фильтровальной системы на базе системного моделирования всех этапов ее создания с обязательным включением требований «рынка» в систему «наука»; в-третьих, получение приемлемого компромисса конфликтующих параметров может быть достигнуто методом многокритериальной оптимизации.

В данной работе предложен метод очистки, основанной на фильтровании очищаемой жидкости через комбинированные системы, состоящие из «тонкого» мембранного фильтровального элемента, задерживающего частицы загрязнений диаметром больше максимального размера пор мембраны, и «толстого» глубинного фильтровального элемента, средний размер пор которого на порядок больше требуемой тонкости очистки. Такая конструкция фильтровальных систем позволит добиться высокой тонкости очистки при «высокой» производительности процесса очистки и «низком» перепаде давления на фильтровальной системе. Термины «тонкий», «толстый», «большой», «низкий» включают в себе неопределенную количественную информацию, поэтому будут рассмотрены количественно и в сравнительном аспекте.

Е) выбор физико-механических свойств пористых проницаемых материалов, конструкционных размеров фильтровальной системы параметров и гидродинамических параметров очищаемой жидкости (параметры группы *Е*).

На данном этапе необходимо выбрать структурные параметры пористого материала, которые совместно с конструкционными размерами фильтровальной системы и гидродинамическими параметрами, характеризующими поток очищаемой жидкости, обеспечивают получение конечного фильтрата с параметрами группы *В*. Для пористых проницаемых материалов типичны следующие параметры: структурные свойства (пористость, размеры пор, удельная поверхность, коэффициент извилистости); гидродинамические (вязкостный и инерционный коэффициенты проницаемости, критические числа Рейнольдса); фильтровальные свойства (степень и тонкость очистки, гранулометрическое распределение частиц загрязнений в конечном фильтрате); конструкционные размеры фильтровальных элементов (фронтальная площадь и толщина элемента); гидродинамические параметры процесса фильтрации (скорость фильтрации).

На этом этапе все перечисленные структурные и конструкционные параметры не должны содержать количественные требования, так как их определение является предметом многокритериальной оптимизации. Следует отметить, что выбранная система параметров является частично зависимой. Например, вязкостный и инерционный коэффициенты проницаемости зависят от пористости материала, коэффициента извилистости и размера пор (см. уравнения (3)–(10)).

Г) динамическое моделирование процессов, протекающих в фильтровальных системах $C = C(A, B, E)$.

Динамическое моделирование отличается от стационарного тем, что его объектом является техническая система, структурные и габаритные параметры в процессе эксплуатации изменяются со временем (образование кейк-слоя на мембранном фильтре и осаждение частиц загрязнений в объеме глубинного фильтра). Результатом динамического моделирования является система уравнений, представляющая собой зависимость параметров оптимизации (эксплуатационные параметры) от физико-механических свойств пористых проницаемых материалов фильтровальных

элементов, габаритных размеров, от параметров, определяющих режим фильтрации очищаемой жидкости.

Этот этап является наиболее важным в теории проектирования оптимальных фильтровальных систем, так как позволяет включить требования рынка в систему научных исследований. В области пористых проницаемых материалов разработано большое количество стационарных моделей, описывающих происходящие в процессе их эксплуатации фильтрацию, фильтрование, инфильтрацию, уплотнение [2–6, 8, 11, 14–16, 26–29, 32, 35, 36, 38]. Функционирование фильтровальных систем характеризуется одновременным протеканием в них процессов различной природы, поэтому под моделью функционирования фильтровальных систем будем понимать совокупность математических уравнений, которые позволяют оценить работоспособность фильтровальной системы.

Математически модель эксплуатации фильтровальной системы представляет собой систему уравнений, описывающих взаимосвязь параметров оптимизации (группа C) и параметров групп (A, B, E) , $C = C(A, B, E)$, например, $V_{\text{ф}}(t) = V_{\text{ф}}(\Pi, B, d_{\text{ср}}, \mu_{\text{ж}}, \rho_{\text{ж}}, H, C, \Delta P, t)$.

В общем виде модель эксплуатации, построенная в виде системы уравнений $C = C(A, B, E)$, уже сама по себе позволяет решить ряд практически полезных задач. Во-первых, варьируя параметрами пористых материалов, конструктивными размерами фильтрующей системы, а также параметром, определяющим режим фильтрации очищаемой жидкости (параметры группы E), можно выявить основные закономерности функционирования фильтровальной системы. Такой анализ, выполненный с использованием средств компьютерной математики, представляет собой компьютерный аналог натуральных испытаний, отличающийся от реальных натуральных испытаний практически нулевыми материальными, энергетическими и временными затратами. Гарантия совпадения результатов, полученных при натуральных испытаниях и в теоретических расчетах, заключается в адекватности уравнений, включенных в модель эксплуатации. Повторяя компьютерный эксперимент многократно, исследователь получает возможность выбора предпочтительного варианта за относительно небольшое время.

Однако наибольшее значение для практики представляет решение обратной задачи, когда по заданным параметрам оптимизации

группы (C) и параметрам групп (A, B) требуется рассчитать параметры группы (E) $\rightarrow E = E(A, B, C)$.

Прежде всего, отметим известное в математике положение: не для каждой прямой задачи существует решение обратной. Отсутствие решения обратной задачи указывает на то, что либо выбранная модель эксплуатации не отражает закономерность процессов, происходящих при эксплуатации изучаемой фильтровальной системы, либо в данном техническом решении не может быть реализован заданный комплекс эксплуатационных параметров. В первом случае необходимо проверить полученную модель на адекватность, во втором – откорректировать предъявляемый комплекс эксплуатационных параметров.

Если решение обратной задачи существует, то возможны 2 варианта: конечное или бесконечное множество решений. В обоих случаях необходимо разработать алгоритм отбора, который позволит выбрать приемлемый комплекс параметров оптимизации из огромного множества решений $E = E(A, B, C)$. Однако такой алгоритм обладает концептуальным недостатком, заключающимся в том, что рассчитанные параметры группы (E) могут дать технологически нереализуемую комбинацию. Причина математической некорректности обратной модели $E = E(A, B, C)$, снижающей ее практическую ценность, заключается в том, что модель построена в системе частично или полностью взаимозависимых параметров группы (E). Для устранения этого недостатка моделирование процессов фильтрования следует проводить в системе взаимонезависимых факторов, однозначно характеризующих свойства пористого проницаемого материала и конструкционные размеры системы.

G) выбор комплекса независимых управляющих факторов, включающих структурные факторы пористых проницаемых материалов, конструкционные факторы фильтровальных элементов, гидродинамические факторы очищаемой жидкости (параметры группы G).

Реализуемая комбинация параметров группы (E) при решении обратной задачи может быть достигнута только в том случае, если сами они будут построены в системе взаимонезависимых факторов. Например, для пористых материалов независимой системой факторов являются: диаметр сферических частиц, из которых изготовлен тот или иной фильтровальный элемент, его толщина и величина

фронтальной площади, а также фактор, предопределяющий режим фильтрации очищаемой жидкости – перепад давления на фильтровальном элементе.

Задав количественные значения этих факторов и сделав предположения насчет количественного изменения пористости и коэффициента извилистости со временем, например, $\Pi = \Pi_1 = \text{const}$, $B = B_1 = \text{const}$, а также задав параметры потока очищаемой жидкости (плотность, вязкость, коэффициент самодиффузии, перепад давления), можно однозначно рассчитать средний диаметр пор, коэффициенты проницаемости, скорость фильтрования, ресурс работы, степень и тонкость очистки. Система факторов, характеризующих структуру пористых проницаемых материалов, дополненная конструктивными размерами фильтровальной системы, является взаимонезависимой – факторы группы (G). Модели структур пористых проницаемых материалов всех пяти классов $E = E(G)$ (порошковые, волокновые, сетчатые, сотовые, ячеистые) хорошо изучены, однако в этой работе для динамического моделирования и многокритериальной оптимизации в качестве примеров для иллюстрации полученных результатов для фильтровальных систем будут использованы только порошковые и волокновые пористые материалы [2, 4, 11, 16, 32, 34, 36].

Н) моделирование процесса фильтрования в системе взаимонезависимых факторов (модель эксплуатации) $C = C(A, B, G)$.

Наличие аналитических зависимостей физико-механических свойств от структурных факторов пористых проницаемых материалов $E = E(G)$ позволяет создать модель эксплуатации фильтровальной системы в системе взаимонезависимых факторов. Математически это выражается таким образом: $C = C(A, B, E(G)) = C(A, B, G)$. Такая модель, сформулированная в системе взаимонезависимых факторов группы (G), лишена недостатка, свойственного модели эксплуатации, сформулированной в системе взаимозависимых параметров группы (E). В частности, модель $C = F(A, B, G)$ позволяет найти решение обратной задачи, причем любое найденное решение может быть реализовано технологически. Но при этом возможны случаи, когда полученные значения факторов могут выйти за пределы технологических возможностей. Поэтому очередной этап теории проектирования фильтровальных систем связан с введением ограничений на область варьирования независимых факторов группы (G).

Л) введение ограничений на область варьирования взаимонезависимых управляющих факторов, обусловленных технологическими возможностями.

Ограничения, накладываемые на структурные и конструкционные факторы фильтровальных систем, могут определяться областями применения фильтровальных систем (ограничения на высоту системы), технологией изготовления изделия (диаметр сферических частиц не может быть меньше 40 мкм). Математически область допустимых значений взаимонезависимых факторов группы (G) можно записать следующим образом: $G_{\min} \leq G \leq G_{\max}$. Это означает, что оптимальную фильтрующую систему следует выбирать в технологически допустимой области факторного пространства.

Ж) выбор целевой функции.

Полученная модель эксплуатации фильтрующей системы $C = F(A, B, G)$ при технологических факторных ограничениях $F_{\min} \leq F \leq F_{\max}$ также может иметь бесконечное множество решений. Поэтому для создания оптимального варианта фильтрующей системы необходимо ввести критерий отбора – целевую функцию. Математически целевая функция должна быть представлена в виде $J(A, B, G) \rightarrow \max$ или $J(A, B, G) \rightarrow \min$. Следует обратить внимание, что аналитическое выражение целевой функции должно быть написано в системе взаимонезависимых факторов группы (G).

В качестве целевой функции может выступить любой параметр оптимизации (группа параметров C), но, как правило, целевая функция отражает главное рыночное требование – минимально возможную себестоимость продукта. В качестве целевой функции может выступить физический аналог экономического критерия: минимальная масса или минимальный объем фильтрующей системы, максимально высокая производительность процесса и т. п. Однако следует отметить, что существуют исследования, в которых стоимость продукта отходит на второй план, а на первое место ставится другой, более важный параметр оптимизации: достаточно жесткое требование по тонкости очистки, если оно является, например, наиважнейшим требованием при разработке фильтрующей системы для медицинских исследований.

Описанный метод поиска оптимального решения таким способом имеет один недостаток: полученный в результате однокритериальной оптимизации комплекс управляющих факторов $G_{\text{опт}}$ позволяет в дальнейшем рассчитать значения всех параметров оптимизации $C = C(G_{\text{опт}})$. И может возникнуть ситуация, при которой один из

параметров оптимизации окажется меньше или больше того значения, которое хотелось бы получить заказчику. Например, если в качестве целевой функции было выбрано условие максимальной производительности процесса очистки (что и было согласовано с заказчиком), но при этом получилось, что толщина очистки оказалась равной 10 мкм, а такой вариант заказчика не устраивает. Он готов согласиться с некоторым уменьшением производительности процесса, но при условии, что толщина очистки будет 8 мкм. Это типичный недостаток, свойственный однокритериальной оптимизации.

Поэтому для реализации многокритериальной оптимизации необходимо, чтобы на комплекс параметров оптимизации (группа параметров C) были наложены функциональные ограничения, обусловленные рыночными и эксплуатационными требованиями (требованиями заказчика).

К) введение функциональных ограничений на параметры оптимизации, обусловленные эксплуатационными и рыночными требованиями.

Эффективное функционирование фильтрующей системы, как правило, связано с реализацией приемлемого комплекса конфликтующих между собой параметров оптимизации. Например, требования высокой производительности и одновременно высокой тонкости и степени очистки несовместимы. Поэтому для нахождения компромиссного решения путем многокритериальной оптимизации на параметры оптимизации (C), оставшиеся после выбора целевой функции, накладываются функциональные ограничения. В общем виде эксплуатационные требования вводятся неравенствами следующего типа: $C_{\min} \leq C \leq C_{\max}$. Целевая функция и система параметров оптимизации, после наложения на последнюю функциональных ограничений, позволяют ввести требования «рынка» в систему «наука».

Л) создание критерия работоспособности фильтровальной системы.

Следует отметить, что до сих пор, при решении большого числа задач, связанных с оптимизацией технических систем, критерии оптимизации были основаны на эмпирическом опыте и интуиции исследователей, так как создание критерия совершенства технических систем внутри системы «наука» концептуально невозможно. В условиях рыночной экономики критерий функционального совершенства фильтровальных систем может быть создан только на основе требуемого рынком комплекса эксплуатационных параметров.

В дальнейшем систему математических уравнений, представляющих собой модель эксплуатации фильтровальной системы, и

неравенств, включающих параметры оптимизации, факторные технологические ограничения, функциональные ограничения на параметры оптимизации и целевую функцию, будем называть критерием работоспособности данной фильтровальной системы, которая математически имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = C[A, B, G], \\ G_{\min} \leq F \leq G_{\max}, \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max}, \\ J(A, B, G) \rightarrow \min \wedge \max. \end{array} \right. \quad (11)$$

Название системы математических уравнений и неравенств (11) – критерий работоспособности – обусловлено тем, что именно такая совокупность уравнений и неравенств определяет функционирование конкретной фильтровальной системы. Любое незначительное изменение хотя бы одного из уравнений или неравенств (11), даже при той же целевой функции, дает другое решение, следовательно, будет описывать функционирование системы, отличающейся от подобных.

М) проведение многокритериальной оптимизации методами компьютерной математики.

Методами компьютерной математики (*Microsoft Excel* или *Mathcad* [8, 9]) критерий работоспособности позволяет найти оптимальное решение обратной задачи и из большого множества возможных решений выбрать наилучший вариант, рассчитав сначала оптимальный комплекс факторов группы (G) (структурные факторы пористых материалов, конструкционных размеры фильтровальной системы и гидродинамический фактор, характеризующий движение потока очищаемой жидкости), а потом – приемлемый комплекс параметров оптимизации фильтровальной системы $C_{\text{опт}}$. В этом случае система параметров группы $C_{\text{опт}}$, рассчитанная в системе взаимонезависимых факторов группы (G), всегда будет функционально непротиворечивой и технологически реализуемой.

Отметим принципиальную новизну разработанного метода (метод многофакторного моделирования и многокритериальной оптимизации), направленного на проектирование фильтровальных систем с приемлемым комплексом эксплуатационных параметров.

1. Критерий работоспособности фильтровальной системы, построенный на основе моделирования физических явлений, происходящих в процессе эксплуатации фильтровальных систем, наряду с мощной прогнозирующей функцией, позволяет найти оптимальный комплекс структурных и конструкционных факторов, обеспечивающих построение фильтровальной системы с приемлемым комплексом эксплуатационных параметров. Адекватный критерий работоспособности выполняет ключевую методологическую роль в проектировании оптимальных изделий, так как он обеспечивает включение требований «рынка» в систему «наука».

2. Моделирование процессов, происходящих в процессе эксплуатации фильтрующей системы, – основное звено критерия работоспособности. Неудачи при внедрении новых разработок зачастую определяются отсутствием адекватной модели эксплуатации. Разработка моделей эксплуатации – одна из сложнейших проблем в науке, требующая глубокого изучения процессов, происходящих, например, в фильтровальных системах. Модель эксплуатации – отражение объективных закономерностей функционирования фильтрующей системы.

3. Новый методологический подход предполагает разработку комбинированных систем очистки, состоящих из фильтров, различающихся структурными и конструкционными факторами, работающих по различным механизмам фильтрования и режимам фильтрации. Специфика фильтровальных систем заключается в том, что она описывается комплексом конфликтующих между собой параметров оптимизации. Поэтому добиться требований: минимальный перепад давления, максимальные производительность и ресурс работы, минимальный объем системы, 100%-я степень очистки при тонкости очистки 0,01 мкм одновременно, – концептуально невозможно. Компромиссное решение может быть найдено в результате многокритериальной оптимизации, в которой желаемые требования к параметрам оптимизации реализуются в виде функциональных ограничений.

4. Таким образом, если заданы теплофизические параметры очищаемой жидкости ($(\eta_{ж}, \rho_{ж}, D_f)$), то, варьируя структурными факторами и размерами фильтровальных элементов, а также гидродинамическим фактором процесса фильтрации ($(D, H, C, S, \Delta P)$), можно создать комбинированный фильтр, включающий в себя мембранные и глубинные фильтровальные элементы, способные обеспечить получение конечного фильтрата с приемлемым компромиссом степени и тонкости очистки, производительности, ресурса работы и удельной стоимости эксплуатации.

Отличительной чертой предлагаемой методологии является вовлечение в создание фильтровальных систем внешних, по отношению к науке, категорий рынка, поскольку выработка критерия коммерчески выгодного решения внутри системы «наука» принципиально невозможна. Отметим, что методологический подход, основанный на разработке пористых проницаемых материалов с «заданным комплексом физико-механических свойств» не позволяет создавать эффективные фильтровальные системы по трем причинам: во-первых, что значит, «заданный комплекс физико-механических свойств пористого материала»? кем и для какой цели он задан, и каким образом «заданный комплекс физико-механических свойств материала» обеспечит приемлемый комплекс конфликтующих между собой эксплуатационных параметров; во-вторых, материалы сами по себе «не работают» – «работают» изделия из них. Работоспособность изделий предопределяется не только структурными факторами пористого материала, но и его конструктивными факторами, так как они также определяют и силовую нагрузку на фильтр, и скорость фильтрации, и механизм фильтрования; в-третьих, в системе «наука» невозможно выработать критерий «технического совершенства» фильтрующей системы, тем более материала, из которого она изготовлена. Созданная в системе «наука» модель эксплуатации технической системы позволяет прогнозировать состояние этой системы при любом наборе факторов. На вопрос: какое состояние из бесконечного числа состояний является наилучшим, сама наука дать ответа не может. Критерий наилучшего состояния системы определяется требованиями рынка. Для создания критерия, позволяющего оценить интеллектуальное совершенство технической системы, на модель, описывающую ее функционирование и созданную внутри системы «наука», накладываются требования, выработанные вне системы «наука». Например, какое требование является более важным – максимальная производительность или максимально возможная тонкость очистки? Однозначного ответа не может быть, так как он зависит от того, что важнее в данный момент для заказчика (рынка). Задача создания эффективных фильтровальных систем в значительной мере осложняется тем, что к фильтрующей системе предъявляется комплекс конфликтующих между собой требований, которые можно удовлетворить только путем нахождения приемлемого компромисса. Эффективным инструментом нахождения такого компромисса является метод многокритериальной оптимизации, который позволяет одновременную оптимизацию по нескольким конфликтующим между собой параметрам оптимизации.

ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПОВЕРХНОСТНЫМ МЕХАНИЗМОМ ФИЛЬТРОВАНИЯ

2.1. Общие сведения о поверхностном механизме фильтрования

Разработка процесса фильтрования жидкостей является прикладной задачей, успех решения которой зависит от того, насколько «удачно» выбрана, спроектирована и изготовлена фильтровальная система. Следует отметить, что понятия «идеальной» фильтровальной системы не существует в принципе. Термин «идеальная» имеет смысл только при решении конкретной задачи в результате многокритериальной оптимизации, которая включает в себя требования рынка. Следует акцентировать внимание на то, что целевая функция, во-первых, в принципе не может быть выработана в системе «наука», и, во-вторых, целевая функция, сколь корректно она ни была бы сформулирована, не содержит в себе даже намека на то, какое техническое решение следует использовать при выполнении поставленной задачи.

Данная монография описывает разработку фильтровальных систем для очистки жидкостей на базе пористых проницаемых материалов, получаемых методами порошковой металлургии. Ранее было обосновано, что применение фильтров, изготовленных из металла и керамики, рентабельно в экстремальных условиях эксплуатации: высокие значения температуры, большие механические нагрузки, высокая коррозионная стойкость, высокая вязкость фильтрата, высокие тонкость и степень очистки.

Основная задача при разработке фильтровальных систем заключается в формулировании полного комплекса параметров оптимизации, которые всесторонне характеризуют функционирование системы. В связи с тем, что между параметрами оптимизации существует конфликт в тенденциях изменения, необходимо, чтобы в этом комплексе присутствовали параметры, отражающие разные стороны функционирования фильтровальной системы.

Для мембранного фильтрующего элемента в качестве параметров оптимизации следует взять: скорость фильтрации (или

производительность процесса очистки $Q(t)$ ($\text{м}^3/\text{с}$), тонкость очистки a (м), степень очистки ψ , ресурс работы R . Что касается тонкости очистки a , то в фильтрующей системе с мембранным механизмом фильтрации этот параметр однозначно определяется уравнением

$$a = d_{\max 2} \cdot \quad (12)$$

Характер эксплуатации фильтров с мембранным механизмом фильтрации в силу выполняемого уравнения (12) гарантирует, что на выходе из него в принципе не будет частиц загрязнений, размеры которых будут превышать $d_{\max 2}$.

Параметр – степень очистки – $\psi(d)$ зависит от количества частиц загрязнений, прошедших сквозь фильтрующую систему:

$$\psi(d) = [C_1 - C(d)] / C_1 \cdot \quad (13)$$

Так как конечная цель исследований заключается в разработке комбинированной фильтровальной системы, которая является одним из вариантов достижения компромисса между производительностью, ресурсом работы, тонкостью и степенью очистки, то разработка комбинированных систем начинается с изучения фильтровальных систем с поверхностным механизмом фильтрации (мембраны).

Расчет гидродинамических параметров мембран в начальный период фильтрации, когда толщина кейк-слоя относительно небольшая, осуществляется по уравнениям [2, 4, 14]:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{вх}} + \Delta P_{\text{кап}} + \Delta P_{\mu} + \Delta P_{\rho} + \Delta P_{\text{вых}}, \quad (14)$$

$$\Delta P_{\text{вх}} = \frac{1,16 \rho_{\text{ж}} B_2^2 V_{\text{ф}}^2}{2 \Pi_2^2}, \quad (15)$$

$$\Delta P_{\text{кап}} = \frac{4 \sigma_{\text{ж}}}{d_{\text{ср}2}}, \quad (16)$$

$$\Delta P_{\mu} + \Delta P_{\rho} = \frac{\mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}} H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ф}}^2 H_2}{k_{\rho 1}}, \quad (17)$$

$$\Delta P_{\text{вых}} = \frac{(1 - B_2 \Pi_2)^2 \rho_{\text{ж}} B_2^2 V_{\text{ф}}^2}{2 \Pi_2^2}, \quad (18)$$

$$\Delta P_2 = \left(\frac{\mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}} H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ф}}^2 H_2}{k_{p 2}} \right) + \frac{4 \sigma_{\text{ж}} \cos \theta_p}{d_{\text{ср} 2}} + [1,16 + (1 - B_2 \Pi_2)^2] \frac{\rho_{\text{ж}} B_2^2 V_{\text{ф}}^2}{2 \Pi_2^2}. \quad (19)$$

Толщина фильтра H_2 , следовательно, и его структура, в этом случае не оказывают никакого влияния на тонкость очистки. Поэтому из экономических соображений, для уменьшения гидравлических потерь, толщину мембран уменьшают до возможного минимума. Снижение механической прочности мембраны в данном случае не критично, так как этот недостаток устраняется достаточно просто: мембрана накладывается на прочную металлическую сетку с относительно большими размерами пор. Сетка берет на себя силовую нагрузку, но при этом не участвует в процессе фильтрации.

Уравнение (19) является наиболее общим для расчета перепада давления на мембранном фильтре при фильтрации через него жидкости. В этом уравнении учтены все пять составляющих: перепад давления, обусловленный вязкостью жидкости и ее инерцией, капиллярным давлением, входным и выходным сопротивлением.

Анализируя мембранный механизм фильтрации, можно, казалось бы, сделать вывод о том, что проблема очистки широкого спектра жидкостей решается достаточно просто: если требуется тонкость очистки a , то необходимо изготовить мембрану с размером пор $d_{\text{max}} = a$. Однако технологически выполнить это условие на практике для получения конечного фильтрата с высокой тонкостью и с относительно высокой скоростью фильтрации практически невозможно.

Для принятия решения о применении мембраны для очистки жидкости следует помнить, что на практике существуют ограничения, не позволяющие использовать мембранный фильтр. К таким ограничениям, прежде всего, относится ограничение по давлению, которое можно приложить к фильтровальному элементу. Дело в том, что большое число процессов очистки происходят самотеком за счет сил тяжести (очистка воды, очистка расплавов металлов), и тогда гидростатического давления не хватает даже на преодоление

капиллярного давления. С другой стороны, если необходимо повысить производительность процесса и одновременно с этим повысить тонкость очистки, а вязкость фильтрата на 1–2 порядка превосходит вязкость воды, то перепад давления на фильтре достигает величины, не реализуемой на практике.

Проиллюстрируем этот вывод на примере мембранного фильтровального элемента для очистки моторного масла [16]. Исходные данные для расчета: $\Pi_2 = 0,4$; $B_2 = 1,1$; $d_{cp2} = 0,1-100$ мкм; $T = 100$ °С; $\eta_{ж} = 0,0119$ Па·с $\rho_{ж} = 851$ кг/м³; $\sigma_{ж} = 0,045$ Н/м; $V_{ф2} = 0,01$ м/с; $H_2 = 0,001$ м. Для воды $T = 20$ °С; $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³; $\eta_{ж} = 0,001$ Па·с; $\sigma_{ж} = 0,072$ Н/м.

Результаты расчета перепада давления для очистки воды и моторного масла в зависимости от тонкости очистки приведены в табл. 1 (см. уравнение (19)).

Таблица 1

Перепад давления на фильтрах из ППМ

Размер пор d_{cp2} , мкм	Перепад давления, Па	
	Вода, 20 °С	Моторное масло, 100 °С
0,100	$1,0 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^9$
0,316	$1,1 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^8$
1,00	$1,3 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^7$
3,16	$1,9 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$
10,0	$3,9 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^5$
15,0	$2,4 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$
31,6	$1,0 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$
100	$3,0 \cdot 10^3$	$3,0 \cdot 10^3$

Из данных табл. 1 следует, что если тонкость очистки $a \approx 1$ мкм, то для очистки воды потребуется давление $1,6 \cdot 10^6$ Па, моторного масла – $1,6 \cdot 10^7$ Па. Очевидно, что на практике реализовать это достаточно трудно. Если существует ограничение по давлению, например, не более 10^5 Па, то для очистки моторного масла при температуре 100 °С можно использовать мембранные фильтровальные элементы, при условии, что их средний размер пор превышает 15 мкм.

Поэтому фильтровальные элементы мембранного типа целесообразно применять для грубой очистки жидкостей, причем тонкость очистки не должна быть больше 15 мкм. Для более тонкой очистки жидкости следует применять элементы с глубинным механизмом фильтрования.

Анализ уравнения (19) показывает, что $\Delta P_{\text{кап}}$ следует учитывать, если средний размер пор меньше 100 мкм, так как $\Delta P_{\text{кап}}(100 \text{ мкм}) = 1,8 \text{ кПа}$, $\Delta P_{\text{кап}}(10 \text{ мкм}) = 18 \text{ кПа}$, $\Delta P_{\text{кап}}(1 \text{ мкм}) = 180 \text{ кПа}$.

Входное и выходное сопротивление, которое не зависит от среднего размера пор, а зависит только от скорости фильтрата и пористости структуры, следует учитывать при скорости фильтрации более 1 м/с, так как $\Delta P_{\text{вх+вых}}(3 \text{ м/с}) = 56 \text{ кПа}$, $\Delta P_{\text{вх+вых}}(10 \text{ м/с}) = 625 \text{ кПа}$.

Что касается перепадов давлений ΔP_{μ} и ΔP_p , то равенство $\Delta P_{\mu} = \Delta P_p$ (с учетом уравнений (7) и (8))

$$\frac{\mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}} H_2}{k_{\mu 2}} = \frac{\rho_{\text{ж}} V_{\text{ф}}^2 H_2}{k_{p 2}} \quad (20)$$

приводит к соотношению

$$V_{\text{ф}} = \frac{64 \Pi_2 \mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} d_{\text{ср} 2}}, \quad (21)$$

$$V_{\text{п}} = \frac{V_{\text{ф}}}{\Pi_2} = \frac{64 \mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} d_{\text{ср} 2}}. \quad (22)$$

Уравнение (22) можно записать в критериальной форме:

$$\text{Re}_{\text{кр} 1} = \frac{\rho_{\text{ж}} d_{\text{ср} 2} V_{\text{п} 2}}{\mu_{\text{ж}}} = \frac{\rho_{\text{ж}} d_{\text{ср} 2} V_{\text{ф} 2}}{\Pi_2 \mu_{\text{ж}}} = 64. \quad (23)$$

Поэтому, если процесс фильтрации происходит в пористых порошковых материалах при $\text{Re} \ll \text{Re}_{\text{кр} 1}$, то это означает, что режим фильтрации – ламинарный, и поэтому инерцией жидкости можно пренебречь. Если $\text{Re} \gg \text{Re}_{\text{кр} 1}$, то режим фильтрации турбулентный, и инерционной составляющей фильтрата пренебрегать нельзя. В

табл. 2 приведены несколько примеров фильтрации через пористые среды. Выводы, которые можно сделать после анализа данных табл. 2, очевидны: режим фильтрации моторных масел – ламинарный; фильтрация воды через пористые среды с указанными параметрами проходит при переходном режиме, и пренебрегать инерционной составляющей жидкости некорректно; а вот для расплавов металлов, в силу относительно большой плотности и относительно больших размеров пор ячеистых материалов, образующийся поток носит турбулентный характер, и инерцией потока жидкости пренебречь нельзя.

Таблица 2

Свойства и режимы фильтрации в фильтрах из пористых материалов

Вещество, °С	Фильтр	Физические характеристики					
		$\rho_{ж}$, кг/м ³	P_2	$\mu_{ж}$, Па·с	$d_{ср2}$, мкм	$V_{\phi 2}$, м/с	Re
Вода, 20	ППМ	1000	0,40	0,0010	300	0,05	38
Мотор. масло, 100	ПВМ	851	0,40	0,0119	200	0,05	3
Чугун, 1350	ВПЯМ	7000	0,80	0,0060	2500	0,05	182

2.2. Динамическое моделирование процесса фильтрования с учетом образующегося кейк-слоя

Если на фронтальной поверхности мембранного фильтра образуется осадок из частиц загрязнений (кейк-слой), то этот осадок начинает выполнять функцию дополнительного фильтровального элемента.

В начальный момент процесса фильтрования, пока образование поверхностного слоя из частиц загрязнений еще не началось, падение давления происходит только на самом мембранном фильтре. Так как его поры обычно малы и скорость фильтрации невысока, то обеспечивается режим ламинарного течения. В этом случае применимо уравнение Дарси, которое связывает линейную скорость фильтрации $V_{\phi 2}(0)$, коэффициент динамической вязкости жидкости $\mu_{ж}$, проходящей через фильтровальный элемент толщиной H_2 с перепадом давления ΔP_2 [2]:

$$\Delta P_2 = \mu_{\text{ж}} V_{\phi 2}(0) \frac{H_2}{k_{\mu 2}}. \quad (24)$$

В случае фильтрования с образованием и ростом кейк-слоя перепад давления ΔP_2 можно представить в следующем виде [12]:

$$\Delta P_2 = \mu_{\text{ж}} V_{\phi 12}(t) \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_1(t)}{k_{\mu 1}} \right). \quad (25)$$

Уравнение (25) является основным уравнением фильтрования и показывает зависимость скорости фильтрации от увеличивающейся толщины кейк-слоя $H_1(t)$ при постоянном перепаде давления, толщины элемента и вязкостного коэффициента проницаемости мембраны ΔP_2 , H_2 , $k_{\mu 2}$.

Рассмотрим задачу фильтрования жидкости, содержащей твердые частицы загрязнений, с образованием кейк-слоя на фронтальной поверхности мембраны. Предположим, что на фронтальную поверхность фильтровального элемента (средний размер пор $d_{\text{ср}2}$) поступает жидкость, которая содержит твердые частицы загрязнений двух размеров: крупные диаметром D_1 и мелкие диаметром d_3 , причем выполняются следующие соотношения: $D_1 \gg d_3$, $D_1 > d_{\text{макс}2}$, $d_3 \ll d_{\text{ср}1}$ и $d_3 \ll d_{\text{ср}2}$. Например, если диаметр больших частиц загрязнений $D_1 = 105$ мкм, мелких $d_3 = 5$ мкм, средний размер пор мембранного фильтровального элемента $d_{\text{ср}2} = 90$ мкм, то $d_{\text{макс}2} = 101$ мкм, $d_{\text{ср}1} = 47$ мкм (см. уравнения (4), (5)). Поэтому выполняются все заявленные требования: $d \ll d_{\text{ср}2}$, $d \ll d_{\text{ср}1}$ и $D > d_{\text{макс}2}$.

Очевидно, что крупные частицы загрязнений диаметром D_1 задерживаются мембраной, так как их диаметр больше максимального размера пор мембранного фильтрующего элемента. Последние два неравенства позволяют сделать вывод, что мелкие частицы загрязнений свободно проходят как сквозь кейк-слой, так и сквозь мембранный фильтр. Рассчитаем скорость фильтрации $V_{\phi 1}(t)$ и

толщину кейк-слоя $H_1(t)$ как функцию времени. Исходные данные для проведения расчетов (см. уравнения (1)–(6), (12)):

– для мембранного фильтровального элемента:

$$k_{\mu 2} = \frac{\Pi_2 d_{\text{ср}2}}{32 B_2^2} = 8,37 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2; \quad \Pi_2 = 0,4; \quad B_2 = 1,1; \quad d_{\text{ср}2} = 90 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

$$d_{\text{max}2} = 101 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad H_2 = 1 \cdot 10^{-3};$$

– для очищаемой жидкости (моторное масло М14Г2ЦС):

$$D = 105 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad d = 5 \cdot 10^{-6}; \quad t = 100 \text{ }^\circ\text{С м}; \quad \rho_{\text{ж}} = 851 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu_{\text{ж}} = 0,0119 \text{ Па}\cdot\text{с}; \quad C_1 = 10^{-6};$$

– для кейк-слоя: $k_{\mu 1} = \frac{\Pi_1^3 D^2}{72(1 - \Pi_1)^2 B_1^2} = 1,61 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2;$

$$\Pi_1 = 0,4; \quad B_1 = 1,3;$$

– для режима фильтрации: $\Delta P_2 = 5 \cdot 10^3 \text{ Па}.$

Выведем уравнение для скорости фильтрации на фильтровальном элементе с образованием кейк-слоя. Сначала рассчитаем $V_{\phi 2}(0)$ (см. уравнение (24)):

$$V_{\phi 2}(0) = \frac{k_{\mu 2} \Delta P_2}{\mu_{\text{ж}} H_2} = 0,035 \text{ м/с}. \quad (26)$$

Из уравнения (25) находим скорость фильтрации $V_{\phi 1}(t)$:

$$V_{\phi 1}(t) = \frac{\Delta P_2}{\mu_{\text{ж}} \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_1(t)}{k_{\mu 1}} \right)}. \quad (27)$$

Так как в уравнение (27) входят две неизвестные величины $V_{\phi 1}(t)$ и $H_1(t)$, запишем уравнение, отражающее взаимосвязь между ними:

$$dH_1 S_2 (1 - \Pi_1) = V_{\Phi 1}(t) S_2 C_1 dt \quad (28)$$

или

$$V_{\Phi 1}(t) = \left(\frac{1 - \Pi_1}{C_1} \right) \frac{dH_1}{dt}. \quad (29)$$

Подставляя уравнение (29) в уравнение (28), получаем дифференциальное уравнение 1-й степени относительно толщины кейк-слоя:

$$\left(\frac{1 - \Pi_1}{C_1} \right) \frac{dH_1}{dt} = \frac{\Delta P_1}{\mu_{ж} \left(\frac{H_1}{k_{\mu 1}} + \frac{H_2}{k_{\mu 2}} \right)}. \quad (30)$$

Полученное дифференциальное уравнение (30) решаем прямым интегрированием, после чего преобразуем его:

$$\int_0^{H_1} \left(\frac{H_1(t)}{k_{\mu 1}} + \frac{H_2}{k_{\mu 2}} \right) dH_1 = \frac{C_1 \Delta P_1}{\mu_{ж} (1 - \Pi_1)} \int_0^t dt, \quad (31)$$

$$\frac{H_1^2}{2k_{\mu 1}} + \frac{H_1 H_2}{k_{\mu 2}} = \frac{C_1 P_1 t}{\mu_{ж} (1 - \Pi_1)}, \quad (32)$$

$$H_1(t) = \frac{-\mu_{ж} k_{\mu 1} (1 - \Pi_1) H_2 + \sqrt{[\mu_{ж} k_{\mu 1} (1 - \Pi_1) H_2]^2 + 2\mu_{ж} k_{\mu 1} k_{\mu 2}^2 (1 - \Pi_1) C_1 \Delta P_2 t}}{\mu_{ж} k_{\mu 2} (1 - \Pi_1)} =$$

$$= \frac{k_{\mu 1} H_2 \left(\sqrt{1 + t/t_1} - 1 \right)}{k_{\mu 2}}, \quad (33)$$

где

$$t_1 = \frac{\mu_{ж} k_{\mu 1} (1 - \Pi_1) H_2^2}{2k_{\mu 2}^2 C_1 \Delta P_2} = \frac{k_{\mu 1} (1 - \Pi_1) H_2}{2k_{\mu 2} C_1 V_{\Phi 2}(0)} = 1640 \text{ с}. \quad (34)$$

Из уравнений (29) и (32) найдем скорость фильтрования через мембранный фильтр с учетом образующегося кейк-слоя:

$$V_{\phi 1}(t) = \left(\frac{1 - \Pi_1}{C_1} \right) \frac{dH_1(t)}{dt} = \frac{(1 - \Pi_1) k_{\mu 1} H_2}{2k_{\mu 2} C_1 t_1 \sqrt{1 + t/t_1}} = \frac{V_{\phi 1}(0)}{\sqrt{1 + t/t_1}}. \quad (35)$$

Частные случаи уравнения (33) имеют следующий вид:

$$H_1(t) = \frac{H_2 k_{\mu 1}}{k_{\mu 2}} \left(1 + \frac{t}{2t_1} - 1 \right) = \frac{C_1 V_{\phi 1}(0) t}{1 - \Pi_1} = 5,86 \cdot 10^{-8} t, \text{ при } t \ll t_1. \quad (36)$$

$$H_1(t) = \frac{H_2 k_{\mu 1}}{k_{\mu 2}} \sqrt{\frac{t}{t_1}} = \sqrt{\frac{2k_{\mu 1} C_1 H_2 V_{\phi 1}(0) t}{k_{\mu 2} (1 - \Pi_1)}} = 4,51 \cdot 10^{-6} \sqrt{t}, \text{ при } t \gg t_1. \quad (37)$$

Частные случаи уравнения (35) имеют следующий вид:

$$V_{\phi 1}(t) = V_{\phi 1}(0) \left(1 - \frac{2t}{t_1} \right) = 0,0352 (1 - 0,000336 t), \text{ при } t \ll t_1, \quad (38)$$

$$V_{\phi 1}(t) = V_{\phi 1}(0) \sqrt{\frac{t_1}{t}} = \frac{1,36}{\sqrt{t}}, \text{ при } t \gg t_1. \quad (39)$$

Проверим выполненные расчеты. В приведенном примере давление ΔP_2 на мембранном фильтре, с учетом образующегося кейк-слоя, должно оставаться постоянным. Подставляя в уравнение (27) уравнения (33), (35), получим:

$$\begin{aligned} \Delta P_1(t) &= \mu_{\text{ж}} V_{\phi 1}(t) \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_1(t)}{k_{\mu 1}} \right) = \mu_{\text{ж}} \frac{V_{\phi 1}(0)}{\sqrt{1 + t/t_1}} \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{k_{\mu 1} H_2 (\sqrt{1 + t/t_1} - 1)}{k_{\mu 2} k_{\mu 1}} \right) = \\ &= \frac{\mu_{\text{ж}} V_{\phi 1}(0)}{\sqrt{1 + t/t_1}} \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} - \frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{\sqrt{1 + t/t_1}}{k_{\mu 2}} \right) = \frac{\mu_{\text{ж}} V_{\phi 1}(0) H_2}{k_{\mu 2}} = \Delta P_2 = \text{const}. \quad (40) \end{aligned}$$

Что и требовалось доказать.

На рис. 1–4 проиллюстрированы полученные решения динамики изменения со временем толщины кейк-слоя и скорости фильтрования.

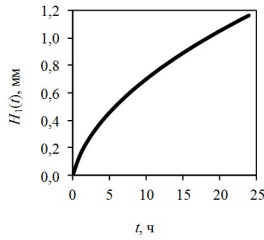


Рис. 1. График зависимости толщины кейк-слоя $H_1(t)$ от времени фильтрования

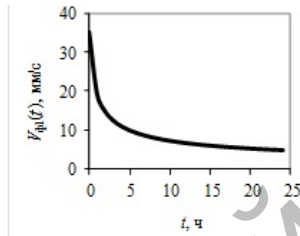


Рис. 2. График зависимости $V_{\Phi 1}(t)$ с образованием кейк-слоя от времени

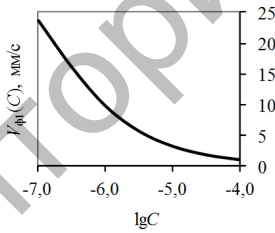


Рис. 3. График зависимости скорости фильтрования $V_{\Phi 1}(C)$ на мембранном фильтре с образованием кейк-слоя от концентрации частиц загрязнений C_1

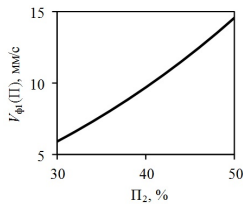


Рис. 4. График зависимости скорости фильтрования $V_{\Phi 1}(\Pi_2)$ на мембранном фильтре с образованием кейк-слоя от ее пористости Π_2

Из данных рис. 1 видно, что за 24 ч при концентрации частиц загрязнений $C_1 = 10^{-6}$ толщина кейк-слоя $H_1 = 1,1$ мм. Для сравнения, при $C_1 = 10^{-4}$ толщина $H_1 = 13,1$ мм. При росте концентрации частиц загрязнений в 100 раз толщина кейк-слоя вырастает только в 11 раз. Этот эффект легко объяснить, если посмотреть на график рис. 2, из которого видно, что за 24 ч скорость фильтрования при $C_1 = 10^{-6}$ уменьшилась с 35,2 до 4,58 мм/с (в 7,7 раз). Аналогично для $C_1 = 10^{-4}$ величина скорости уменьшилась с 35,2 до 0,46 мм/с (в 77 раз). То есть, если концентрация частиц загрязнений увеличивается в 100 раз, скорость фильтрования за сутки уменьшается только в 10 раз.

Выше было показано, что при фильтрации чистой жидкости через мембрану с размером пор 10 мкм перепад давления равен $3,9 \cdot 10^4$ кПа для воды (20 °С) и $1,3 \cdot 10^5$ кПа для моторного масла (100 °С) (см. табл. 1). В процессе фильтрования из-за образования кейк-слоя перепад давления возрастет еще больше. Проиллюстрируем этот вывод на примере очистки моторного масла марки М14Г2ЦС:

– для мембранного фильтра:

$$k_{\mu 2} = \frac{\Pi_2 d_{cp2}}{32B_2^2} = 1,03 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2; d_{cp2} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}; B_2 = 1,1;$$

$$\Pi_2 = 0,4; H_2 = 0,001 \text{ м};$$

– для кейк-слоя:

$$k_{\mu 1} = \frac{\Pi_1^3 D_1^2}{72(1 - \Pi_1)^2 B_1^2} = 3,65 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2; \Pi_1 = 0,4; H_1 = 0,001 \text{ м};$$

$$B_1 = 1,3; D_1 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

– для очищаемой жидкости:

$$t = 100 \text{ °С}; \rho_{\text{ж}} = 851 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu_{\text{ж}} = 0,0119 \text{ Па} \cdot \text{с}; \sigma_{\text{ж}} = 0,045 \text{ Н/м [16]}.$$

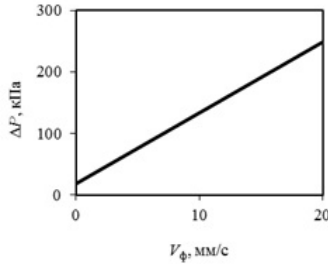


Рис. 5. График зависимости перепада давления на мембранном фильтре от скорости фильтрации V_{ϕ} для чистого моторного масла

На рис. 5 показан график зависимости перепада давления на мембранном фильтровальном элементе от скорости фильтрации для чистого моторного масла. $\Delta P(0) = 18,0$ кПа – это капиллярное давление, которое необходимо преодолеть, чтобы начался процесс фильтрации жидкости. Видно, что при скорости фильтрации $V_{\phi 2} = 0,01$ м/с перепад давления составляет величину 134 кПа, и это относительно большая величина даже без кейк-слоя.

На рис. 6 показаны результаты расчета перепада давления на мембране толщиной 1 мм и кейк-слое толщиной 1 мм от среднего размера пор мембранного фильтрующего элемента.

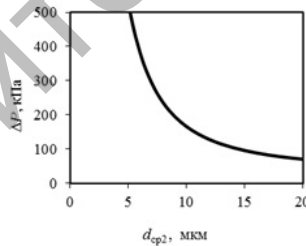


Рис. 6. График зависимости перепада давления на мембране с кейк-слоем $\Delta P(d_{ср2})$ от среднего размера пор мембраны $d_{ср2}$ ($V_{\phi 2} = 0,01$ м/с)

Из расчетных данных, приведенных на рис. 6, видно, что, начиная со среднего диаметра пор мембраны 10 мкм, перепад давления резко возрастает и при 3 мкм $\Delta P(0,000003) = 1,37$ МПа, а при 1 мкм $\Delta P(0,000001) = 11,7$ МПа.

Дополнительное давление, связанное с образованием кейк-слоя 1 мм при среднем диаметре мембранного элемента 10 мкм, составляет 33 кПа.

В результате динамического моделирования процесса мембранного механизма фильтрования установлена взаимосвязь между скоростью фильтрации, перепадом давления, свойствами фильтруемой жидкости и характеристиками пористой структуры. Получены уравнения процесса фильтрования, характеризующие процесс очистки с учетом образующегося несжимаемого кейк-слоя. Показано, что перепад давления на мембранном фильтре при очистке жидкости с повышенной вязкостью при тонкости очистки : 1 мкм составляет 16 МПа. Очевидно, что реализовать такой процесс практически невозможно. Установлено, что применение мембран целесообразно для грубой очистки жидкости с тонкостью очистки более 15 мкм.

Оценим ресурс работы мембранного фильтра, на котором в процессе очистки жидкости образуется кейк-слой. Для нахождения ресурса работы мембранного фильтровального элемента, работающего при постоянном давлении ΔP_1 , необходимо сформулировать критерий работоспособности. Целесообразно связать этот критерий с производительностью процесса. Будем считать, что мембранный фильтр израсходовал свой ресурс из-за роста кейк-слоя, если скорость фильтрования снизилась в k раз. Тогда из уравнения (35) следует, что ресурс работы фильтра

$$T_1 = (k^2 - 1)t_1. \quad (41)$$

Например, если $t_1 = 16$ ч ($C_1 = 10^{-6}$, $V_{\phi 2}(0) = 0,001$ мм/с), то при $k = 3$ ресурс работы мембранного фильтра составит 128 ч. При $k = 2$ ресурс фильтровального элемента – 48 ч.

Очевидно, что чем выше исходная концентрация частиц загрязнений C_1 и больше начальная скорость фильтрации $V_{\phi 2}(0)$ (за счет увеличения давления), тем меньше ресурс работы. Повышение ресурса работы при заданной концентрации твердых частиц загрязнений можно достичь только за счет увеличения фронтальной площади фильтрования, так как это позволяет уменьшить начальную скорость фильтрования при той же производительности.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ОБЪЕМНЫМ МЕХАНИЗМОМ ФИЛЬТРОВАНИЯ

3.1. Общие сведения по объемному механизму фильтрации

При объемном механизме фильтрации частицы загрязнений задерживаются в объеме фильтра за счет сил адгезии в результате их столкновения с внутренней поверхностью фильтра. Необходимое условие глубинного фильтрации следующее: размер частиц загрязнений должен быть значительно меньше среднего размера пор фильтра, или $a \ll d_{cp}$. В противном случае, если $a \leq d_{cp}$, первые же частицы загрязнений, диаметр которых лишь незначительно меньше d_{cp} глубинного фильтра, забивают поверхностные слои фильтра [10], при этом диаметр пор уменьшается на порядок, после чего глубинный фильтр начинает функционировать как мембрана, со средним размером пор на порядок меньшим, чем d_{cp} . Хорошо известно, что фильтры, работающие по глубинному механизму фильтрации, задерживают частицы загрязнений, размер которых на 1–2 порядка меньше среднего размера пор фильтра [6], что важно для эффективной их эксплуатации, так как при этом перепад давления на фильтровальном элементе имеет относительно небольшую величину. Однако за это очень важное свойство приходится «расплачиваться» относительно большим объемом фильтра, следовательно, и его повышенной удельной стоимостью.

Динамические изменения, которые происходят при эксплуатации фильтров с глубинным механизмом фильтрации, концептуально отличаются от аналогичных изменений, которые происходят при эксплуатации фильтров с мембранным механизмом. Достоинством глубинных фильтров является сочетание высокой производительности процесса очистки (относительно большой размер пор) при относительно низком перепаде давления и относительно высокой степени и тонкости очистки. Важно, чтобы очищаемая жидкость не содержала в себе частицы загрязнений, размер которых

лишь немногим меньше среднего размера пор фильтрующего элемента, чего можно добиться за счет выбора соответствующей многоступенчатой структуры фильтровальной системы, которая включает в себя фильтровальные элементы с мембранным и глубинным механизмами фильтрации.

Осаждение частиц загрязнений во внутреннем объеме пористого пространства описывается экспериментально установленной зависимостью Ивасаки [41]:

$$C(x) = C_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right). \quad (42)$$

Глубина проникновения λ в уравнении (42) имеет простой физический смысл: при $x = \lambda$ объемная концентрация частиц загрязнений падает в e раз. Для определения глубины проникновения λ предполагается, что частицы загрязнений имеют сферическую форму, а структурные параметры пористой среды в процессе эксплуатации не изменяются со временем ($t \ll R_3$) [16]:

– для порошковой пористой среды:

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{3(1-\Pi_3)\eta_0\alpha}{2\Pi_3 D_3} C; \quad (43)$$

– для волокновой пористой среды:

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{4(1-\Pi_3)\eta_0\alpha}{\pi\Pi_3 D_3} C. \quad (44)$$

Коэффициент λ , входящий в уравнение (42), с учетом уравнений (43) и (44), для порошковой $\lambda_{\text{п}}$ и волокновой $\lambda_{\text{в}}$ пористых сред равен:

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{2\Pi_3 D_3}{3(1-\Pi_3)\eta_0\alpha} = \frac{d_{\text{ср}3}}{\eta_0\alpha}, \quad (45)$$

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\pi\Pi_3 D_3}{4(1-\Pi_3)\eta_0\alpha} = \frac{d_{\text{ср}3}}{\eta_0\alpha}. \quad (46)$$

Известно [29], что процесс адсорбции частиц загрязнений из фильтрата в поровых каналах фильтровального элемента представляет собой сложное явление, эффективность которого определяется, во-первых, свойствами частиц загрязнений (размерами, плотностью, концентрацией); во-вторых, свойствами пористого проницаемого материала (структурными и гидродинамическими параметрами); в-третьих, параметрами очищаемой жидкости и режимом фильтрации (динамической вязкостью жидкости, плотностью, скоростью фильтрации).

Эффективность процесса осаждения твердых частиц загрязнений при объемном механизме фильтрования определяется вероятностью столкновения, которая определяется природой силы, вызывающей взаимодействие частиц загрязнений с внутренней поверхностью фильтровального элемента. Рассмотрим эти механизмы.

Механизм прямого столкновения. Прямое столкновение движущейся частицы загрязнений происходит с внутренней поверхностью фильтровального элемента, когда ее траектория проходит на расстоянии менее половины ее диаметра от фрагмента фильтровального элемента. Вероятность столкновения в этом случае рассчитывается с учетом уравнения (3) [30]:

$$\eta_{\text{пр.ст}} = \frac{3}{2} \left(\frac{d_3}{D_3} \right)^2 = \frac{2}{3} \left(\frac{\Pi_3 d_3}{(1 - \Pi_3) d_{\text{ср}3}} \right). \quad (47)$$

Основным параметром, характеризующим прямое столкновение, является отношение d_3/D_3 . Величина этого параметра оказывает существенное воздействие на процесс столкновения в пористых средах.

Механизм диффузии. Под действием этого механизма осаждение частиц загрязнений в фильтрующем элементе происходит в результате броуновского движения частиц загрязнений в жидкости, которое впервые было изучено Эйнштейном [17]. Математическое уравнение для расчета вероятности столкновения частиц загрязнений в этом случае была рассчитана в работе [20] с учетом уравнения (3):

$$\eta_{\text{диф}} = 0,9 \left(\frac{k_6 (T + 273,15)}{\mu_{\text{ж}} d_3 D_3 V_{\text{ф}3}} \right)^{2/3} = 0,687 \left(\frac{k_6 \Pi_3 (T + 273,15)}{(1 - \Pi_3) d_3 \mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}3} d_{\text{ср}3}} \right)^{2/3}. \quad (48)$$

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

Механизм седиментации. Этот механизм обусловлен, с одной стороны, гравитацией, вызывающей движение частиц загрязнений к центру Земли под действием силы тяжести, а с другой, – силой Архимеда, направленной в противоположную сторону. Вероятность столкновения в этом случае рассчитывается следующим образом [30]:

$$\eta_{\text{сед}} = \frac{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) d_3^2 g}{18\mu_{\text{ж}} V_{\text{ф3}}} . \quad (49)$$

Механизм инерции. Осаждение частиц загрязнений под действием этого механизма является следствием действия сил инерции. Механизм инерции характеризуется числом Стокса [18, 19, 39]. Вероятность столкновения частиц загрязнений в этом случае математически рассчитывается [40] следующим образом (с учетом уравнения (3)):

$$\eta_{\text{ин}} = \frac{\rho_{\text{т}} d_3^2 V_{\text{ф3}}}{18\mu_{\text{ж}} D_3} = \frac{\rho_{\text{т}} d_3^2 V_{\text{ф3}} \Pi_3}{27\mu_{\text{ж}} (1 - \Pi_3) d_{\text{ср3}}} . \quad (50)$$

Реальные процессы осаждения частиц загрязнений в фильтровальном элементе характеризуются совместным воздействием всех механизмов:

$$\eta_0 = \eta_{\text{диф}} + \eta_{\text{пр.ст}} + \eta_{\text{сед}} + \eta_{\text{ин}} , \quad (51)$$

где $\eta_{\text{диф}}$, $\eta_{\text{пр.ст}}$, $\eta_{\text{сед}}$, $\eta_{\text{ин}}$ – вероятности столкновения при диффузии, прямом столкновении, седиментации и инерции соответственно.

3.2. Сравнительный анализ различных механизмов объемного фильтрования

При различных размерах частиц загрязнений, факторов фильтрующего элемента и режимов фильтрации жидкости те или иные механизмы осаждения будут преобладать над другими. Поэтому при создании научных основ фильтровальных систем необходимо

проанализировать количественное значение всех четырех механизмов, вызывающих столкновение частиц загрязнений с внутренней поверхностью фильтрующего элемента.

На рис. 7–12 представлены теоретические зависимости вероятности столкновения η частиц загрязнений от их размера d_3 в результате действия различных механизмов осаждения: диффузии $\eta_{\text{диф}}$, прямого столкновения $\eta_{\text{пр.ст}}$, седиментации $\eta_{\text{сед}}$ и инерции $\eta_{\text{ин}}$ в зависимости от свойств частиц загрязнений, параметров пористого материала и очищаемой жидкости, а также режимов фильтрации жидкости.

При глубинном механизме фильтрования основной причиной, вызывающей «прилипание» твердых частиц загрязнений после их столкновения с внутренней поверхностью фильтровального элемента, является процесс адсорбции. Поэтому удастся отделить значительную долю частиц твердой фазы, размеры которых значительно меньше размеров пор, хотя на основании геометрических соображений кажется, что частицы с диаметром много меньшим среднего размера пор могли бы свободно пройти через фильтровальный элемент.

Проиллюстрируем возможности использования выражений (47)–(51) для оценки вероятности столкновений частиц загрязнений на единичном структурном элементе. В качестве очищаемой среды выбрано моторное масло М14Г2ЦС. Размеры частиц загрязнений выбирались в диапазоне $d_3 = 10^{-8} - 10^{-4}$ м. Рассмотрены следующие варианты механизмов осаждения частиц загрязнений на единичном структурном элементе диаметром D_3 :

– при различных диаметрах единичного структурного элемента D_3 : 250, 500, 750 и 1000 мкм; частицы оксида кремния ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$); температура очищаемого масла $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, скорость фильтрования $V_{\text{фз}} = 0,0013 \text{ м/с}$ (рис. 7);

– при различных значениях температуры T : $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho_{\text{ж}} = 900 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\text{ж}} = 0,836 \text{ Па}\cdot\text{с}$); $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho_{\text{ж}} = 888 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\text{ж}} = 0,135 \text{ Па}\cdot\text{с}$); $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho_{\text{ж}} = 875 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\text{ж}} = 0,046 \text{ Па}\cdot\text{с}$); $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho_{\text{ж}} = 863 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\text{ж}} = 0,022 \text{ Па}\cdot\text{с}$) и $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho_{\text{ж}} = 850 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\text{ж}} = 0,0119 \text{ Па}\cdot\text{с}$); частицы оксида кремния ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$); скорость фильтрования $V_{\text{фз}} = 0,0013 \text{ м/с}$; диаметр единичного структурного элемента $D_3 = 500 \text{ мкм}$ (рис. 8);

– при различных скоростях фильтрации $V_{\text{фз}}$: частицы оксида кремния ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$); диаметр единичного структурного элемента $D_3 = 500 \text{ мкм}$; температура очищаемого масла $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 9);

– при фильтровании различных частиц загрязнений: асфальтены ($\rho_{\text{т}} = 1140 \text{ кг/м}^3$); сажа ($\rho_{\text{т}} = 2000 \text{ кг/м}^3$); оксид кремния ($\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$); железо ($\rho_{\text{т}} = 7870 \text{ кг/м}^3$); скорость фильтрации $V_{\text{фз}} = 0,0013 \text{ м/с}$; диаметр единичного структурного элемента $D_3 = 500 \text{ мкм}$; $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 10).

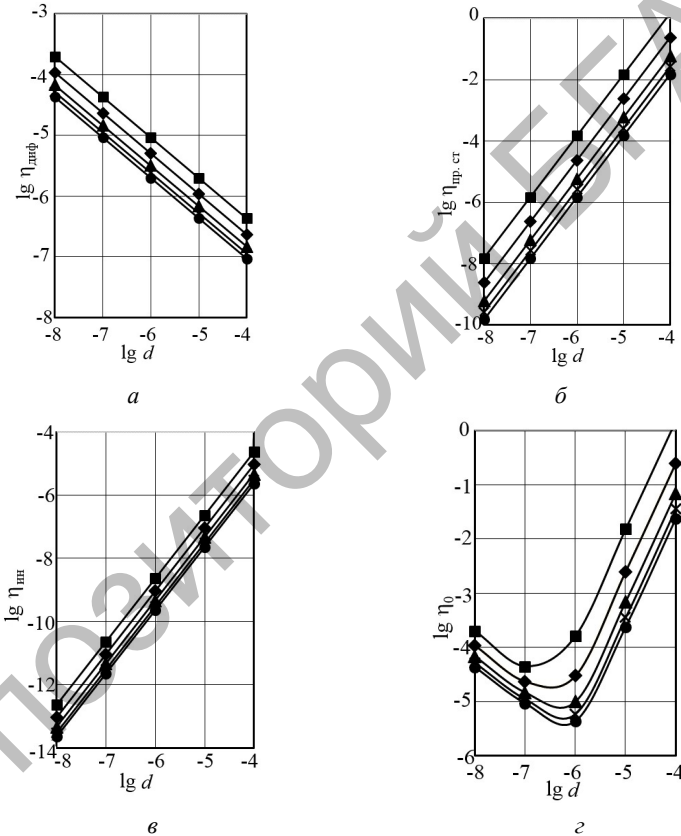


Рис. 7. Графики зависимости η для частиц загрязнений от их размера d :
 а – диффузия $\eta_{\text{диф}}$; б – прямое столкновение $\eta_{\text{пр. ст}}$; в – инерция $\eta_{\text{ин}}$;
 г – суммарное действие всех механизмов η_0 при различных размерах коллектора
 D_3 , мкм: ■ – 100; ◆ – 250; ▲ – 500; × – 750; ● – 1000

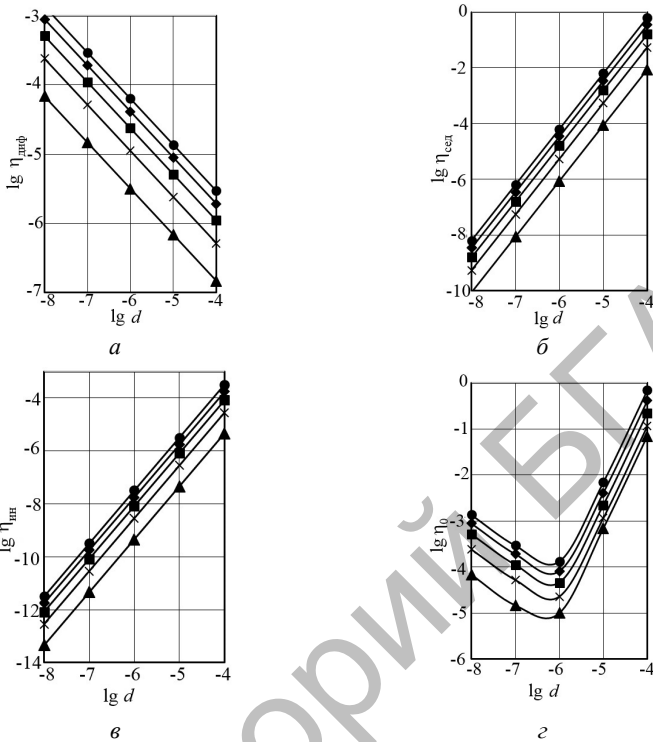
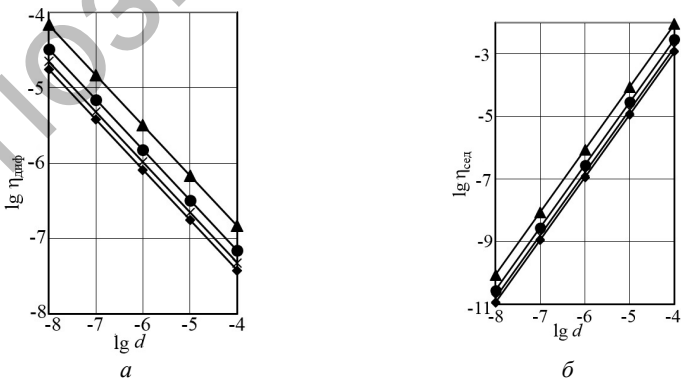


Рис. 8. Графики зависимости η для частиц загрязнений от их размера d :
 а – диффузия $\eta_{\text{диф}}$; б – седиментация $\eta_{\text{сед}}$; в – инерция $\eta_{\text{ин}}$; г – суммарное действие
 всех механизмов η_0 при различных значениях температуры T , °C: ▲ – 20; x – 40;
 ■ – 60; ◆ – 80; ● – 100



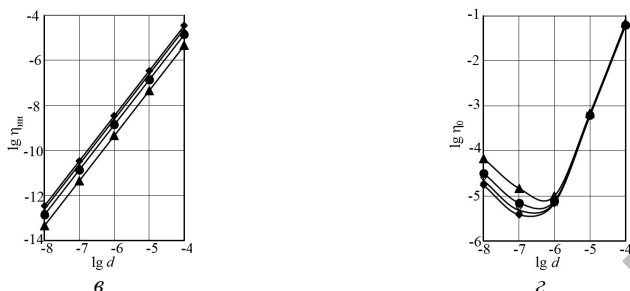


Рис. 9. Графики зависимости η для частиц загрязнений от их размера d :
 а – диффузия $\eta_{\text{диф}}$; б – седиментация $\eta_{\text{сед}}$; в – инерция $\eta_{\text{ин}}$;
 г – суммарное действие всех механизмов η_0 при различных скоростях
 фильтрации $V_{\text{ф3}}$, м/с: \blacktriangle – 0,0013; \bullet – 0,0040; \times – 0,0070; \blacklozenge – 0,0100

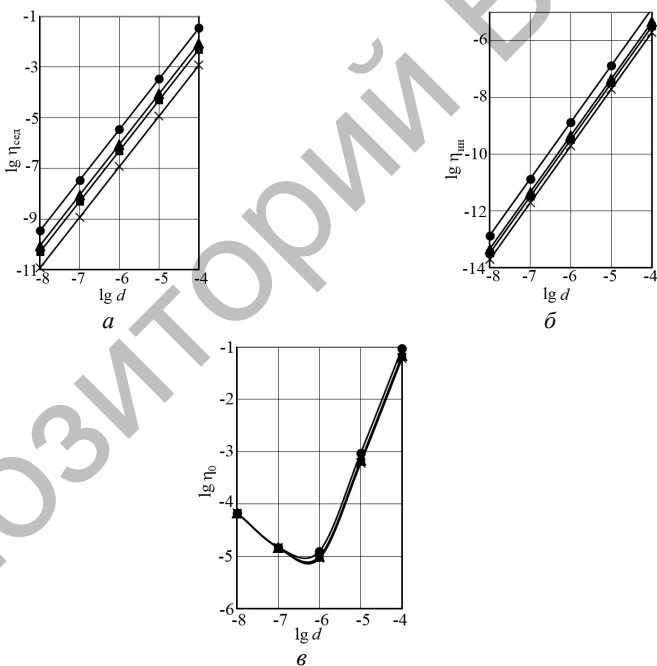


Рис. 10. Графики зависимости η для частиц загрязнений от их размера d :
 а – седиментация $\eta_{\text{сед}}$; б – инерция $\eta_{\text{ин}}$; в – суммарное действие всех механизмов η_0
 при различных частицах загрязнений, ρ_T , кг/м³: \times – асфальтены 1140 кг/м³;
 \blacksquare – сажа 2000 кг/м³; \blacktriangle – оксид кремния 2650 кг/м³; \bullet – железо 7870 кг/м³

На рис. 11 и 12 приведены графики зависимости вероятности столкновения частиц загрязнений в диапазоне 0,01–700 мкм при фильтровании моторного масла при температуре 20 °С ($\rho_{\text{масла}} = 900 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\text{ж}} = 0,836 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $V_{\text{ф3}} = 0,01 \text{ м/с}$, $D_3 = 1000 \text{ мкм}$, $\Pi_3 = 0,4$).

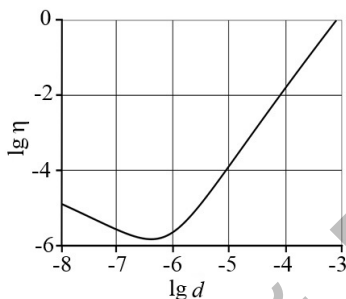


Рис. 11. Графики зависимости суммарной вероятности η столкновения от размера частиц загрязнений, для $d_3 = 0,5 \text{ мкм}$ $\eta_{\text{min}} = 1,37 \cdot 10^{-6}$.

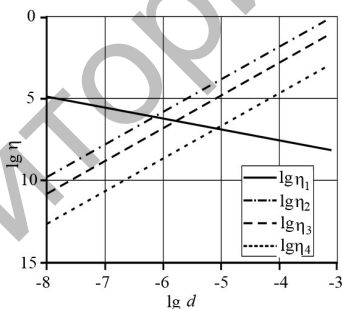


Рис. 12. Графики зависимости вероятности столкновения от размера примесных частиц:

$$\eta_1 = \eta_{\text{диф}}, \quad \eta_2 = \eta_{\text{прст}}, \quad \eta_3 = \eta_{\text{сед}}, \quad \eta_4 = \eta_{\text{ин}}$$

Анализ полученных данных (см. рис. 7–12) показывает, что наиболее трудно удаляемыми частицами являются частицы загрязнений размером порядка 1 мкм. При таком размере частиц загрязнений суммарная вероятность столкновения в результате действия механизмов осаждения минимальна. Данные (рис. 7–12) позволяют

сделать вывод, что для частиц загрязнений более 1 мкм вероятность столкновения практически определяется только прямым столкновением (рис. 12). Для частиц загрязнений диаметром менее 0,1 мкм основным механизмом столкновения является диффузия. В интервале размеров частиц 0,1–1,0 мкм следует учитывать и прямое столкновение, и броуновское движение. Вероятностью столкновения частиц загрязнений в результате механизмов седиментации и инерции в широком диапазоне размеров коллектора и частиц загрязнений можно пренебречь.

С ростом значений температуры от 20 до 100 °С суммарная вероятность столкновения частиц загрязнений 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 (см. рис. 8).

С ростом скорости фильтрации возрастает вероятность столкновения частиц загрязнений с единичным коллектором за счет механизма инерции и уменьшается за счет механизмов диффузии и седиментации (см. рис. 9). Суммарное действие механизмов для частиц загрязнений размером более 1 мкм от скорости фильтрования не зависит. Кроме того, суммарное действие всех механизмов осаждения не зависит от вида частиц загрязнений (см. рис. 10).

3.3. Моделирование и оптимизация анизотропной поровой структуры для реализации объемного фильтрования

Основная причина, которая приводит к существенному снижению ресурса работы глубинного фильтра, заключается в неравномерности осаждения частиц загрязнений в объеме его порового пространства со стороны фронтальной поверхности. С целью повышения ресурса работы глубинного фильтра необходимо создание такой структуры пористого фильтровального элемента, которая в процессе эксплуатации обеспечила бы равномерное осаждение частиц загрязнений равномерно по всему объему фильтра.

Для увеличения ресурса работы поровая структура фильтра, работающего по объемному механизму фильтрования, должна обладать следующими свойствами: 1) высокий коэффициент извилистости. Частицы загрязнений, проходящие через фильтр, должны, по крайней мере, два раза столкнуться с его внутренней поверхностью. Такой эффект достигается, прежде всего, за счет существенного

увеличения толщины фильтра, а также за счет организации такой поровой структуры материала, которая заставляла бы частицы загрязнений часто менять направление движения, увеличивая вероятность столкновения;

2) повышенная грязеемкость, достигаемая за счет равномерного осаждения частиц загрязнений в поровом пространстве глубинного фильтра;

3) выполнение условий: $d \ll d_{cp}$ и $V_{\text{ч}} \ll V_{\text{пор}}$, так как осаждение частиц загрязнений в объеме фильтра приводит к существенному снижению удельного расхода очищаемой жидкости, если давление на фильтровальном элементе поддерживается постоянным.

Несмотря на то, что выполнение сформулированных требований имеет большое значение для создания эффективного глубинного фильтра, в качестве целевой функции в работе выбрано условие 2 по причине того, что многослойный пористый элемент будет обладать такой структурой, при которой концентрация задержанных частиц загрязнений в потоке фильтрата будет уменьшаться по линейному закону, и такая структура порового пространства обеспечит максимальный ресурс работы.

Проиллюстрируем идею создания поровой структуры, обеспечивающей линейный характер осаждения частиц загрязнений по глубине фильтровального элемента, на примере пористого порошкового материала, состоящего из сферических частиц диаметром D_3 .

Хорошо известно, что пористые порошковые материалы из сферических частиц, полученные методом спекания свободно насыпанных порошков, обладают достаточно высокой пористостью – 38–42 % [2]. Поэтому разработка фильтровальных систем с механизмом глубинного фильтрования, обладающих одновременно высокой проницаемостью и высокой тонкостью очистки, будет связана с реализацией такой структуры порового пространства, при которой концентрация частиц загрязнений должна уменьшаться по толщине n -слойного фильтровального элемента толщиной H_n по линейному закону Ω_0 до Ω_n следующим образом:

$$\Omega(x) = \Omega_0 - (\Omega_0 - \Omega_n) \frac{x}{H_n}, \quad (52)$$

причем $\Omega(0) = \Omega_0 = C(0)$; $\Omega(H_n) = \Omega_n = C(H_n) = \gamma C(0)$ (например $\gamma = 0,05$).

Введем следующие обозначения:

$$\Omega_1 = \Omega_0 - (\Omega_0 - \Omega_n) \frac{H_1}{H_n}; \quad (53)$$

$$\Omega_{i-1} = \Omega_0 - (\Omega_0 - \Omega_n) \frac{H_i}{H_n}; \quad (54)$$

$$\Omega_{n-1} = \Omega_0 - (\Omega_0 - \Omega_n) \frac{H_{n-1}}{H_n}. \quad (55)$$

Точки $(H_1; \Omega_1), (H_2; \Omega_2), \dots, (H_{n-1}; \Omega_{n-1})$ лежат на прямой (52).

Для моделирования процессов фильтрования, происходящих в фильтровальных элементах из пористых проницаемых материалов, запишем уравнение, которое описывает изменение концентрации частиц загрязнений, осевших по толщине в однослойном, двухслойном, трехслойном и n -слойном фильтрах [41]. Для n -слойного фильтра выполняется условие: $0 = H_0 \leq H_1 \leq H_2 \leq \dots \leq H_n$:

$$C(x) = \begin{cases} C_0 \exp\left(-\frac{x-H_0}{\lambda_1}\right), & H_0 \leq x \leq H_1, \\ C_2 \exp\left(-\frac{x-H_1}{\lambda_2}\right), & H_1 < x \leq H_2, \\ \dots, \\ C_{i-1} \exp\left(-\frac{x-H_{i-1}}{\lambda_i}\right), & H_{i-1} < x \leq H_i, \\ \dots, \\ C_{n-1} \exp\left(-\frac{x-H_{n-1}}{\lambda_n}\right), & H_{n-1} < x \leq H_n, \end{cases} \quad (56)$$

где $\lambda_i = \frac{H_i - H_{i-1}}{\ln(C_{i-1}/C_i)}$ – глубина проникновения в i -м слое.

Глубина проникновения при фильтровании в пористых проницаемых элементах, состоящих из сферических частиц

$\lambda_i(d_{срi}, d, \Pi_i)$, однозначно определяется структурными параметрами материала и размером частиц загрязнений:

$$\lambda_i(D_{3i}, d_3, \Pi_i) = \frac{2\Pi_{3i} D_{3i}}{3(1 - \Pi_{3i}) \alpha \eta_0(D_{3i}, d_3)}; \quad (57)$$

$$\eta(D_{3i}, d_3) = \eta_{\text{диф}}(D_{3i}, d_3) + \eta_{\text{пр.ст}}(D_{3i}, d_3) + \eta_{\text{сед}}(D_{3i}, d_3) + \eta_{\text{ин}}(D_{3i}, d_3); \quad (58)$$

$$\eta_{\text{диф}}(D_{3i}, d_3) = 0,9 \left(\frac{k_0(T + 273,15)}{\mu_{\text{ж}} d_3 D_{3i} V_{\text{ф}}} \right)^{2/3}; \quad (59)$$

$$\eta_{\text{пр.ст}}(D_{3i}, d_3) = 1,5 \left(\frac{d_3}{D_{3i}} \right)^2; \quad (60)$$

$$\eta_{\text{сед}}(D_{3i}, d_3) = \frac{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}}) g d_3^2}{18 \mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}}}; \quad (61)$$

$$\eta_{\text{ин}}(D_{3i}, d_3) = \frac{\rho_{\text{ТВ}} V_{\text{ф}} d_3^2}{18 \mu_{\text{ж}} D_{3i}}; \quad (62)$$

$$k_{\mu i}(D_{3i}, \Pi_{3i}) = \frac{\Pi_{3i}^3 D_{3i}^2}{72(1 - \Pi_{3i})^2 B_3^2}; \quad (63)$$

$$k_{\mu} = \frac{H_n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{H_i - H_{i-1}}{k_{\mu i}(D_{3i}, \Pi_{3i})} \right)}; \quad (64)$$

$$d_{ср3i} = \frac{2\Pi_{3i} D_{3i}}{3(1 - \Pi_{3i})}. \quad (65)$$

Моделирование процессов фильтрации является первым необходимым этапом разработки эффективных фильтровальных систем, работающих по глубинному механизму фильтрации. Конечной задачей разработки эффективных фильтровальных систем, которые в дальнейшем можно использовать для изготовления

фильтрующих элементов, является процедура однокритериальной оптимизации. Основным результатом, который должен быть получен в результате оптимизации, – это рассчитанный комплекс структурных и конструктивных параметров, обеспечивающих максимально возможный ресурс работы фильтровального элемента.

Необходимым элементом процедуры оптимизации является наличие целевой функции, позволяющей из бесконечного количества решений отобрать единственное, обеспечивающее создание наилучшего фильтровального элемента.

В основу конструирования порового пространства глубинного фильтра, в нашем случае, положено совпадение функций, задаваемых уравнениями (52) и (56). Для фильтрующего элемента с поровой структурой, описываемой уравнением (56), количество частиц загрязнений при фильтровании будет равномерно распределено по всему объему фильтра, что обеспечит максимальную грязеемкость, следовательно, максимально возможный ресурс работы фильтра.

Поэтому в качестве целевой функции был принят модуль разности площадей S_n между постулированной прямолинейной зависимостью (52) и реальной кривой, полученной для многослойного пористого материала по уравнению (56):

$$S_n(H_1, m_1, H_2, m_2, \dots, H_{n-1}, m_{n-1}) = \frac{\int_0^{H_n} |\Omega(x) - C_n(x)| dx}{H_n} \rightarrow \min. \quad (66)$$

В качестве независимых варьируемых факторов, обеспечивающих минимальную величину S_n , возьмем значения границ слоев фильтра, равных $H_0, H_1, H_2, \dots, H_{n-1}, H_n$, и модули концентрации m_1, m_2, \dots, m_{n-1} , определяемые следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 = C_1/\Omega_1, \\ m_2 = C_2/\Omega_2, \\ \dots\dots\dots, \\ m_i = C_i/\Omega_i, \\ \dots\dots\dots, \\ m_{n-1} = C_{n-1}/\Omega_{n-1}. \end{array} \right. \quad (67)$$

Толщина каждого слоя определяется следующим образом: толщина 1-го слоя равна $H_1 - H_0$, k -го – $H_k - H_{k-1}$ (рис. 13).

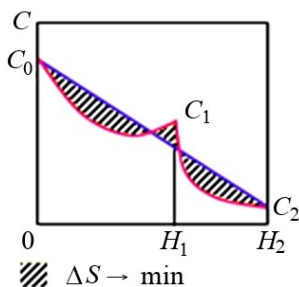


Рис. 13. Схема построения $C(H)$ для двухслойного пористого материала, $C_1 = C(H_1) = m_1 \Omega(H_1)$

Поиск оптимальной поровой структуры многослойного ППМ (в качестве примера) проводился для моторного масла М14Г2ЦС при значениях температуры $T = 100^\circ\text{C}$ (плотность масла $\rho_{\text{ж}} = 851 \text{ кг/м}^3$, вязкость масла $\mu_{\text{ж}} = 0,0119 \text{ Па}\cdot\text{с}$); скорость фильтрации $V_{\text{ф}} = 0,001 \text{ м/с}$; размер частиц загрязнений из оксида кремния с плотностью $\rho_{\text{т}} = 2650 \text{ кг/м}^3$ равен $d = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, начальная концентрация частиц загрязнений $C_0 = 1$, конечная концентрация $C_n = \gamma C_0$, $\gamma = 0,05$; пористость $\Pi_i = 0,4$; $H_n = 0,01 \text{ м}$ коэффициент извилистости $B_i = 1,3$ для всех слоев равны, вероятность «прилипания» частицы загрязнений в результате столкновения с внутренней поверхностью фильтра $\alpha = 1$. Значение концентрации $C_0 = 1$ выбрано для проведения расчетов. Полученные результаты можно применять для любой начальной концентрации. Например, если реальная концентрация твердых частиц загрязнений равна $C_0 = 10^{-6}$, то все рассчитанные концентрации следует, после их расчета, умножить на 10^{-6} .

Теоретически оценим средний размер пор 1-го пористого слоя, чтобы уравнения (52) и (56) в начальной точке имели одинаковый характер изменения со временем. Для этого необходимо, чтобы

производные обеих функций были равны $\Omega'(x) = C'(x)$ при $x = 0$. Дифференцируя уравнения (52) и (56) и приравнивая их производные при $x = 0$, получим

$$-\frac{\Omega_0 - \Omega_n}{H_n} = -\frac{C_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda_1}\right)}{\lambda_1}, \quad (68)$$

$$\lambda_1 = \frac{H_n}{0,95}. \quad (69)$$

С учетом того, что $d_3 = 5 \cdot 10^{-6}$ м; $\alpha = 1$; $\Pi_3 = 0,4$; $H_n = 0,01$ м, по уравнениям (57)–(62) можно рассчитать размер частиц пористого проницаемого материала, который равен $D_3 = 116$ мкм, или по уравнению (65) $d_{ср3} = 52$ мкм. В табл. 3 приведены значения $d_{ср3}$ для 1-го слоя многослойного фильтра.

Таблица 3

Значения средних размеров пор 1-го слоя
в зависимости от толщины фильтровального элемента

H_n , мм	$d_{ср}$, мкм
6	41
10	52
20	74

В результате однофакторной оптимизации, выполненной по уравнению (66) в системе компьютерной математики *Mathcad*, получены оптимальные структурные и конструкционные факторы для каждого слоя многослойного структурного фильтра, которые обеспечивают равномерное осаждение частиц загрязнений в процессе очистки (табл. 4, рис. 14–17).

Таблица 4

Параметры многослойного фильтровального элемента

Параметры многослойного фильтра		Количество слоев			
		1	2	3	4
Толщина слоя, мм	H_1	10,0	6,8	4,5	3,4
	H_2	–	3,2	3,9	3,1
	H_3	–	–	1,6	2,3
	H_4	–	–	–	1,2
	$H_{\text{общ}}$	10,0	10,0	10,0	10,0
Средний диаметр пор в слое $d_{\text{ср}}$, мкм	$d_{\text{ср1}}$	32	46	48	50
	$d_{\text{ср2}}$	–	23	35	39
	$d_{\text{ср3}}$	–	–	21	30
	$d_{\text{ср4}}$	–	–	–	20
Концентрация частиц загрязнений слое в долях от исходной объемной концентрации C_0	C_0-C_1	1,00– 0,05	1,00– 0,43	1,00– 0,60	1,00– 0,70
	C_1-C_2	–	0,43– 0,05	0,60– 0,23	0,70– 0,40
	C_2-C_3	–	–	0,23– 0,05	0,40– 0,17
	C_3-C_4	–	–	–	0,17 – 0,05
Вязкостный коэффициент проницаемости в слое k_{η} , 10^{-12} м^2	$k_{\mu 1}$	7,5	16	17	18
	$k_{\mu 2}$	–	4,0	8,8	11
	$k_{\mu 3}$	–	–	3,12	6,5
	$k_{\mu 4}$	–	–	–	2,9
	$k_{\mu \text{общ}}$	7,5	8,2	8,2	8,2
Перепад давления в слое ΔP , кПа	ΔP_1	16	5,2	3,2	2,2
	ΔP_2	–	9,4	5,2	3,4
	ΔP_3	–	–	6,1	4,1
	ΔP_4	–	–	–	4,8
	$\Delta P_{\text{общ}}$	16	14,6	14,5	14,5
Целевая функция S , 10^{-4}	–	20,8	2,9	1,1	0,76
Глубина проникновения / модуль концентрации	$10^3 \cdot \lambda_1 / m_1$	3,3/1,00	8,1/1,22	8,8/1,05	9,7/1,04
	$10^3 \cdot \lambda_1 / m_2$	–	1,5/1,00	4,1/1,15	5,5/1,05
	$10^3 \cdot \lambda_1 / m_3$	–	–	1,0/1,00	2,8/1,09
	$10^3 \cdot \lambda_1 / m_4$	–	–	–	0,9/1,00

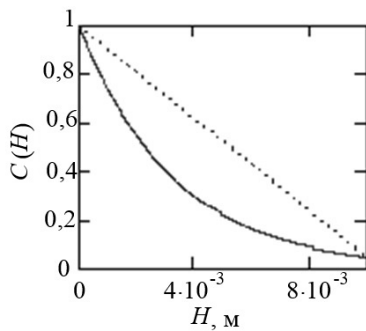


Рис. 14. График зависимости изменения концентрации частиц загрязнений по толщине однослойного глубинного фильтра

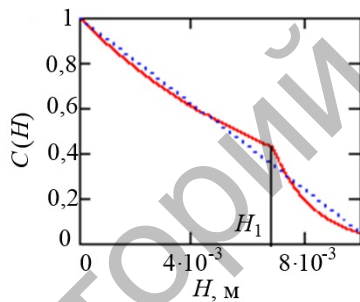


Рис. 15. График зависимости изменения концентрации частиц загрязнений по толщине двухслойного глубинного фильтра

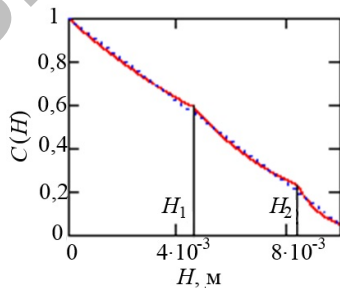


Рис. 16. График зависимости изменения концентрации частиц загрязнений по толщине трехслойного глубинного фильтра

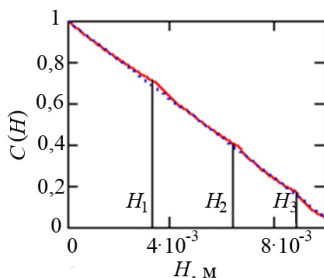


Рис. 17. График зависимости изменения концентрации частиц загрязнений по толщине четырехслойного глубинного фильтра

Из приведенных в табл. 4 и на рис. 14–17 данных видно, что уже 2-слойный фильтр обеспечивает приемлемое равномерное распределение частиц загрязнений по глубине фильтра. На этом фильтре перепад давления составляет 14,6 кПа (на 1-слойном – 16 кПа), а степень очистки частиц загрязнений диаметром 5 мкм составляет 95 %. Трех- и четырехслойные фильтры лучше двухслойного (целевая функция в 2,6 и 3,8 раза меньше, чем для двухслойного), но технологический процесс их изготовления гораздо сложнее. Для двухслойного фильтра (в сравнении с однослойным): целевая функция в 7,3 раза меньше, а перепад давления (следовательно, проницаемость и производительность) меньше на 8,2 %. Средний диаметр пор первого слоя 2-слойного глубинного фильтра составляет 46 мкм, что достаточно близко к «идеальному» значению – 52 мкм (см. табл. 3 для $H_n = 10$ мм). Для сравнения: для 1-слойного фильтра средний диаметр первого слоя равен 32 мкм.

Осталась одна нерешенная задача: степень очистки частиц загрязнений диаметром 5 мкм составила 95 %, а какая степень очистки частиц загрязнений менее 5 мкм (например, 4,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,5 мкм)?

3.4. Взаимосвязь степени и тонкости очистки при объемном механизме фильтрования

Рассмотрим механизм работы глубинного фильтра несколько подробнее, и начнем с анализа степени очистки. Степень очистки в процессе глубинного фильтрования достаточно корректно описы-

вается уравнением [14], которое по физической сути такое же, как и уравнение Ивасаки [41]:

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{kS_v H}{V_{\pi}}\right). \quad (70)$$

Время τ_0 нахождения молекул жидкости и частиц загрязнений в объеме фильтра в процессе очистки равно

$$\tau_0 = \frac{H}{V_{\pi}} = \frac{B\Pi H}{V_{\phi}}. \quad (71)$$

Тогда уравнение (70), с учетом уравнения (71), можно переписать так:

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{\tau_0}{\tau_{00}}\right), \quad (72)$$

где τ_{00} – время между соударениями частиц загрязнений с внутренней поверхностью фильтровального элемента:

$$\tau_{00} = \frac{1}{kS_v}. \quad (73)$$

Если структура пористого материала обеспечивает соотношение $\tau_0 = \tau_{00}$, то из уравнения (70) следует, что степень очистки $\psi = 0,63$; если $\tau_0 = 3\tau_{00}$, то $\psi = 0,95$. Вывод, который можно сделать после анализа расчета, заключается в том, что основная задача разработчика глубинного фильтра – создать такую поровую структуру, в которой молекулы жидкости и частицы загрязнений сталкиваются с внутренней поверхностью пористого материала в процессе фильтрования несколько раз.

Физико-механические свойства пористых проницаемых материалов традиционно характеризуются пористостью, размерами пор, прочностью, коэффициентами проницаемости. Для прогнозирования степени очистки фильтров из пористых проницаемых материалов полезно использовать еще один эксплуатационный параметр – удельная производительность процесса очистки U :

$$U = \frac{Q}{V_0}. \quad (74)$$

В самом деле, объемная скорость фильтрования жидкости $Q = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ – это много или мало? Очевидно, что ответ на этот вопрос зависит от величины объема самого фильтра V_0 . Если $V_0 = 0,001 \text{ м}^3$, то $U = 10^5 \text{ ч}^{-1} \approx 28 \text{ с}^{-1}$. Если $V_0 = 10 \text{ м}^3$, то $U = 10 \text{ ч}^{-1} \approx 0,0028 \text{ с}^{-1}$. Физический смысл удельной производительности U – это объемный расход жидкости, выраженный в объемах самого фильтра в единицу времени.

Если учесть, что скорость фильтрации равна

$$V_\Phi = \frac{Q}{S_0}, \quad (75)$$

то из уравнений (70) и (71) следует

$$V_\Phi = UH_0. \quad (76)$$

Время τ_0 нахождения молекул жидкости (частиц загрязнений) в фильтре и удельный расход U связаны соотношением

$$\tau_0 = \frac{B\Pi}{U}, \quad (77)$$

так как из условия непрерывности следует, что

$$V_\Phi = \Pi V_\Pi \quad (78)$$

и по определению

$$B = \frac{H}{H_0}. \quad (79)$$

Из уравнения (77) следует, что параметр U практически равен обратной величине времени τ_0 нахождения жидкости в фильтре, так как $B\Pi \approx 1$.

Используя уравнения (72), (73), (77), уравнение (70) можно записать как

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{U_{\max}}{U}\right), \quad (80)$$

где U_{\max} – максимальный удельный расход через данный фильтр, равный:

$$U_{\max} = k \Pi B S_v. \quad (81)$$

Еще один физический смысл U_{\max} – удельная производительность, при которой время τ_{00} между соударениями частиц загрязнений с поверхностью порового канала равно времени τ_0 нахождения частиц загрязнений в поровом пространстве фильтра, то есть $U = U_{\max}$, если $\tau_{00} = \tau_0$. Если $U = U_{\max}$, то степень очистки составит $\psi = 0,63$ (уравнение (80)). Если потребуется увеличить степень очистки до $\psi = 0,95$, то следует уменьшить удельную нагрузку через фильтр до $U = U_{\max}/3$.

Из уравнения (70) следует, что для оценки степени очистки фильтра с глубинным механизмом фильтрования необходимо рассчитать величину k – константу скорости удаления частиц загрязнений из фильтрата. Эта константа зависит от теплофизических параметров фильтруемого потока ($\rho_{ж}, \eta_{ж}, D_f$), структурных параметров пористого материала ($\Pi, B, d_{ср}, S_v, Re_{кр}$), конструктивных параметров фильтра (H_0, S_0) и гидродинамических параметров потока фильтрата (Re, V_{ϕ} , или, что то же самое, Q или U).

Чтобы повысить степень очистки, следует повысить τ_0 (то есть снизить нагрузку на фильтр U) и (или) уменьшить τ_{00} , то есть создать соответствующую поровую структуру (значит, повысить U_{\max}), которая способствует увеличению вероятности столкновения частиц загрязнений с внутренней поверхностью фильтра.

И в том и другом случае высокая степень очистки достигается при условии $\tau_{00} \leq \tau_0$ (или $U \leq U_{\max}$).

Константу скорости удаления примесей k , которая определяется процессами массообмена между частицами загрязнений и внутренней поверхностью фильтра, математически можно определить с помощью критерия Шервуда [1], физический смысл которого представляет собой отношение конвективного переноса к диффузионному:

$$\text{Sh} = \frac{kd_{\text{cp}}}{D_f}. \quad (82)$$

Известно, что число Шервуда при массообмене определяется двумя критериями подобия [1, 14]: критерием Шмидта и критерием Рейнольдса. Критерий Шмидта зависит только от физических свойств очищаемой жидкости (вязкость $\eta_{\text{ж}}$, плотность $\rho_{\text{ж}}$ и коэффициент самодиффузии D_f). В то же время критерий Рейнольдса зависит как от физических свойств фильтруемой жидкости (вязкость $\eta_{\text{ж}}$, плотность $\rho_{\text{ж}}$), структурных параметров пористого материала (средний диаметр пор d_{cp}), так и гидродинамических параметров фильтрации – скорости $V_{\text{п}}$ потока в порах. Число Шервуда определяется следующим образом [1]:

$$\text{Sh} = \begin{cases} 0,664 \sqrt[3]{\text{Sc}} \sqrt{\text{Re}}, & \text{Re} < \text{Re}_{\text{кр}}, \\ 0,380 \sqrt[5]{\text{Sc}^2} \sqrt[5]{\text{Re}^4}, & \text{Re} > \text{Re}_{\text{кр}}, \end{cases} \quad (83)$$

где

$$\text{Sc} = \frac{\eta_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} D_f}, \quad (84)$$

$$\text{Re} = \frac{V_{\text{п}} d_{\text{cp}} \rho_{\text{ж}}}{\eta_{\text{ж}}} = \frac{V_{\text{ф}} d_{\text{cp}} \rho_{\text{ж}}}{\Pi \eta_{\text{ж}}}. \quad (85)$$

Для того чтобы корректно воспользоваться уравнением (83), на рис. 18 приведены значения $\text{Re}_{\text{кр}}$, рассчитанные в работе [11] для пористых проницаемых материалов различной природы.

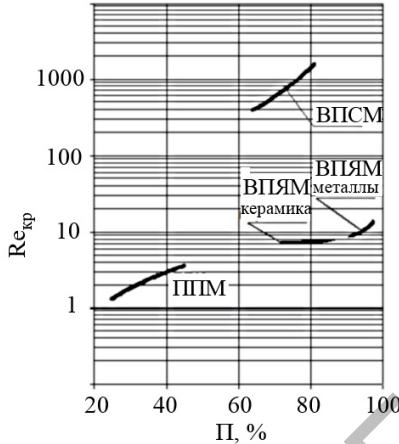


Рис. 18. Графики зависимости критического числа Рейнольдса от пористости для пористых материалов различной природы

Проиллюстрируем полученные уравнения, описывающие глубинный механизм фильтрования, на примере фильтров из пористых порошковых материалов, образованных сферическими частицами, для которых величина удельной поверхности равна [2]

$$S_v = \frac{4\Pi}{d_{cp}}. \quad (86)$$

С учетом уравнений (82)–(115), уравнение (70) можно представить в следующем виде:

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{H_3}{\lambda_3}\right), \quad (87)$$

где λ_3 – глубина проникновения, м:

$$\lambda_3 = \begin{cases} \frac{d_{cp}}{2,656 \cdot \Pi D_f} \sqrt{\frac{V_\phi d_{cp}}{\Pi}} \sqrt[6]{\frac{D_f^2 \eta_{ж}}{\rho_{ж}}}, & \text{Re} < \text{Re}_{кр}, \\ \frac{d_{cp}}{1,520 \cdot \Pi D_f} \sqrt[5]{\frac{V_\phi d_{cp}}{\Pi}} \sqrt[5]{\frac{D_f^2 \eta_{ж}^2}{\rho_{ж}^2}}, & \text{Re} > \text{Re}_{кр}, \end{cases} \quad (88)$$

Уравнения (87), (88) позволяют рассчитать степень очистки жидкости в зависимости от параметров пористого фильтра ($d_{\text{ср}}, \Pi, B, H$), жидкости ($\eta_{\text{ж}}, \rho_{\text{ж}}, D_f$), режимов фильтрации (соотношение $\text{Re}/\text{Re}_{\text{кр}}$, которое для конкретной структуры фильтра и конкретного фильтрата определяется значением $V_{\text{ф}}$).

Однако существует еще один параметр, от которого зависит степень очистки – диаметр частиц загрязнений d_3 , точнее, соотношение диаметра частиц загрязнений и среднего диаметра пор $d_{\text{ср}}$. Степень очистки в этом случае описывается следующим уравнением:

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda_4}\right), \quad (89)$$

где λ_4 – коэффициент фильтрования для пористых проницаемых материалов, определяемый как его структурными параметрами (D, Π), так и размером частиц загрязнений, точнее, отношением d_3/D . Для пористых порошковых материалов с размером порошка D и пористостью Π коэффициент фильтрования рассчитывается по уравнению (45):

$$\lambda_4 = \frac{2\Pi D}{3(1-\Pi)\alpha\eta_0(D, d_3)}, \quad (90)$$

где α – вероятность «прилипания» частиц загрязнений в результате столкновения с пористым каркасом;

$\eta(D, d_3)$ – вероятность столкновения частиц загрязнений с пористым каркасом (см. уравнения (47)–(51)).

Объединив уравнения (87)–(90), можно получить уравнение, позволяющее рассчитать степень очистки в зависимости как от параметров пористого фильтровального элемента, так и параметров фильтрата, в первую очередь, от соотношения $d/d_{\text{ср}3}$, режимов фильтрации ($\text{Re}/\text{Re}_{\text{кр}}$):

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{H_0}{\lambda}\right), \quad (91)$$

где $\lambda = \sqrt{\lambda_3 \cdot \lambda_4}$ – обобщенная глубина проникновения, м.

В итоге уравнение (91), совместно с уравнениями (88), (90), описывающее механизм глубинного фильтрования, дает возможность рассчитать степень очистки ψ в зависимости от размера частиц загрязнений d для фильтров различной конфигурации (D, d_{cp}, Π, B, H_0), жидкостей различной природы ($\eta_{ж}, \rho_{ж}, D_f$), различных режимов фильтрации ($Re/Re_{кр}$), но при условии: $d \ll d_{cp3}$.

Графики, полученные на основе расчетов по уравнению (91), иллюстрируют зависимость степени очистки от толщины фильтра, скорости фильтрации, среднего размера пор фильтровального элемента и размера частиц загрязнений. Все расчеты выполнены для глубинного фильтра, изготовленного спеканием свободно насыпанных сферических частиц, используемого для очистки моторного масла марки М14Г2ЦС при значении температуры 100 °С. Для расчета приняты следующие параметры фильтровального элемента и очищаемой жидкости: $\Pi_3 = 0,4$; $B_3 = 1,3$; $D_f = 2 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$; $\alpha = 1$; $\eta_{ж} = 0,0119 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\rho_{ж} = 851 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\sigma_{ж} = 0,045 \text{ Н}/\text{м}$ [16]. Примем, что диапазон размеров частиц загрязненного моторного масла составляет 0,1–100 мкм.

Постановка задачи: очистить загрязненное моторное масло через глубинный фильтровальный элемент. Степень очистки для частиц с размером 1 мкм должна быть не менее 99,5 %. На рис. 19 представлен график зависимости степени очистки моторного масла от толщины глубинного фильтровального элемента, рассчитанной по уравнению (91).

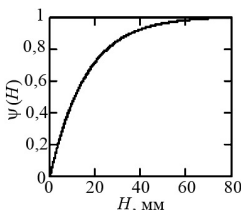


Рис. 19. График зависимости степени очистки моторного масла от толщины глубинного фильтра:

$$d = 1 \text{ мкм}; V_{\phi} = 0,01 \text{ м}/\text{с}; d_{cp} = 40 \text{ мкм}; \psi(20 \text{ мм}) = 76,7 \text{ \%};$$

$$\psi(40 \text{ мм}) = 97,2 \text{ \%}; \psi(60 \text{ мм}) = 99,5 \text{ \%}$$

Из данных (рис. 19) следует, что для требуемой степени очистки $\psi = 99,5\%$ (для частиц загрязнений размером 1 мкм) толщина фильтра должна быть более 60 мм.

На рис. 20 представлен график зависимости степени очистки моторного масла от скорости фильтрации, рассчитанной по уравнению (91).

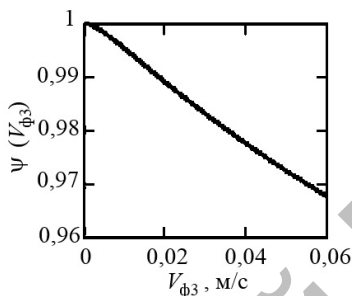


Рис. 20. График зависимости степени очистки моторного масла от скорости фильтрации через глубинный фильтр:

$d = 1$ мкм ; $H_3 = 60$ мм ; $d_{cp} = 40$ мкм ; $\psi(0,06 \text{ м/с}) = 96,8\%$;

$\psi(0,03 \text{ м/с}) = 98,3\%$; $\psi(0,01 \text{ м/с}) = 99,5\%$

Как и следовало ожидать, с увеличением скорости фильтрации степень очистки падает (рис. 20). Требуемая степень очистки $\psi = 99,5\%$ достигается при скорости фильтрации $V_{\phi_3} = 0,01 \text{ м/с}$ (не более), что соответствует удельной производительности процесса очистки $U = V_{\phi_3} / H_3 = 0,167 \text{ с}^{-1} = 600 \text{ ч}^{-1}$ (см. уравнение (76)). Если объем фильтра $V_3 = 1 \text{ л}$, то $Q = U V_3 = 600 \text{ ч}^{-1} \cdot 1 \text{ л} = 600 \text{ л/ч} = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На рис. 21 представлен график зависимости степени очистки моторного масла от среднего диаметра пор фильтра, из данных которого следует, что для обеспечения степени очистки моторного масла 99,5 % (от частиц загрязнений менее 1 мкм) средний размер пор фильтра должен быть менее 40 мкм. Однако уменьшение среднего диаметра пор до 35 мкм, хотя и повысит тонкость очистки до 99,9 %, на 30 % увеличит перепад давления ($(40/35)^2 = 1,3$).

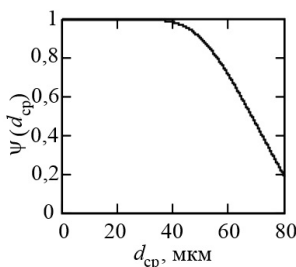


Рис. 21. График зависимости степени очистки моторного масла от среднего диаметра пор глубинного фильтра:
 $d = 1$ мкм ; $V_{\phi 3} = 0,01$ м/с ; $H_3 = 60$ мм ; $\psi(45$ мкм) = 98,4 % ;
 $\psi(40$ мкм) = 99,5 % ; $\psi(35$ мкм) = 99,9 %

На рис. 22 представлен график зависимости степени очистки моторного масла от диаметра частиц загрязнений.

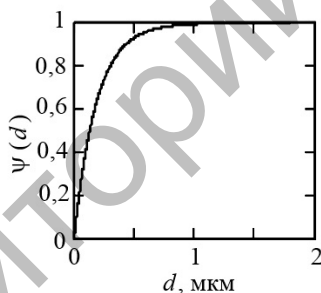


Рис. 22. График зависимости степени очистки моторного масла от диаметра частиц загрязнений:
 $d_{cp} = 40$ мкм ; $V_{\phi 3} = 0,01$ м/с ; $H_3 = 60$ мм ; $\psi(0,5$ мкм) = 93,2 % ;
 $\psi(1,0$ мкм) = 99,5 % ; $\psi(1,5$ мкм) = 99,98 %

Данные рис. 22 показывают, как степень очистки изменяется в зависимости от диаметра частиц загрязнений. Так, степень очистки от частиц диаметром 1,5 мкм – 99,98 %, однако аналогичный показатель для частиц диаметром 0,5 мкм – 93,2 %. Используя зависимость $\psi(d_3)$, можно рассчитать гранулометрический состав очищенного фильтра.

Таким образом, варьируя толщиной и средним размером пор глубинного фильтра, удельной скоростью фильтрации, можно сконструировать фильтровальный элемент с глубинным механизмом фильтрования. Установлено, что при очистке жидкости от частиц загрязнений диаметром 1–5 мкм основным механизмом, вызывающим «прилипание» частиц загрязнений к внутренней поверхности фильтрующего элемента, является прямое столкновение и седиментация (уравнения (47), (49)).

3.5. Динамическое моделирование процесса объемного фильтрования с учетом осаждения частиц загрязнений в поровом пространстве

Существенным недостатком глубинных фильтров при любой конструкции порового пространства является относительно небольшой ресурс работы, вызванный ограниченностью этого пространства, так как в процессе фильтрования оно постепенно забивается частицами загрязнений. Ресурс работы глубинного фильтра существенно снижается из-за неравномерного осаждения частиц загрязнений, особенно если это осаждение происходит в первых слоях фронтальной поверхности. Равномерное осаждение частиц загрязнений по глубине фильтра несколько увеличивает ресурс его работы. В процессе глубинного формирования пористость и диаметр пор постепенно уменьшаются до полного закупоривания, в результате скорость фильтрования стремится к нулю, если $\Delta P = \text{const}$. Поэтому для корректного определения ресурса работы фильтра с глубинным механизмом формирования необходимо изучить этот процесс методом динамического моделирования. Исходные данные для расчета: механизм фильтрования – глубинный; пористость фильтра $\Pi_3(t)$, коэффициент извилистости $B_3 = \text{const}$, средний диаметр пор $d_{\text{ср}3}(t)$, вязкостный коэффициент проницаемости $k_{\mu 3}(t)$, толщина фильтра $H_3 = \text{const}$, фронтальная поверхность фильтра $S_3 = \text{const}$, скорость фильтрования $V_{\text{ф}3}(t)$, перепад давления на фильтровальном элементе $\Delta P = \text{const}$ (м).

Динамическое моделирование процесса глубинного фильтрования будет сделано при следующих предположениях: 1) через глубинный фильтр проходит моторное масло, содержащее твердые частицы загрязнений, объемная концентрация которых C_3 . Его параметры подобраны так, что на выходе концентрация частиц загрязнений γC_3 (например $\gamma = 0,05$). Размеры твердых частиц загрязнений для оценки ресурса работы глубинного фильтра не имеют значения, если выполняются следующие условия $d \ll d_{\text{ср}3}$ и $\alpha = 1$ (все частицы загрязнений после столкновения с внутренней поверхностью фильтра «прилипают» к ней, причем пористость адсорбированного («налипшего») слоя равна $\Pi_4 = \text{const}$); 2) глубинный фильтр представляет собой фильтр, структурные параметры которого (толщина и средний размер каждого слоя) подобраны так, что оседание твердых частиц загрязнений происходит в нем равномерно по глубине фильтра и описывается линейным уравнением

$$C_3(x) = C_3 \left[1 - (1 - \gamma) \frac{x}{H_3} \right], \quad (92)$$

из которого следует, что $C_3(0) = C_3$; $C_3(H_3) = \gamma C_3$.

В начальный момент времени $t = 0$ структурные параметры порового пространства глубинного фильтра, образуемого сферическими частицами диаметром D_3 , следующие: пористость $\Pi_3(0)$, средний диаметр пор в начальный момент $d_{\text{ср}3}(0)$, вязкостный коэффициент проницаемости в начальный момент $k_{\mu 3}(0)$, скорость фильтрации в начальный момент времени $V_{\text{ф}3}(0)$ определяется перепадом давления $\Delta P_3 = \text{const}$, приложенного к фильтровальному элементу. Структура пористого проницаемого материала адекватно описывается либо идеальной моделью (система N_3 искривленных цилиндрических каналов со средним диаметром $d_{\text{ср}3}(0)$), либо моделью фиктивного грунта (упаковка частиц сферической формы одного диаметра D_3). Все названные параметры связаны между собой следующими образом:

$$d_{\text{cp}3}(0) = \frac{2\Pi_3(0)D_3}{3(1-\Pi_3(0))}, \quad (93)$$

$$V_{\Phi 3}(0) = \frac{k_{\mu 3}(0) \Delta P_3}{\mu_{\text{ж}} H_3}, \quad (94)$$

$$k_{\mu 3}(0) = \frac{\Pi_3(0) d_{\text{cp}3}^2(0)}{32 B_3^3} = \frac{\Pi_3^3(0) D_3^2}{72 (1-\Pi_3(0))^2 B_3^2}, \quad (95)$$

$$\frac{\pi d_{\text{cp}3}^2(0) H_3 N_3}{4} = \Pi_3(0) H_3 S_3 \rightarrow N_3 = \frac{4 \Pi_3(0) S_3}{\pi d_{\text{cp}3}^2(0)}, \quad (96)$$

$$\frac{\pi d_{\text{cp}3}^2(t) H_3 N_3}{4} = \Pi_3(t) H_3 S_3 \rightarrow N_3 = \frac{4 \Pi_3(t) S_3}{\pi d_{\text{cp}3}^2(t)}, \quad (97)$$

причем перепад давления на фильтровальном элементе, его толщина, коэффициент извилистости и число пор остаются постоянными в течение всего процесса фильтрования: $\Delta P_3 = \text{const}$, $H_3 = \text{const}$, $B_3 = \text{const}$, $N_3 = \text{const}$, $\Pi_3 = \text{const}$.

Рассмотрим фильтровальный элемент в момент времени t , когда структурные параметры фильтрующего элемента равны $k_{\mu 3}(t)$, $d_{\text{cp}3}(t)$, $\Pi_3(t)$, скорость фильтрации $V_{\Phi 3}(t)$. Следует отметить, что при условии $\Delta P_3 = \text{const}$ перечисленные выше параметры со временем уменьшаются, так как в процессе фильтрования жидкости происходит осаждение твердых частиц загрязнений на стенках поровых каналов, в результате чего уменьшаются их размеры («зарастание»). Уменьшение диаметра пор приводит к уменьшению пористости и вязкостного коэффициента проницаемости, что приводит к уменьшению скорости фильтрации. Пористость, вязкостный коэффициент проницаемости и скорость фильтрации в момент времени t равны:

$$\Pi_3(t) = \frac{\pi d_{\text{cp}3}^2(t) N_3}{4 S_3}, \quad (98)$$

$$k_{\mu 3}(t) = \frac{\Pi_3(t) d_{\text{cp}3}^2(t)}{32 B_3^2}, \quad (99)$$

$$\Delta P_3 = \mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}3}(t) \cdot \frac{H_3}{k_{\mu 3}(t)} = \mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}3}(t) \cdot \frac{H_3 \cdot 32 B_3^2}{\Pi_3(t) \cdot d_{\text{cp}3}^2(t)}. \quad (100)$$

Уравнение (100) содержит три параметра, изменяющихся в процессе глубинного фильтрования: $V_{\text{ф}3}(t)$, $\Pi_3(t)$, $d_{\text{cp}3}(t)$. Однако независимым параметром является только один – $d_{\text{cp}3}(t)$, от него однозначно зависят два других параметра: $V_{\text{ф}3}(t)$, $\Pi_3(t)$. Поэтому для составления дифференциального уравнения, позволяющего математически смоделировать процесс глубинного фильтрования, необходимо найти взаимосвязь этих параметров.

Рассмотрим момент времени $t + dt$. Тогда за время dt диаметр поровых каналов уменьшится на dd_{cp} (пристеночный слой $dd_{\text{cp}}/2$, буква d в данном выражении означает дифференциал). За это время на стенах пор осядет объем частиц загрязнений, равный (с учетом уравнений (97)):

$$\pi d_{\text{cp}3}(t) (1 - \Pi_4) H_3 \frac{dd_{\text{cp}3}}{2} N_3 = -V_{\text{ф}3}(t) S_3 C_3 (1 - \gamma) dt, \quad (101)$$

$$\pi d_{\text{cp}3}(t) (1 - \Pi_4) H_3 \frac{dd_{\text{cp}3}}{2} \frac{4 \Pi_3(t) S_3}{\pi d_{\text{cp}3}^2(t)} = -V_{\text{ф}3}(t) S_3 C_3 (1 - \gamma) dt, \quad (102)$$

$$2(1 - \Pi_4) H_3 \Pi_3(t) \frac{dd_{\text{cp}3}}{d_{\text{cp}3}(t)} = -V_{\text{ф}3}(t) C_3 (1 - \gamma) dt, \quad (103)$$

$$V_{\text{ф}3}(t) = - \left(\frac{2 H_3 (1 - \Pi_4) \Pi_3(t)}{C_3 (1 - \gamma) d_{\text{cp}3}(t)} \right) \frac{dd_{\text{cp}3}}{dt}. \quad (104)$$

Подставляя уравнение (104) в уравнение (100), получаем дифференциальное уравнение, описывающее изменение среднего диаметра пор в зависимости от времени в процессе глубинного фильтрования:

$$\frac{dd_{cp}}{d_{cp}^3(t)} = -\frac{\Delta P_3 C_3 (1-\gamma) dt}{64 \mu_{ж} (1-\Pi_4) B_3^2 H_3^2}, \quad (105)$$

$$\int_{d_{cp3}(0)}^{d_{cp3}(t)} \frac{dd_{cp3}}{d_{cp3}^3(t)} = -\frac{\Delta P_3 C_3 (1-\gamma)}{64 \mu_{ж} (1-\Pi_4) B_3^2 H_3^2} \int_0^t dt, \quad (106)$$

$$-\frac{1}{2 d_{cp3}^2(t)} + \frac{1}{2 d_{cp3}^2(0)} = -\frac{\Delta P_3 C_3 (1-\gamma) t}{64 \mu_{ж} (1-\Pi_4) B_3^2 H_3^2}, \quad (107)$$

$$d_{cp3}(t) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{d_{cp}^2(0)} + \frac{\Delta P_3 C_3 (1-\gamma) t}{32 \mu_{ж} (1-\Pi_4) B_3^2 H_3^2}}}, \quad (108)$$

$$d_{cp3}(t) = \frac{d_{cp3}(0)}{\sqrt{1 + \frac{d_{cp3}^2(0) \Delta P_3 C_3 (1-\gamma) t}{32 \mu_{ж} (1-\Pi_4) B_3^2 H_3^2}}} = \frac{d_{cp3}(0)}{\sqrt{1 + \frac{k_{\mu3}(0) \Delta P_3 C_3 (1-\gamma) t}{\mu_{ж} \Pi_3(0) (1-\Pi_4) H_3^2}}}. \quad (109)$$

Введем новое обозначение t_3 (с учетом уравнения (94)):

$$t_3 = \frac{\mu_{ж} \Pi_3(0) (1-\Pi_4) H_3^2}{k_{\mu3}(0) \Delta P_3 C_3 (1-\gamma)} = \frac{\Pi_3(0) (1-\Pi_4) H_3}{C_3 (1-\gamma) V_{\phi3}(0)}, \quad (110)$$

$$d_{cp3}(t) = \frac{d_{cp3}(0)}{\sqrt{1+t/t_3}}, \quad (111)$$

$$\Pi_3(t) = \frac{\pi d_{cp3}^2(t) N_3}{4S_3} = \frac{\pi}{4S_3} \frac{d_{cp3}^2(0)}{1+t/t_3} \frac{4\Pi_3(0)S_3}{\pi d_{cp3}^2(0)} = \frac{\Pi_3(0)}{1+t/t_3}, \quad (112)$$

$$k_{\mu3}(t) = \frac{\Pi_3(t) d_{cp3}^2(t)}{32B_3^2} = \frac{\Pi_3(0)}{1+t/t_3} \frac{1}{32B_3^2} \frac{d_{cp3}^2(0)}{1+t/t_3} = \frac{k_{\mu3}(0)}{(1+t/t_3)^2}, \quad (113)$$

$$V_{\phi 3}(t) = \frac{k_{\mu 3}(t) \cdot \Delta P_3}{\mu_{\text{ж}} H_3} = \frac{k_{\mu 3}(0)}{(1+t/t_3)^2} \cdot \frac{\Delta P_3}{\mu_{\text{ж}} H_3} = \frac{V_{\phi 3}(0)}{(1+t/t_3)^2}. \quad (114)$$

Уравнения (111)–(114) показывают, что средний размер пор, пористость, вязкостный коэффициент проницаемости, скорость фильтрации в процессе фильтрования изменяются со временем. Но перепад давления на глубинном фильтровальном элементе должен оставаться постоянным. Проверим это утверждение.

$$\Delta P_3(t) = \frac{\mu_{\text{ж}} V_{\phi 3}(t) H_3}{k_{\mu 3}(t)} = (\mu_{\text{ж}} H_3) \frac{\frac{V_{\phi 3}(0)}{(1+t/t_3)^2}}{\frac{k_{\mu 3}(0)}{(1+t/t_3)^2}} = \frac{\mu_{\text{ж}} V_{\phi 3}(0) H_3}{k_{\mu 3}(0)} = \Delta P_3 = \text{const}, \quad (115)$$

что и требовалось доказать.

На рис. 23–26 приведены графические зависимости $d_{\text{ср}3}(t)$, $\Pi_3(t)$, $k_{\mu 3}(t)$, $V_{\phi 3}(t)$ от времени при следующих параметрах глубинного фильтра и очищаемой жидкости: $d_{\text{ср}3}(0) = 40 \cdot 10^{-6}$ м; $\Pi_3(0) = \Pi_4 = 0,4$; $H_3 = 0,010$ м; $B_3 = 1,3$; $\mu_{\text{ж}} = 0,0119$ Па·с; $C_3 = 10^{-6}$; $\gamma = 0,05$; $V_{\phi 3}(0) = 0,001$ м/с.

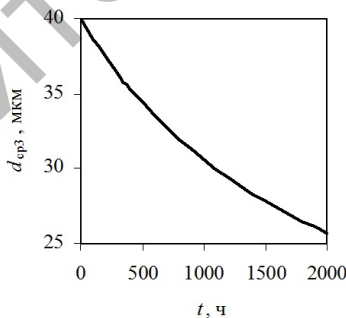


Рис. 23. График зависимости среднего размера пор глубинного фильтровального элемента от времени фильтрования

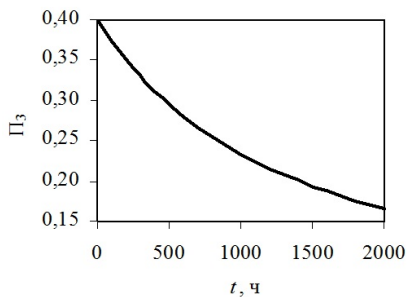


Рис. 24. График зависимости пористости глубинного фильтровального элемента от времени фильтрования

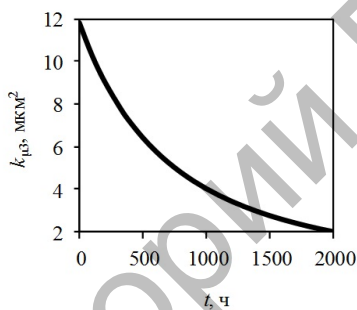


Рис. 25. График зависимости вязкостного коэффициента проницаемости глубинного фильтровального элемента от времени фильтрования

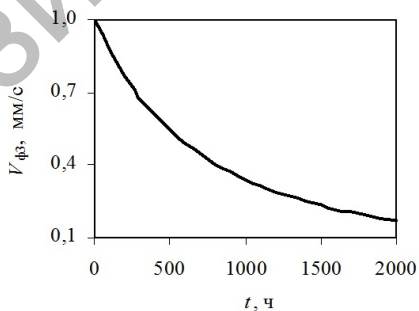


Рис. 26. График зависимости скорости фильтрации глубинного фильтровального элемента от времени фильтрования ($\Delta P_3 = \text{const}$)

Прежде, чем интерпретировать данные (рис. 23–26), оценим величину t_3 :

$$t_3 = \frac{\Pi_3(0)(1-\Pi_4)H_3}{V_{\Phi 3}(0)C_3(1-\gamma)} = \frac{0,4 \cdot (1-0,4) \cdot 0,01}{10^{-3} \cdot 10^{-6} \cdot (1-0,05)} = 2,53 \cdot 10^6 \text{ с} = 702 \text{ ч} .$$

Если увеличить начальную скорость фильтрации до $V_{\Phi 3}(0) = 0,01$ м/с, а начальную концентрацию до $C_3 = 10^{-5}$, то $t_3 = 2,526 \cdot 10^4 \text{ с} = 7,0 \text{ ч} .$

Если $t \ll t_3$, то

$$d_{\text{ср}3}(t) = \frac{d_{\text{ср}3}(0)}{\sqrt{1+t/t_3}} = d_{\text{ср}3}(0)(1-t/2t_3), \quad (116)$$

$$\Pi_3(t) = \frac{\Pi_3(0)}{1+t/t_3} = \Pi_3(0)(1-t/t_3), \quad (117)$$

$$k_{\mu 3}(t) = \frac{k_{\mu 3}(0)}{(1+t/t_3)^2} = k_{\mu 3}(0)(1-2t/t_3), \quad (118)$$

$$V_{\Phi 3}(t) = \frac{V_{\Phi 3}(0)}{(1+t/t_3)^2} = V_{\Phi 3}(0)(1-2t/t_3). \quad (119)$$

Формулы (116)–(119) выведены для идеальной структуры пористой среды. Очевидно, что уменьшение $d_{\text{ср}3}(t)$, $k_{\mu 3}(t)$, $V_{\Phi 3}(t)$ в пористых материалах, имеющих реальную, менее совершенную поровую структуру, будет еще более значительным, нежели то, что показано на рис. 23–26. Поэтому предельное значение величины «зарастания» пор, которое определяет ресурс работы фильтровального элемента, может быть принято только после сравнения теоретических и экспериментальных данных.

На основании данных (уравнение (114)), за ресурс работы фильтровального элемента R целесообразно принять время, при котором скорость фильтрации уменьшается в k раз. Из уравнения (114) следует, что

$$\frac{V_{\phi 3}(0)}{k} = \frac{V_{\phi 3}(0)}{(1+R/t_3)^2}, \quad (120)$$

$$R = t_3(\sqrt{k} - 1). \quad (121)$$

Ресурс работы глубинного фильтровального элемента для $t_3 = 702$ ч и $k = 2$ равен 291 ч. Если за критическое условие принять равенство $k = 3$, то $R = 514$ ч.

Приведем уравнение (121) в полном виде, с учетом уравнения (110):

$$R = \frac{\mu_{\text{ж}} \Pi_3(0) (1 - \Pi_4) H_3^2 (\sqrt{k} - 1)}{k_{\mu 3}(0) \Delta P_3 C_3 (1 - \gamma)} = \frac{\Pi_3(0) (1 - \Pi_4) H_3 (\sqrt{k} - 1)}{C_3 (1 - \gamma) V_{\phi 3}(0)}. \quad (122)$$

Уравнение (122), позволяющее оценить ресурс работы глубинного фильтра, получено впервые и является эффективным инструментом при создании фильтровальных систем нового поколения. Следует подчеркнуть, что необходимым условием применения уравнения (122) для оценки ресурса работы фильтрующего элемента является равномерное осаждение твердых частиц загрязнений по его глубине. Изменение концентрации частиц загрязнений по глубине фильтрующего элемента, например, по уравнению $C(x) = C_0 \exp(-x/\lambda)$ (см. уравнение (42)), приведет к значительному снижению ресурса работы фильтрующего элемента, так как в процессе фильтрования, в первую очередь, происходит интенсивная «забивка» пор фронтальной поверхности. Поэтому при создании фильтровальных систем с повышенным ресурсом работы необходимо, чтобы структура порового пространства обеспечивала равномерное осаждение частиц загрязнений по глубине фильтровального элемента.

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИЗ ПОРИСТЫХ ПРОНИЦАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМ И ОБЪЕМНЫМ МЕХАНИЗМАМИ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Анализируя расчетные данные исследований по очистке жидкостей, обладающих широким спектром физико-механических свойств через моноструктурные системы, работающие только по одному механизму фильтрования (мембранный или глубинный), можно сделать вывод о том, что и те и другие обладают как достоинствами, так и недостатками.

Так, например, очистка моторного масла с высокой степенью и тонкостью очистки через мембранные фильтровальные элементы требует большого перепада давления, зачастую нереализуемого на практике. Использование фильтров с глубинным механизмом фильтрования эффективно только в том случае, если в очищаемой жидкости, которая проходит через него, «отсечены» примесные частицы, размер которых больше, по крайней мере, $d_{cp}/5$. В противном случае в глубинном фильтре быстро забиваются первые фронтальные слои, и он переходит в разряд мембранных с небольшим размером пор.

И поэтому фильтры с глубинным механизмом фильтрования, если на них направить очищаемую жидкость с широким спектром частиц загрязнений, имеют относительно низкий ресурс работы.

4.1. Сравнительный анализ пористых проницаемых элементов с поверхностным и объемным механизмами фильтрования

В результате теоретических исследований, выполненных в 2 и 3 главах настоящей работы, было установлено, что перепад давления на фильтрах, работающих по мембранному механизму фильтрования, описывается уравнением (инерционным, входным и выходным сопротивлением можно пренебречь):

$$\Delta P = \frac{4\sigma_{ж}}{d_{cp2}} + \frac{32\eta_{ж}B_2V_{\phi_2}H_2}{\Pi_2 d_{cp2}^2}, \quad (123)$$

Перепад давления ΔP на мембранном фильтровальном элементе при тонкости очистки $a = 1$ мм равен 11,7 МПа, степень очистки $\psi = 100$ %. Степень и тонкость очистки фильтров, работающих по глубинному механизму фильтрования, описываются уравнениями:

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{H_3}{\sqrt{\lambda_3 \lambda_4}}\right), \quad (124)$$

где λ_3 и λ_4 – коэффициенты фильтрования, м:

$$\lambda_3 = \begin{cases} \frac{d_{cp2}}{2,656 \cdot B_3 \Pi_3 D_f} \sqrt{\frac{V_{\phi 3} d_{cp3}}{\Pi_3}} \sqrt[6]{\frac{D_f^2 \eta_{ж}}{\rho_{ж}}}, & Re < Re_{кр}, \\ \frac{d_{cp2}}{1,520 \cdot B_3 \Pi_3 D_f} \sqrt[5]{\frac{V_{\phi} d_{cp2}}{\Pi_3}} \sqrt[5]{\frac{D_f^2 \eta_{ж}^2}{\rho_{ж}^2}}, & Re > Re_{кр}, \end{cases} \quad (125)$$

$$\lambda_4 = \frac{2 \Pi_3 D_3}{3(1 - \Pi_3) \alpha_{w_{пр.ст}}(d_3, D_3)}. \quad (126)$$

Исключить недостатки моноструктурных систем можно путем конструирования комбинированных систем очистки.

Рассмотрим два типа систем: 1) моносистему, состоящую только из мембранного фильтровального элемента с размером пор $d_{cp2} = 1$ мкм и толщиной $H_2 = 1$ мм; 2) комбинированную систему, состоящую из мембранного фильтра предварительной очистки с размером пор $d_{cp2} = 10$ мкм и толщиной $H_2 = 1$ мм и глубинного фильтровального элемента с размером пор $d_{cp3} = 40$ мкм и толщиной $H_3 = 60$ мм (рис. 27). Все пористые элементы изготовлены из пористых порошковых материалов, полученных спеканием свободно насыпанных сферических порошков.

Исходные данные для расчета: $\Pi_2 = 0,4$, $B_2 = 1,1$; $d_{cp2} = 10$ мкм ;
 $H_2 = 1$ мм ; $T = 100$ °С ; $\rho_{ж} = 851$ кг/м³; $\eta_{ж} = 0,0119$ Па·с ;
 $\sigma_{ж} = 0,045$ Н/м ; $V_{\phi} = 0,005$ м/с ; $\Pi_3 = 0,4$; $B_3 = 1,3$; $d_{cp3} = 40$ мкм ;
 $H_3 = 60$ мм .

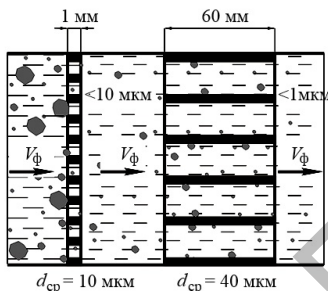


Рис. 27. Схема очистки жидкости на комбинированном фильтре

Результаты расчета показали, что при очистке моторного масла перепад давления на моноструктурной системе, состоящей только из мембранного фильтровального элемента, который гарантирует полную очистку фильтрата от всех частиц загрязнений с тонкостью очистки 1 мкм, составляет $\Delta P = 5,9$ МПа (см. табл. 1).

На комбинированной системе (см. рис. 27) перепад давления составил $\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 76 + 302 = 378$ кПа . Результаты расчета показывают, что в случае комбинированной системы перепад давления меньше, чем на моносистеме, в 43 раза, хотя результат очистки в обоих случаях одинаковый: максимальный размер частиц загрязнений в очищенном фильтрате – меньше 1 мкм, степень очистки – более 99,5 %.

4.2. Динамическое моделирование комбинированных фильтровальных систем

Постановка задачи. Через фильтровальную систему, состоящую из мембранного и глубинного фильтровальных элементов, проходит поток очищаемой жидкости, которая содержит в себе твердые частицы загрязнений двух размеров: большие – диаметром D и ма-

ленькие – диаметром d . Большие частицы задерживаются мембранным фильтровальным элементом (выполняется неравенство $D > d_{\max 2}$), а маленькие частицы, проходя сквозь образующийся в процесс фильтрования кейк-слой и мембрану (выполняются неравенства $d \ll D$, $d \ll d_{\text{cp}1}$, $d \ll d_{\text{cp}2}$), осаждаются в поровом пространстве глубинного фильтровального элемента. Перепад давления на фильтровальной системе в процессе фильтрования равен $\Delta P = \text{const}$. Необходимо рассчитать при этих условиях скорость фильтрации через фильтровальную систему.

Уравнение фильтрации очищаемой жидкости через комбинированную фильтровальную систему, состоящую из мембранного и глубинного фильтровальных элементов в момент времени t , имеет следующий вид:

$$\Delta P = \mu_{\text{ж}} V_{\phi}(t) \left(\frac{H_1(t)}{k_{\mu 1}} + \frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3}{k_{\mu 3}(t)} \right). \quad (127)$$

Рассмотрим момент времени $t + dt$. Тогда за время dt толщина кейк-слоя на мембранном фильтре вырастет на величину $dH_1(t)$, а диаметр поровых каналов в глубинном фильтре уменьшится на величину dd_{cp} (пристеночный слой $dd_{\text{cp}}/2$). За это время в фильтровальную систему войдет объем частиц загрязнений, равный

$$dV = V_{\phi}(t) S_1 C_1 dt + V_{\phi}(t) S_3 C_3 (1 - \gamma) dt. \quad (128)$$

В связи с тем, что поток частиц загрязнений разделяется на два независимых друг о друга потока (так как частицы загрязнений большого диаметра D взаимодействуют только с мембранным фильтровальным элементом, а частицы загрязнений малого диаметра d взаимодействуют только с глубинным фильтровальным элементом), уравнение (127), с учетом уравнений (35) и (114), можно записать в следующем виде:

$$\Delta P = \mu_{\text{ж}} V_{\phi}(t) \left(\frac{\frac{k_{\mu 1}}{k_{\mu 2}} H_2 (\sqrt{1+t/t_1} - 1)}{k_{\mu 1}} + \frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3 (1+t/t_3)^2}{k_{\mu 3}(0)} \right) =$$

$$= \mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}}(t) \left(\frac{H_2 \sqrt{1+t/t_1}}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3 (1+t/t_3)^2}{k_{\mu 3}(0)} \right). \quad (129)$$

Из уравнения (129) следует, что скорость фильтрования равна

$$V_{\text{ф}}(t) = \frac{\Delta P}{\mu_{\text{ж}} \left(\frac{H_2 \sqrt{1+t/t_1}}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3 (1+t/t_3)^2}{k_{\mu 3}(0)} \right)}. \quad (130)$$

В момент времени $t = 0$ (см. уравнение (130)) следует, что

$$\Delta P = \mu_{\text{ж}} V_{\text{ф}}(0) \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3}{k_{\mu 3}(0)} \right). \quad (131)$$

И поэтому уравнение (130) можно записать в следующем виде:

$$V_{\text{ф}}(t) = \frac{V_{\text{ф}}(0) \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3}{k_{\mu 3}(0)} \right)}{\left(\frac{H_2 \sqrt{1+t/t_1}}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3 (1+t/t_3)^2}{k_{\mu 3}(0)} \right)}. \quad (132)$$

$$t_1 = \frac{k_{\mu 1} (1 - \Pi_1) H_2}{2 k_{\mu 2} C_1 V_{\text{ф}}(0)}, \quad (133)$$

$$t_3 = \frac{\Pi_3 (1 - \Pi_4) H_3}{V_{\text{ф}}(0) C_3 (1 - \gamma)}. \quad (134)$$

Уравнения (132)–(134) позволяют рассчитать изменение скорости фильтрования через комбинированную фильтровальную систему, состоящую из мембранного и глубинного фильтровальных элементов.

На рис. 28 приведена графическая зависимость $V_{\text{ф}}(t)$ от времени при следующих параметрах мембранного и глубинного фильтровальных элементов, а также очищаемой жидкости:

– для кейк-слоя:

$$k_{\mu 1} = \frac{\Pi_1^3 D^2}{72(1-\Pi_1)^2 B_1^2} = 1,61 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2; \quad \Pi_1 = 0,4; \quad B_1 = 1,3;$$

– для мембранного фильтровального элемента:

$$k_{\mu 2} = \frac{\Pi_2 d_{\text{cp}2}^2}{32B_2^2} = 8,37 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2; \quad \Pi_2 = 0,4; \quad B_2 = 1,1; \quad H_2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$d_{\text{cp}2} = 90 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad d_{\text{max}2} = 101 \cdot 10^{-6} \text{ м};$$

– для глубинного фильтровального элемента:

$$k_{\mu 3}(0) = \frac{\Pi_3(0)d_{\text{cp}3}^2(0)}{32B_3^2} = 1,18 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2; \quad \Pi_3(0) = \Pi_4 = 0,40; \quad B_3 = 1,3;$$

$$d_{\text{cp}3}(0) = 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad H_3 = 0,01 \text{ м};$$

– для очищаемой жидкости $\Delta P = 10 \text{ кПа}$.

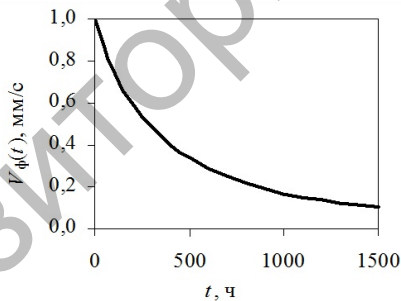


Рис. 28. График зависимости скорости фильтрации через комбинированную фильтровальную систему

Уравнение (132) позволяет рассчитать ресурс работы комбинированной фильтровальной системы. Также как и при расчете ресурса работы мембранного и глубинного фильтровальных элементов, за ресурс работы комбинированного фильтра R целесообразно принять время, при котором скорость фильтрации уменьшается в k раз. Из уравнения (132) следует, что

$$\frac{H_2 \sqrt{1 + R/t_1}}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3 (1 + R/t_3)^2}{k_{\mu 3}(0)} = k \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3}{k_{\mu 3}(0)} \right). \quad (135)$$

Численное решение уравнения (135) в виде $R = R(k)$ представлено на рис. 29. В частности, ресурс работы комбинированной системы $R(2) = 282$ ч, $R(3) = 506$ ч.

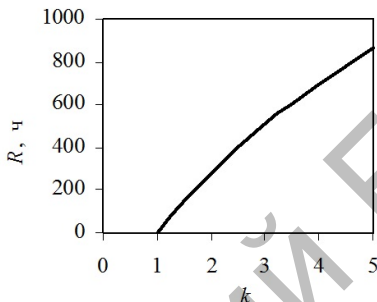


Рис. 29. График зависимости ресурса работы комбинированной системы от k

На рис. 30 представлен график зависимости ресурса работы комбинированной фильтровальной системы от концентрации частиц загрязнений $d_3 = 5$ мкм ($k = 2$).

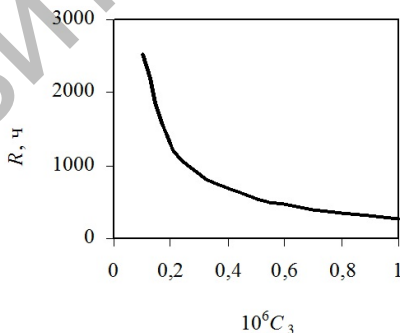


Рис. 30. График зависимости ресурса работы комбинированной фильтровальной системы от концентрации частиц загрязнений:

$$d_3 = 5 \text{ мкм } (k = 2), (D_1 = 105 \text{ мкм}, C_1 = 10^{-6})$$

На рис. 31 представлен график зависимости ресурса работы фильтровальной системы от концентрации частиц загрязнений диаметром $D_1 = 105$ мкм, из которых следует, что на ресурс работы комбинированной фильтровальной системы образование кейк-слоя практически не влияет. Ресурс работы системы, как следует из данных рис. 30, в значительной степени определяется динамикой осаждения мелких частиц в глубинном фильтре: $R(C_3 = 10^{-6}) = 283$ ч, $R(C_3 = 10^{-7}) = 2528$ ч.

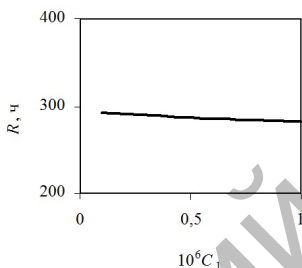


Рис. 31. График зависимости ресурса работы комбинированной фильтровальной системы от концентрации частиц загрязнений:

$$D_1 = 105 \text{ мкм } (k = 2), (d_3 = 5 \text{ мкм}, C_3 = 10^{-6})$$

В отличие от мелких частиц диаметром 5 мкм, большие частицы диаметром 105 мкм практически не оказывают влияния на ресурс работы: $R(10^{-7}) = 292$ ч, $R(10^{-5}) = 253$ ч. Объяснить этот эффект можно тем, что коэффициент проницаемости кейк-слоя, состоящий из частиц диаметром 105 мкм, со временем не меняется, так как размер пор и пористость кейк-слоя со временем постоянны. Напротив, размер пор и пористость глубинного фильтровального элемента, следовательно, и вязкостный коэффициент проницаемости, со временем из-за осаждения частиц загрязнений приводят к значительному уменьшению этих параметров, вплоть до полной закупорки пор.

На рис. 32 и 33 представлены временные графические зависимости перепада давления на мембранном и глубинном фильтровальных элементах (напомним, что сумма перепада давления на обоих элементах равна $\Delta P_1 + \Delta P_3 = \Delta P = \text{const}$).

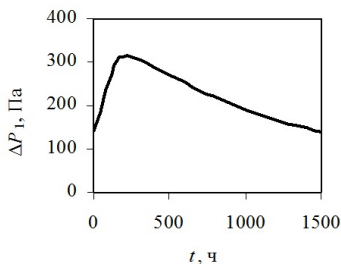


Рис. 32. График зависимости перепада давления на мембранном фильтровальном элементе комбинированной системы

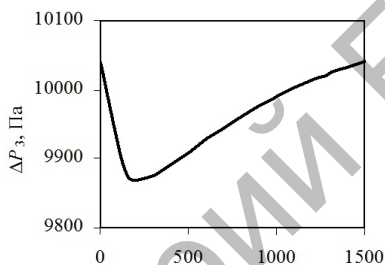


Рис. 33. График зависимости перепада давления на глубинном фильтровальном элементе комбинированной системы

Из данных, представленных на рис. 32, 33, видно, что для первых 180 ч работы перепад давления на мембранном фильтре вырастает на 150 Па, а на глубинном фильтровальном элементе падает на такую же величину. Временная зависимость свидетельствует о том, что образующийся кейк-слой в начальный период времени вносит бóльший вклад в увеличение перепада давления, чем осаждение частиц в объеме глубинного фильтра. Но через 180 ч картина меняется, так как бóльший вклад в перепад давления вносит процесс «зарастания» пор глубинного фильтра.

Уравнение (135) получено впервые и позволяет рассчитать ресурс работы комбинированной системы, состоящей из мембранного и глубинного фильтровальных элементов.

ГЛАВА 5. ТЕОРИЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПРИЕМЛЕМЫМ КОМПЛЕКСОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Цель, которую ставит перед собой разработчик при создании фильтровальных систем, заключается в том, чтобы разработанные системы обладали приемлемым комплексом эксплуатационных параметров, включая стоимость изготовления и эксплуатации. Только в этом случае фильтровальные системы могут найти широкое применение в народном хозяйстве. Выбор самого материала и его макро- и микроструктурных параметров, конструкционных размеров готового изделия, а также технологических режимов производства фильтровальных систем должен быть predetermined сформулированным комплексом эксплуатационных параметров.

Основная трудность при создании конкурентоспособных фильтровальных систем заключается в том, что эксплуатационные параметры такой системы являются, как правило, концептуально конфликтующими по своей природе. Например, тонкость очистки и производительность процесса, ресурс работы и стоимость. Из этого можно сделать вывод, что создание фильтрующей системы с заданным комплексом эксплуатационных параметров, сформулированным потребителем, не всегда возможно. Это действительно так, если потребитель задает нереализуемый комплекс эксплуатационных параметров. Например, требуется, чтобы ресурс работы фильтровальной системы был относительно большим, а ее стоимость – относительно низкой. Создание фильтровальной системы с требуемым комплексом эксплуатационных параметров возможно только при условии, что сформулированный потребителем комплекс таких параметров физически непротиворечив. Но и в этом случае создание наилучшей по свойствам фильтровальной системы (оптимальной) возможно только при достижении некоторого компромисса в соотношении параметров, характеризующих функционирование фильтровальной системы. В данной работе приемлемый компромисс находится методом многокритериальной оптимизации.

Для нахождения компромисса, позволяющего создать фильтрующую систему с приемлемым комплексом эксплуатационных параметров, необходимо выполнить следующие операции:

1) сформулировать комплекс требований рынка к очищенному фильтрату:

- тонкость очистки $a \leq a_0$ (м);
- степень очистки $\psi \geq \psi_0$ (%);
- производительность процесса Q (м³/с);

2) обосновать и выбрать техническое решение. Проведя исследования, авторы утверждают, что высокопроизводительная очистка технических жидкостей в агрессивных средах с высокими степенью и тонкостью очистки и высокой производительностью, относительно высоким ресурсом работы и низкой стоимостью одновременно может быть эффективно реализована в комбинированных системах, состоящих из мембранного фильтровального элемента (фильтр грубой очистки) и глубинного фильтровального элемента (фильтр тонкой очистки) из пористых проницаемых материалов.

3) сформулировать эксплуатационные требования к фильтрующей системе на базе рыночных требований к продукции:

- производительность процесса $Q \geq Q_0$ (м³/с);
- перепад давления $\Delta p \leq \Delta p_0$ (Па);
- ресурс работы $R \geq R_0$ (с);
- объем фильтрующей системы $V \leq V_0$ (м³);

4) выбрать систему независимых факторов, варьирование которыми определяет состояние фильтрующей системы: структурные факторы пористого материала, конструкционные размеры фильтрующей системы, режимные параметры для всех частей фильтрующей системы:

- для мембранного фильтровального элемента – $d_{cp2}, S_{\phi 2}, H_2$;
- для глубинного фильтровального элемента – $d_{cp3}, S_{\phi 3}, H_3$;
- режимные параметры – ΔP .

5) выбрать основные параметры оптимизации, которые всесторонне характеризуют функционирование фильтровальной системы, и создать модель эксплуатации фильтровальной системы – совокупность математических уравнений, отражающих зависимость параметров оптимизации от комплекса независимых факторов:

- толщина образующегося кейк-слоя

$$H_1(t) = \frac{k_{\mu 1}}{k_{\mu 2}} \cdot H_2 \left[\sqrt{1+t/t_1} - 1 \right]; \quad (136)$$

– скорость фильтрования через мембранный фильтровальный элемент, с учетом растущего кейк-слоя:

$$V_{\phi 1}(t) = \frac{V_{\phi 2}(0)}{\sqrt{1+t/t_1}}, \quad (137)$$

где
$$H_1(t) = \frac{k_{\mu 1} H_2}{k_{\mu 2}} \left[\sqrt{1+t/t_1} - 1 \right]; \quad (138)$$

– перепад давления на мембранном фильтровальном элементе

$$\Delta P_1 = \eta_{\text{ж}} V_{\phi 1}(0) \frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \rho_{\text{ж}} V_{\phi}^2(0) \frac{H_2}{k_{\rho 2}} + \frac{4\sigma_{\text{ж}}}{d_{\text{ср}2}} \left[1,16 + (1 - B_2 \Pi_2)^2 \right] \cdot \frac{\rho_{\text{ж}} B_2^2 V_{\phi 1}^2(0)}{2\Pi_2^2}; \quad (139)$$

– толщина очистки после мембраны $a = a_2 = d_{\text{макс}2}$; (140)

– ресурс работы мембранного фильтра $R_1 = (k^2 - 1)t_1$; (141)

– зависимости изменения параметров глубинного фильтровального элемента $d_{\text{ср}3}(t)$, $\Pi_3(t)$, $k_{\mu 3}(t)$, $V_{\phi}(t)$ от времени фильтрования:

$$d_{\text{ср}3}(t) = \frac{d_{\text{ср}3}(0)}{\sqrt{1+t/t_3}}; \quad (142)$$

$$\Pi_3(t) = \frac{\Pi_3(0)}{1+t/t_3}; \quad (143)$$

$$k_{\mu 3}(t) = \frac{k_{\mu 3}(0)}{(1+t/t_3)^2}; \quad (144)$$

$$V_{\phi}(t) = \frac{V_{\phi}(0)}{(1+t/t_3)^2}; \quad (145)$$

$$t_3 = \frac{2\Pi_3(0)(1 - \Pi_4)H_3}{V_{\phi 3}C_3(1 - \gamma)}; \quad (146)$$

– ресурс работы глубинного фильтра $R_3 = (\sqrt{k} - 1)t_3$; (147)

– перепад давления на глубинном фильтровальном элементе

$$\Delta P_2 = \eta_{ж} V_{\phi 0} \frac{H_{02}}{k_{\mu 02}} + \rho_{жс} V_{\phi 0}^2 \frac{H_{02}}{k_{\rho 02}} + \frac{4\sigma_{ж}}{d_{ср2}} + \left[1.16 + (1 - B_1 \Pi_1)^2 \right] \cdot \frac{\rho_{жс} B_2^2 V_{\phi 0}^2}{2\Pi_2^2}, \quad (148)$$

– степень и тонкость очистки глубинного волоконного фильтровального элемента:

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{H_3}{\sqrt{\lambda_3 \lambda_4}}\right), \quad (149)$$

$$\lambda_3 = \begin{cases} \frac{d_{ср3}}{2,656 \cdot B_3 \Pi_3 D_f} \cdot \sqrt{\frac{V_{\phi} \cdot d_{ср3}}{\Pi_2}} \cdot \sqrt{\frac{D_f^2 \cdot \eta_{ж}}{\rho_{ж}}}, & \text{Re} < \text{Re}_{кр}, \\ \frac{d_{ср2}}{1,520 \cdot B_3 \Pi_3 D_f} \cdot \sqrt[5]{\frac{V_{\phi} \cdot d_{ср3}}{\Pi_3}} \cdot \sqrt[5]{\frac{D_f^2 \cdot \eta_{ж}^2}{\rho_{ж}^2}}, & \text{Re} > \text{Re}_{кр}; \end{cases} \quad (150)$$

$$\lambda_4 = \frac{\pi \Pi_3 D_3}{4(1 - \Pi_3) \cdot \alpha \eta_0(d, D_3)}; \quad (151)$$

– зависимость изменения скорости комбинированного фильтровального элемента $V_{\phi}(t)$ от времени фильтрования:

$$V_{\phi}(t) = V_{\phi}(0) \cdot \frac{\left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3}{k_{\mu 3}(0)} \right)}{\left(\frac{H_2 \sqrt{1+t/t_1}}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3 (1+t/t_3)^2}{k_{\mu 3}(0)} \right)}. \quad (152)$$

$$t_1 = \frac{k_{\mu 1}(1 - \Pi_1)H_2}{2k_{\mu 2}C_1V_{\phi}(0)}, \quad (153)$$

$$t_3 = \frac{\Pi_3(1 - \Pi_4)H_3}{V_{\phi}(0)C_3(1 - \gamma)}. \quad (154)$$

Уравнения (152)–(154) позволяют рассчитать изменение скорости фильтрования через комбинированную фильтровальную систему, состоящую из мембранного и глубинного фильтровальных элементов:

– ресурс работы комбинированной фильтровальной системы:

$$\frac{H_2}{k_{\mu 2}} \cdot \sqrt{1 + R/t_1} + \frac{H_3}{k_{\mu 3}(0)} \cdot (1 + R/t_3)^2 = k \left(\frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{H_3}{k_{\mu 3}(0)} \right); \quad (155)$$

– производительность процесса очистки

$$Q(t) = S_{\phi} V_{\phi}(t); \quad (156)$$

– объем фильтрующей системы (косвенное отражение стоимости)

$$V_0 = S_2 H_2 + S_3 H_3. \quad (157)$$

В качестве целевой функции выберем $V_0 \rightarrow \min$.

Таким образом, если заданы параметры очищаемой жидкости ($\eta_{ж}, \rho_{ж}, D, f(d)$), то, варьируя структурными и конструктивными факторами пористых проницаемых элементов D, Π, B, H, S , а также гидродинамическим фактором – перепадом давления на фильтровальной системе ΔP , можно рассчитать и спроектировать оптимальную комбинированную фильтровальную систему, состоящую из нескольких фильтров с поверхностным и объемным механизмами фильтрования, которая позволит получить конечный продукт с требуемой производительностью и допустимыми степенью и тонкостью очистки.

Установлено, что комбинированные фильтровальные системы, состоящие из мембранных и глубинных фильтровальных элементов, позволяют повысить производительность процесса очистки, при снижении перепада давления на них, в 20–30 раз (по сравнению с моносистемами) при обеспечении тонкости очистки 1 мкм, степень очистки – более 99,5 %.

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ МОТОРНОГО МАСЛА НА ОСНОВЕ ПОРИСТЫХ ВОЛОКНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

6.1. Предварительная обработка экспериментальных данных

Эта глава является практической иллюстрацией алгоритма создания фильтровальных систем с требуемым комплексом эксплуатационных параметров методом системного моделирования и многокритериальной оптимизации. В качестве примера выполним разработку оптимальной фильтрующей системы для очистки моторного масла М14Г2ЦС в процессе обкатки двигателей внутреннего сгорания [13]. Под оптимальной фильтрующей системой понимается система, в которой методом многокритериальной оптимизации достигается компромисс конфликтующих между собой параметров: степень и тонкость очистки, производительность и ресурс работы, перепад давления и удельные эксплуатационные затраты при эксплуатации.

Специфика очистки моторного масла в процессе обкатки двигателей внутреннего сгорания заключается в том, что после капитального ремонта, в результате которого заменяют блок цилиндров и поршневую систему, большое количество узлов при сборке подвергается пескоструйной обработке, и в начальный момент времени приработки рабочих поверхностей в моторное масло поступает большое количество частиц загрязнений, гранулометрический состав которых находится в диапазоне 1–70 мкм [16]. Основная масса частиц загрязнений состоит из песка, плотность которого $\rho_0 = 2650 \text{ кг/м}^3$. Для того, чтобы эти частицы не вызвали нежелательный абразивный износ рабочих поверхностей, необходимо эффективно удалять из моторного масла все частицы загрязнений, размер которых более 8 мкм. В данном случае высокая тонкость очистки должна происходить при относительно высокой производительности очистки моторного масла.

Разработанные методы позволяют создавать фильтровальные системы на базе пористых проницаемых материалов всех пяти

классов: порошковых, волоконных, сетчатых, ячеистых и сотовых пористых проницаемых материалов. В предыдущих главах теория создания фильтровальных систем методом многокритериальной оптимизации математически иллюстрировалась, как правило, на примере пористых порошковых материалов. Однако пористые порошковые материалы в качестве фильтровальных материалов не всегда являются наилучшим вариантом. Например, хорошо известно, что очистка расплавов металлов эффективно реализуется через высокопористые ячеистые материалы из керамики. Для фильтровальных систем широкого применения часто используются пористые волоконные материалы, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с пористыми порошковыми материалами.

Выбор типа пористого проницаемого материала является неформализуемой задачей и опирается, в основном, на опыт и интуицию исследователей. В предлагаемом примере в качестве пористого материала выбран пористый волоконный материал, полученный из отходов кабельного производства [16]. Выбор пористого материала для создания фильтрующей системы и его функциональной структуры продиктован следующими соображениями:

- материал – медь, при значениях температуры 50–150 °С обладает высокой жаропрочностью, термостойкостью и коррозионной стойкостью;

- при одинаковой пористости волоконные материалы прочнее и пластичнее порошковых материалов, так как число контактов на один структурный элемент (волокно, порошок) у первых больше, чем у вторых [4];

- пористые волоконные материалы являются отходами кабельного производства, что предопределяет относительно низкий уровень эксплуатационных затрат (волокно, полученное из отходов кабельного производства, имеет низкую себестоимость, необходимо учитывать 100%-й возврат его после использования в фильтровальных системах) [16];

- фильтровальная система должна быть многослойной, так как повышение эффективности очистки достигается путем использования комбинированных систем, состоящих из чередующихся между собой мембранного и глубинного фильтровальных элементов, причем структура последнего для повышения ресурса работы должна быть двухслойной.

Разработку фильтрующей системы для очистки моторного масла марки М14Г2ЦС будем производить по алгоритму, изложенному в гл. 2, 6.

1 этап. Формулирование параметров очищаемой жидкости:

– температура моторного масла марки в процессе фильтрования $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$;

– плотность моторного масла $\rho(t)$, $\rho(100 \text{ }^\circ\text{C}) = 851 \text{ кг/м}^3$. В общем случае плотность масла марки М14Г2ЦС рассчитывается по уравнению $\rho(t) = \exp(6,818 - 0,000718t)$, кг/м^3 [24] (табл. 5, рис. 34);

Таблица 5

Физико-механические свойства
технического моторного масла марки М14Г2ЦС

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho(t), \text{ кг/м}^3$	$\eta(t), \text{ Па}\cdot\text{с}$
50	882	0,0751
60	876	0,0463
70	869	0,0308
80	863	0,0216
90	857	0,0158
100	851	0,0119

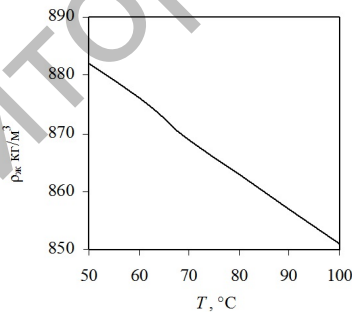


Рис. 34. График зависимости плотности моторного масла марки М14Г2ЦС от температуры

– вязкость моторного масла. В общем случае рассчитывается по уравнению $\mu_{\text{ж}}(t)$, $\mu_{\text{ж}}(100 \text{ }^\circ\text{C}) = 0,0119 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\mu_{\text{ж}}(t) = 2,29042 \cdot t^{-2,60745} \rho(t)$, кг/м^3 (см. табл. 5 и рис. 35 [24]);

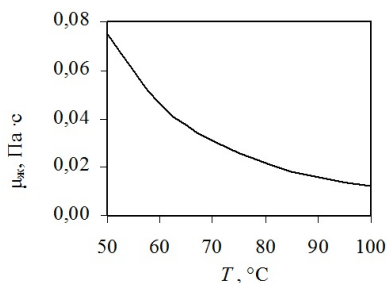


Рис. 35. График зависимости вязкости моторного масла марки М14Г2ЦС от температуры [16]

- коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 0,045$ Н/м;
- начальная объемная концентрация частиц загрязнений $C_1 = 1 \cdot 10^{-4}$ м³/м³;
- исследование гранулометрического состава механических примесей, содержащихся в моторном масле после обкатки двигателей внутреннего сгорания, выполнено и опубликовано в работе [16]. В табл. 6 приведено распределение в моторном масле при обкатке двигателей частиц загрязнений по размерам. Безразмерное содержание частиц загрязнений, выраженное в шт./шт., пересчитано в безразмерную величину м³/м³ из условия суммарной объемной концентрации $C_1 = 10^{-4}$.

Таблица 6

Распределение частиц загрязнений в моторном масле при обкатке двигателей

Фракция, мкм	Содержание шт./шт. // м ³ /м ³	Фракция, мкм	Содержание шт./шт. // м ³ /м ³	Фракция, мкм	Содержание шт./шт. // м ³ /м ³
6 ± 2	0,040 / 0,045 · 10 ⁻⁶	26 ± 2	0,090 // 8,2 · 10 ⁻⁶	48 ± 4	0,017 / 9,8 · 10 ⁻⁶
10 ± 2	0,160 / 0,83 · 10 ⁻⁶	30 ± 2	0,060 // 8,4 · 10 ⁻⁶	56 ± 4	0,013 / 12 · 10 ⁻⁶
14 ± 2	0,200 // 2,9 · 10 ⁻⁶	34 ± 2	0,045 // 9,2 · 10 ⁻⁶	70 ± 10	0,010 / 18 · 10 ⁻⁶
18 ± 2	0,180 // 5,5 · 10 ⁻⁶	38 ± 2	0,032 // 9,2 · 10 ⁻⁶		
22 ± 2	0,130 // 7,2 · 10 ⁻⁶	42 ± 2	0,023 // 8,9 · 10 ⁻⁶	Всего	1 · 10 ⁻⁴

Анализ данных (табл. 6) показывает, что концентрация частиц загрязнений «грубого» диапазона, более 20 мкм, составляет $C_1 = 91 \cdot 10^{-6}$, «тонкого», менее 20 мкм, – $C_3 = 9 \cdot 10^{-6}$.

2 этап. Формулирование требований к очищенному фильтрату:

- тонкость очистки $a = 8$ мкм ;
- степень очистки $\psi = 0,99$.

3 этап. Формулирование технико-экономических параметров, предъявляемых к процессу очистки:

- производительность $Q = 5 \cdot 10^{-5}$ м³/с ;
- перепад давления на фильтрующей системе $\Delta P \leq 250$ кПа .

4 этап. Выбор и обоснование структуры фильтрующей системы.

На основе исследований установлено, что наилучший вариант – фильтрующая система, состоящая из тонкого мембранного и толстого глубинного фильтровальных элементов, причем глубинный фильтр, с целью снижения перепада давления и повышения степени и тонкости очистки, должен состоять из двух слоев.

5 этап. Выбор параметров оптимизации и целевой функции:

- целевая функция – удельная скорость $U = Q / V_0 \rightarrow \max$;
- тонкость очистки $Y_3 = a$, м;
- степень очистки $Y_3 = \psi$ (безразмерный);
- линейная скорость фильтрации $Y_3 = V_\phi$, м/с ;
- ресурс работы $Y_4 = R$, с;

6 этап. Выбор независимых управляющих факторов:

- средний размер пор мембранного фильтровального элемента d_{cp2} (м) и его толщина H_2 (м);
- начальный средний размер пор мембранного фильтровального элемента $d_{cp3}(0)$ (м) и его толщина H_3 (м);
- общий перепад давления $Y_5 = \Delta P$, Па;

7 этап. Математическое моделирование фильтровальной системы включает в себя моделирование мембранного и глубинного механизмов фильтрования.

В табл. 7 приведены структурные и гидродинамические параметры образцов из медных волоконных материалов, которые являются отходами кабельного производства.

Таблица 7

Структурные и гидродинамические свойства образцов
из медных волоконных материалов [16]

Давление прессования, МПа	Диаметр волокна, мкм	Пористость	Средний размер пор, мкм	$k_{\text{эксп}},$ мкм ²	$k_{\text{расч}},$ мкм ²
80	100	0,37	31	22,2	24,5
	200	0,36	41	41,2	41,7
	350	0,35	51	62,6	62,7
	550	0,33	58	76,6	76,4
100	100	0,34	29	19,0	19,7
	200	0,32	35	25,4	27,0
	350	0,31	47	47,3	47,1
	550	0,30	55	62,9	62,5
120	100	0,30	24	12,5	11,9
	200	0,29	30	19,1	18,0
	350	0,27	43	34,2	34,4
	550	0,25	51	43,9	44,8
140	100	0,20	22	9,5	9,3
	200	0,25	29	16,2	14,5
	350	0,24	42	30,9	29,1
	550	0,23	48	37,1	36,5

Для уменьшения гидравлических потерь мембранный фильтровальный элемент должен иметь минимально возможную толщину (например 1 мм). На стадии грубой очистки с использованием мембранного фильтра из моторного масла должны быть изъяты все частицы загрязнений «грубого» диапазона (более 20 мкм), и на стадии тонкой очистки через двухслойный глубинный фильтр – все частицы загрязнений «тонкого» – менее 20 мкм.

Анализ данных табл. 7 позволяет сделать вывод, что в качестве материала для мембранного фильтра следует взять пористый материал (из волокна диаметром 100 мкм), спрессованный при давлении 140 МПа, размер пор которого ≈ 20 мкм.

6.2. Многофакторное моделирование и многокритериальная оптимизация фильтровальной системы для очистки моторного масла

Прежде чем приступить к моделированию процесса фильтрования на мембранном фильтровальном элементе, зададим количественные значения факторов и структурных параметров пористого проницаемого материала, определяющих этот процесс:

– волоконная мембрана: факторы - средний размер пор $d_{cp2} = 22$ мкм; толщина $H_2 = 1$ мм; структурные параметры: пористость $\Pi_2 = 0,28$; коэффициент извилистости $B_2 = 1,1$ (см. табл. 7);

– кейк-слой: факторы – средний размер частиц $D_1 \approx 60$ мкм, $l = 2$ мм; структурные параметры: пористость $\Pi_1 = 0,4$; коэффициент извилистости $B_1 = 1,3$ (см. табл. 6);

– очищаемая жидкость: фактор – перепад давления $\Delta P < 10$ кПа; теплофизические параметры: вязкость моторного масла $\mu_{ж} = 0,119$ Па·с; концентрация частиц загрязнений размером более 20 мкм $C_1 = 91 \cdot 10^{-6}$, концентрация частиц загрязнений, менее 20 мкм, $C_3 = 9 \cdot 10^{-6}$ (см. табл. 5 и 6); $V_0 = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ (210 см³).

Рассчитаем вспомогательные параметры:

– вязкостный коэффициент проницаемости мембранного фильтровального элемента

$$k_{\mu 2} = \frac{\Pi_2 d_{cp2}^2}{12 B_2^2} = \frac{0,28 \cdot (20 \cdot 10^{-6})^2}{12 \cdot 1,1^2} = 7,71 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2;$$

– скорость фильтрации через мембранный фильтр, в момент времени $t = 0$:

$$V_{\phi 0} = \frac{k_{\mu 2} \Delta P}{\mu_{ж} H_2} = \frac{7,71 \cdot 10^{-12} \cdot 1500}{0,0119 \cdot 0,001} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м/с};$$

– вязкостный коэффициент проницаемости кейк-слоя

$$k_{\mu 1} = \frac{\Pi_1^3 D_1^2}{72 \cdot B_1^2 (1 - \Pi_1)^2} = \frac{0,4^3 \cdot (60 \cdot 10^{-6})^2}{72 \cdot 1,3^2 \cdot (1 - 0,4)^2} = 5,26 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2;$$

– скорость фильтрации через мембранный фильтр:

$$V_{\phi}(t) = \frac{V_{\phi}(0)}{\sqrt{1+t/t_1}} = \frac{10^{-3}}{\sqrt{1+t/1734}};$$

$$t_1 = \frac{k_{\mu 1}(1-\Pi_1)H_2}{2k_{\mu 2}C_1V_{\phi}(0)} = \frac{5,26 \cdot 10^{-12} \cdot (1-0,4) \cdot 0,001}{2 \cdot 7,71 \cdot 10^{-12} \cdot 91 \cdot 10^{-6} \cdot 1,00 \cdot 10^{-3}} = 2250 \text{ с.}$$

Моделирование процесса тонкой очистки. Второй блок очистки представляет собой глубинный фильтровальный элемент, состоящий из двух слоев. Многослойность глубинного фильтра предопределяется необходимостью организации равномерной забивки порового пространства частицами загрязнений, что существенно повышает ресурс его работы.

Прежде чем приступить к моделированию процесса фильтрования на глубинном фильтровальном элементе, зададим количественные значения факторов, определяющих процесс тонкой очистки:

– волоконный фильтр: в результате обработки данных (см. табл. 7) методом МНК для волоконных материалов получено следующее уравнение для вязкостного коэффициента проницаемости:

$$k_{\mu 3}(0) = \frac{\Pi_3(0)d_{\text{ср}3}^2(0)}{12B_2^3}.$$

С учетом того, что соотношение между средним размером пор волоконного пористого материала и диаметром волокна определяется уравнением

$$d_{\text{ср}3} = \frac{\pi \Pi_3 D_3}{4(1-\Pi_3)},$$

вязкостный коэффициент проницаемости рассчитывается по уравнению

$$k_{\mu 3}(0) = \frac{\Pi_3^3(0)D_3^2}{19,5 B_2^3(1-\Pi_3(0))^2};$$

– параметры очищаемой жидкости: перепад давления $\Delta P = 1,2 \text{ кПа}$; вязкость моторного масла марки М14Г2ЦС $\mu_{\text{ж}} = 0,0119 \text{ Па} \cdot \text{с}$; плотность $\rho_{\text{ж}} = 851 \text{ кг/м}^3$ (см. табл. 5); плотность частиц загрязнений из оксида кремния $\rho_{\text{ТВ}} = 2650 \text{ кг/м}^3$;

концентрация частиц загрязнений размером менее 20 мкм $C_3 = 9,0 \cdot 10^{-6}$; коэффициент конечного фильтрования $\gamma = 0,005$, что означает, что степень очистки не менее 99,5 %; тонкость очистки $a = 8$ мкм, скорость фильтрации $V < 0,01$ м/с (см. табл. 5, 6);

Для повышения эффективности очистки на глубинном фильтре воспользуемся полученными результатами при создании многослойных глубинных фильтровальных элементов.

Данные, представленные на рис. 29–32, и данные, полученные в гл. 5, позволяют сделать вывод о том, что приемлемая равномерность осаждения частиц загрязнений, от которой в значительной степени зависит ресурс работы, достигается уже в двухслойных фильтрах, и при этом значительно упрощается технологический процесс создания такого рода фильтровальных систем.

Рассчитаем оптимальные параметры каждого из двух слоев глубинного фильтра. Целевая функция такая же, как при расчете оптимальной структуры многослойного глубинного фильтра из пористых порошковых материалов. Результаты оптимизации двухслойного глубинного фильтра приведены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты оптимизации двухслойного глубинного фильтра толщиной 6 мм из пористых волоконных материалов

№ слоя	Толщина H , мм	Средний диаметр пор $d_{\text{ср}}$, мкм	Перепад давления ΔP , кПа	Коэффициент проницаемости k_{μ} , мкм ²	Глубина проникновения λ , мм	Значение целевой функции
1	4,2	44	1,25	39,6	4,40	4,33 · 10 ⁻²
2	1,8	14	5,72	3,8	0,42	
1+2	6,0	–	6,97	10,2	–	

Анализ результатов табл. 8 показывает, что рассчитанный двухслойный глубинный фильтр достаточно быстро выйдет из строя, так как диаметр пор второго слоя составляет 14 мкм, частицы загрязнений после мембранного слоя имеют размеры в диапазоне 4–20 мкм. И хотя после первого слоя частиц загрязнений диаметром 20 мкм останется в фильтрате только 28 %, диаметром 14 мкм – 34 %, на фронтальной поверхности второго слоя глубинного фильтра в процессе осаждения частиц загрязнений образуется кейк-слой со средним размером пор 7 мкм, после чего катастрофически упадет скорость фильтрации, и процесс фильтрования остановится.

Поэтому при повторной оптимизации структурных и габаритных размеров глубинного фильтра было поставлено дополнительное условие: $d_{cp2} \geq 40$ мкм, которое отражает суть глубинного механизма фильтрования. Данные повторной многокритериальной оптимизации приведены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты повторной оптимизации двухслойного глубинного фильтра толщиной 20 мм из пористых волоконных материалов

№ слоя	Толщина H , мм	Средний диаметр пор d_{cp} , мкм	Перепад давления ΔP , кПа	Коэффициент проницаемости k_{μ} , мкм ²	Глубина проникновения λ , мм	Величина целевой функции
1	14,5	142	0,416	416	15,1	4,05 · 10 ⁻²
2	5,5	30	3,47	18,7	1,26	
1+2	20,0	—	3,88	61,2	—	

Уравнение, описывающее изменение концентрации частиц загрязнений по глубине фильтрующего элемента, имеет следующий вид:

$$C(x) = \begin{cases} C_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda_1}\right), & 0 \leq x \leq H_1, \\ C_1 \exp\left(-\frac{x - H_1}{\lambda_2}\right), & H_1 < x \leq H_2. \end{cases}$$

В табл. 10 приведены расчетные значения гранулометрического состава очищенного фильтрата, прошедшего сквозь двухслойный глубинный фильтровальный элемент.

Таблица 10

Гранулометрический состав очищенного фильтрата

Диаметр частиц загрязнений, мкм	Степень очистки, %
15	99,97
12	99,9
10	99,8
8	99,5
6	99,0
4	98,1
2	97,1
1	96,8

Основной вывод по результатам табл. 10: степень очистки моторного масла даже от примесей, размер которых более 1 мкм, составляет более 96 %.

Прежде чем приступить к моделированию процесса очистки моторного масла через комбинированную систему, оценим ресурс работы фильтрующей системы. Очевидно, что ресурс работы всей системы определяется ресурсом работы глубинного фильтра, так как ресурс работы мембранного фильтра может быть достаточно большим. Рассчитаем сначала параметр t_3 .

$$t_3 = \frac{\mu_{ж} \Pi_3(0)(1 - \Pi_4) H_3^2(0)}{k_{\mu 3}(0) C_3(1 - \gamma) \Delta P} = \frac{0,0119 \cdot 0,4 \cdot (1 - 0,4) \cdot 0,02^2}{6,12 \cdot 10^{-11} \cdot 9 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,005) \cdot 3883} =$$

$$= 0,53 \cdot 10^6 \text{ с} = 149 \text{ ч}.$$

Ресурс работы глубинного фильтровального элемента, с рассчитанными параметрами ($t_3 = 149 \text{ ч}$, $k = 2$):

$$R = (\sqrt{k} - 1)t_3 = 62 \text{ ч}.$$

Скорость фильтрации через глубинный фильтровальный элемент

$$V_{\Phi}(t) = \frac{V_{\Phi}(0)}{(1 + t / 5,37 \cdot 10^5)^2}.$$

Моделирование процесса очистки через комбинированную фильтровальную систему. Используя полученные данные по моделированию мембранного и глубинного фильтровальных элементов, составим комбинированную систему для очистки моторного масла марки М14Г2ЦС при обкатке двигателей. В процессе испытаний на фильтрующую систему поступает моторное масло, которое содержит твердые частицы загрязнений в диапазоне 4–80 мкм, концентрация которых $\approx 10^{-4} \text{ м}^3/\text{м}^3$. Первая ступень фильтрующей системы – это мембранный фильтровальный элемент, изготовленный из медного волокна (отходы кабельного производства), имеет пористость 30 % и средний размер пор 20 мкм, поэтому все примеси, размер которых более 20 мкм, задерживаются мембранным

фильтрующим элементом. Все частицы загрязнений, размер которых ≈ 20 мкм, имеют достаточно большую вероятность пройти сквозь этот фильтр, по крайней мере, в начальный период процесса очистки, когда толщина кейк-слоя относительно небольшая. После прохождения 1-го блока частицы загрязнений, размер которых менее 20 мкм, поступают на 2-й блок, который представляет собой глубинный фильтровальный элемент, средний размер пор 1-го слоя которого 142 мкм и толщина 14,5 мм, средний размер пор 2-го слоя – 30 мкм и толщина 5,5 мм (см. табл. 9).

Построение критерия работоспособности для очистки моторного масла в комбинированной фильтрующей системе:

– параметры оптимизации мембранного фильтра:

$$V_{\phi}(t) = \frac{V_{\phi}(0)}{\sqrt{1+t/t_1}}, \quad t_1 = \frac{(1-\Pi_1)k_{\mu 1}H_2}{2C_1k_{\mu 2}V_{\phi}(0)},$$

$$\Delta P_1 = \eta_{ж}V_{\phi}(0) \frac{H_2}{k_{\mu 2}} + \frac{4\sigma_{ж}}{d_{ср 2}};$$

– параметры оптимизации волоконного глубинного фильтровального элемента:

$$V_{\phi}(t) = \frac{V_{\phi}(0)}{(1+t/t_3)^2}, \quad t_3 = \frac{2\Pi_3(0)(1-\Pi_4)H_3}{V_{\phi}(0)C_3(1-\gamma)},$$

$$R_2 = (\sqrt{k} - 1)t_3,$$

$$\Delta P_3 = \eta_{ж}V_{\phi}(0) \frac{H_3}{k_{\mu 3}} + \frac{4\sigma_{ж}}{d_{ср 3}},$$

$$\psi = 1 - \exp\left(-\frac{H_3}{\sqrt{\lambda_3\lambda_4}}\right),$$

$$\lambda_3 = \frac{d_{\text{cp}3}(0)}{2,656 \cdot B_3 \Pi_3 D_f} \sqrt{\frac{V_{\phi}(0) d_{\text{cp}3}}{\Pi_3(0)}} \sqrt[6]{\frac{D_f^2 \eta_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}}}, \quad \text{Re} < \text{Re}_{\text{кр}},$$

$$\lambda_4 = \frac{\pi \Pi_3 D_3}{4(1 - \Pi_3) \alpha \eta_0(d_3, D_3)};$$

– параметры оптимизации процесса очистки:

$$Q(t) = S_{\phi} V_{\phi}(t); \quad V_0 = S_2 H_2 + S_3 H_3;$$

– факторные ограничения:

$$0,2 \leq \Pi_{1,2} \leq 0,5, \quad 1,1 \leq B_{1,2} \leq 1,3;$$

$$1 \leq H_2 \leq 5 \text{ мм}, \quad 6 \leq H_3 \leq 60 \text{ мм}; \quad 50 \times 50 \leq S_{2,3} \leq 200 \times 200 \text{ мм}^2;$$

– функциональные ограничения:

$$R \geq 50 \text{ ч}; \quad \psi \geq 99,0 \%; \quad a = 8 \text{ мкм};$$

$$Q \geq 1 \text{ л/мин}, \quad \Delta p \leq 50 \text{ кПа};$$

– целевая функция: $V_0 \rightarrow \min$.

В результате многокритериальной оптимизации получен следующий комплекс факторов:

– мембранный фильтровальный элемент: толщина $H_2 = 1 \text{ мм}$; фронтальная площадь фильтрования $S_1 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; средний размер пор $d_{\text{cp}2} = 20 \text{ мкм}$; пористость $\Pi_2 = 0,28$; материал – спрессованное при давлении 140 МПа медное волокно диаметром $D_2 = 105 \text{ мкм}$;

– глубинный фильтровальный элемент, 1-й слой: толщина $H_{31} = 14,6 \text{ мм}$; фронтальная площадь фильтрования $S_3 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$; средний размер пор $d_{\text{cp}31} = 92 \text{ мкм}$; пористость $\Pi_{31} = 0,30$; материал – спрессованное при давлении 60 МПа медное волокно;

– глубинный фильтровальный элемент, 2-й слой: толщина

$H_{32} = 5$ мм ; фронтальная площадь фильтрования $S_3 = 1 \cdot 10^{-2}$ м² ;
средний размер пор $d_{cp32} = 39$ мкм ; пористость $P_{31} = 0,30$; материал – спрессованное при давлении 120 МПа медное волокно диаметром $D_{32} = 200$ мкм ;

– параметры оптимизации: тонкость очистки $a = 8$ мкм при заданной степени очистки 99,5 % (степень очистки частиц загрязнений диаметром 1–8 мкм не менее 96 %) ; ресурс работы глубинного фильтра $R = 17,6$ ч ; производительность процесса очистки моторного масла $Q = 5,0 \cdot 10^{-5}$ м³/с (3 л/мин) ; общий перепад давления $\Delta P = 15,2$ кПа ;

– габаритные размеры комбинированной фильтрующей системы: минимально возможный объем $V_0 = 2,1 \cdot 10^{-4}$ м³ (210 см³).

Для сравнения: перепад давления на фильтрующей системе, состоящей только из мембранного фильтра толщиной 1 мм, тонкость очистки которого должна быть ≈ 8 мкм, составит 48,2 кПа, то есть в 3,2 раза больше, чем на комбинированной фильтрующей системе.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что комбинированная волоконная фильтрующая система обеспечивает очистку моторного масла, загрязненного твердыми частицами, с требуемыми комплексом эксплуатационных параметров, представляющих собой компромисс фильтровальных параметров (степень и тонкость очистки), производительности процесса очистки и ресурса работы.

Таким образом, установлено, что создание комбинированной фильтрующей системы для очистки моторного масла на основе пористых материалов, функционирование которой определяется конфликтующими параметрами, может быть достигнуто только методом многокритериальной оптимизации. Показано, что среди широкого спектра пористых материалов наилучшей поровой структурой обладают волоконные материалы, у которых высокая прочность одновременно сочетается с пластичностью. Прессование волоконных материалов позволяет достаточно просто в технологическом плане управлять величиной пористости и размером пор в широком диапазоне. Создана комбинированная фильтрующая система для очистки моторного масла, состоящая из тонкого мембранного фильтрующего элемента толщиной ≈ 1 мм, в котором реали-

зован поверхностный механизм фильтрования, и относительного толстого фильтрующего слоя ≈ 10 мм, в котором реализован глубинный механизм фильтрования. Установлено, что необходимое условие оптимального функционирования комбинированной системы заключается в выполнении следующего требования: средний размер глубинного фильтра должен быть существенно больше среднего размера мембранного фильтра. Выполнение такого неравенства позволяет в результате многокритериальной оптимизации на практике реализовать высокую тонкость очистки и высокую производительность фильтрующей системы одновременно. Теоретически получены зависимости тонкости и степени очистки глубинного фильтра от его толщины и пористости, а также скорости фильтрации (производительность процесса очистки).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие научные результаты.

1. Разработана динамическая модель процесса очистки жидкости через фильтровальные системы с поверхностным механизмом фильтрования. Модель позволяет рассчитать динамику изменения толщины кейк-слоя и скорости фильтрования с учетом образующегося кейк-слоя. Впервые теоретически рассчитан ресурс работы пористых элементов с поверхностным механизмом фильтрования.

2. Разработана динамическая модель процесса очистки жидкости через фильтровальные системы с объемным механизмом фильтрования, которая позволяет рассчитать динамику изменения диаметра пор и скорости фильтрования с учетом осаждения частиц загрязнений в объеме фильтровального элемента. Впервые теоретически получена зависимость степени очистки от тонкости очистки в зависимости от структурных и конструкционных параметров глубинного фильтра, соотношения диаметра и размера частиц загрязнений, а также скорости фильтрации, что позволяет рассчитать гранулометрический состав конечного фильтрата. На базе этой модели впервые рассчитан ресурс работы пористых элементов с объемным механизмом фильтрования. Теория создает предпосылки для повышения ресурса работы глубинных фильтровальных элементов за счет создания оптимальной структуры фильтра, обеспечивающей равномерное осаждение частиц загрязнений в направлении фильтрации.

3. Разработана математическая модель очистки жидкости через комбинированные фильтровальные системы, состоящие из комбинации фильтров с поверхностным механизмом и фильтров с объемным механизмом фильтрования. Модель позволяет рассчитать динамику изменения скорости фильтрования на комбинированной фильтровальной системе с учетом образования и роста толщины кейк-слоя на мембранном фильтровальном элементе и уменьшения диаметра пор, с учетом осаждения частиц загрязнений в объеме глубинного фильтровального элемента. На базе этой модели впервые получено уравнение, позволяющее рассчитать ресурс работы комбинированной фильтровальной системы.

4. Показано, что методом многокритериальной оптимизации можно получить фильтрующую систему с приемлемым комплексом экс-

плуатационных параметров. Суть метода заключается в создании критерия работоспособности, включающего: математическую модель процесса очистки в комбинированной фильтрующей системе; факторные ограничения, вызванные технологической спецификой изготовления фильтровальных элементов; функциональные ограничения на параметры оптимизации, обусловленные требованиями рынка; целевую функцию, которой является один из параметров оптимизации. Решение математических уравнений и неравенств, входящих в критерий работоспособности комбинированной фильтровальной системы, методом многокритериальной оптимизации в компьютерных математических программах *MS Excel* и *Mathcad* позволяет найти приемлемый компромисс параметров оптимизации, имеющих конфликтующий характер изменения.

5. Теория создания комбинированных фильтровальных систем путем системного моделирования всех этапов разработки и многокритериальной оптимизации – научное направление, которое позволяет проектировать эффективные фильтровальные системы для применения в различных областях. Практическая значимость полученной теории создания фильтровальных систем с приемлемым комплексом эксплуатационных параметров заключается в разработке алгоритма проектирования конкретных фильтровальных систем. Созданный алгоритм проиллюстрирован на примере проектирования комбинированной фильтрующей системы для очистки моторного масла на основе пористых волоконных материалов, являющихся отходами кабельного производства. Показано, что среди широкого спектра пористых материалов наилучшей поровой структурой обладают волоконные материалы (высокая прочность и пластичность одновременно). Прессование волоконных материалов позволяет технологически просто управлять величиной пористости и размером пор в широком диапазоне. Создана комбинированная фильтровальная система для очистки моторного масла, состоящая из тонкого мембранного слоя толщиной ≈ 1 мм и средним размером пор 10–20 мкм, в котором реализован поверхностный механизм фильтрации, и относительно толстого фильтрующего слоя ≈ 10 –20 мм с размером пор 30–150 мкм, в котором реализован объемный механизм фильтрации. Тонкость очистки от частиц загрязнений 1–8 мкм – более 96 %. Степень очистки от частиц загрязнений более 8 мкм составила 99,5 %. Показано, что в комбинированных фильтровальных системах перепад давления в 3–

100 раз меньше, чем на монофильтровальных системах (фильтры только с поверхностным или только с объемным механизмом фильтрования).

6. Показано, что комбинированные фильтровальные системы из металлических и керамических пористых материалов, получаемых методом порошковой металлургии, целесообразно использовать при следующих параметрах эксплуатации: высокие значения температуры (100–1700 °С); большие давления (0,1–100 МПа); кислая или щелочная среда; высокая вязкость жидкостей – более 0,01 Па·с (моторное масло, полимеры, глицерин, расплавы металлов); высокая удельная производительность (например $U > 5 \text{ с}^{-1}$), – сочетающихся с высокими тонкостью (более 5 мкм) и степенью очистки (более 99 %) одновременно. Областью применения комбинированных фильтровальных систем являются предприятия химической, пищевой, фармацевтической и легкой промышленности, а также машиностроительные предприятия для очистки технологических жидкостей, в том числе предприятия «Белагросервис». Фильтры из металла и керамики являются конкурентоспособными: для очистки расплавов полимеров при производстве химволокна и пленок (твердые частицы даже с небольшими размерами нарушают сплошность материала); расплавов металлов в металлургии для повышения физико-механических свойств отливок; пищевых продуктов для обеспечения биологической безопасности и сохранения вкусовых качеств продуктов (пористые фильтры из титана и коррозионностойкой стали); для высокопроизводительной очистки технических масел в тех случаях, когда бумага, картон и полимерные материалы не обеспечивают механическую целостность и коррозионную стойкость фильтра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев, А. И. Теория теплообмена / А. И. Леонтьев. – М. : Высшая школа, 1979. – 496 с.
2. Белов, С. В. Пористые металлы в машиностроении / С. В. Белов. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 1981. – 248 с.
3. Хейфец, Л. И. Многофазные процессы в пористых средах / Л. И. Хейфец, А. В. Неймарк. – М. : Химия, 1982. – 320 с.
4. Косторнов, А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы / А. Г. Косторнов. – Киев : Техніка, 1983. – 128 с.
5. Брок, Т. Мембранная фильтрация / Т. Брок. – М. : Мир, 1987. – 464 с.
6. Суворов, С. А. Моделирование процесса фильтрации расплавов металлов / С. А. Суворов, Н. Б. Тебуев // Огнеупоры. – 1991. – № 9. – С. 17–20.
7. Скороход, В. В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах / В. В. Скороход // Порошковая металлургия. – 1995. – № 12. – С. 23–27.
8. Курицкий, Б. Я. Поиск оптимальных решений EXCEL 7.0 / Б. Я. Курицкий. – СПб. : BHV-Санкт-Петербург, 1997. – 384 с.
9. Очков, В. Ф. Mathcad 7 Pro для студентов и инженеров / В. Ф. Очков. – М. : КомпьютерПресс, 1998. – 168 с.
10. Витязь, П. А. Фильтровальные материалы: свойства, области применения, технология изготовления / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин. – Минск : НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.
11. Леонов, А. Н. Пористые проницаемые материалы: теория проектирования изделий и технологий / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. К. Шелег. – Минск : Тонпик, 2003. – 220 с.
12. Жужиков, В. А. Теория и практика разделения суспензий / В. А. Жужиков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 400 с.
13. Капцевич, В. М. Очистка и регенерация смазочных материалов в условиях сельскохозяйственного производства : монография / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2007. – 232 с.
14. Марукович, А. И. Критерий работоспособности керамических фильтров для очистки высокотемпературных сплавов и сталей / А. И. Марукович, А. Н. Леонов, М. М. Дечко // Огнеупоры и техническая керамика. – 2012. – № 9. – С. 27–36.

15. Капцевич, В. М. Новые фильтровальные материалы и перспективы их применения / В. М. Капцевич [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2013. – 232 с.

16. Капцевич, В. М. Проницаемые материалы из металлических волокон: свойства, технологии изготовления, перспективы применения / В. М. Капцевич, А. Г. Косторнов, В. К. Корнеева, Р. А. Кусин. – Минск : БГАТУ, 2013. – 378 с.

17. Эйнштейн, А. Собрание научных трудов : в 4 т. / А. Эйнштейн. – М. : Наука, 1966. – Т. 3. – 632 с.

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

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

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

21. Грин, Х. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн. – 2-е изд. – Ленинград : Химия, 1972. – 428 с.

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

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

24. Горная энциклопедия : в 5 т. / под редакцией Е. А. Козловского. – М. : Советская энциклопедия, 1984.

25. Kozeny, J. S. Uber kapillare leitung des Wassers im Boden // Sitzungsber Akad. Wiss. – Vol. 136. – Wien, 1927. – P. 271–306.

26. Carman, P. C. Flow of gases through porous media / P. C. Carman. – New York : Akad. Press, 1956. – 182 p.

27. Carman, P. C. Fluid flow through granular beds // Transactions, Institution of Chemical Engineers. – London, 1937. – Vol. 15. – P. 150–166.

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

29. Herzig, J. P. Flow of Suspension through Porous Media – Application to Deep Bed Filtration / J. P. Herzig, D. M. Leclerc, P. Le. Goff // *Ind. Eng. Chem.* – 1970. – № 62 (5). – P. 8–35.

30. 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.

31. Purchas, D. B. Industrial filtration of Liquids / D.B. Purchas. – 2nd Edition. – London : Leonard Hill Books, 1971. – 492 p.

32. Gasper, H. Handbuch der industriekker Fest / H. Gasper // *Flüssig-Filtration*; hrsg von Horst Gasper. – Heidelberg: Hüthig, 1990. – 307 p.

33. McIlvaine, R. World water treatment market to reach \$500 billion by 2000 // *Filtration and Separation.* – 1996. – Vol. 33. – № 5. – P. 362.

34. Gibson, L. J. Cellular Solid: Structure and Properties / L. J. Gibson, M. F. Ashby // Second Edition. – Cambridge: University press, 1997. – 536 p.

35. Tiller, F. M. Delayed cake filtration / F. M. Tiller, K. S. Cheng // *Filtration and Separation.* – 1977. – № 14 (1). – P. 13–18.

36. Filter and filtration. Handbook / Ed. Dickenson S. – Oxford : Elsevier Adv. Tech., 1992. – 228 p.

37. Chalva, K. K. Fibrous materials / K. K. Chalva. – Cambridge : University press, 1998. – 294 p.

38. Hutten, I. M. Handbook of Non-Woven Filter Media / I. M. Hutten. – Oxford, U. K. : Elsevier Science and Technology Books, 2007. – 444 p.

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

40. Bliss, T. Suspended Solids Washing Overview / T. Bliss, M. Ostoja-Starzewski // *IPST Technical Paper Series.* – 1997. – № 679. – 13 p.

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

42. Ison, C. R. Removal mechanisms in bed filtration / C. R. Ison, K. J. Ives // *Chem. Eng. Sei.* – 1969. – Vol. 24. – P. 717–724.

43. Maroudas, A. Particle deposition in granular filter media / A. Maroudas // *Filtr. Separ.* – 1965. – Vol. 2. – № 5. – P. 369–372.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Репозиторий БГАТУ

Научное издание

**Леонов Андрей Николаевич,
Капцевич Вячеслав Михайлович,
Корнеева Валерия Константиновна**

**КОМБИНИРОВАННЫЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ
НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРОВ С ПОВЕРХНОСТНЫМ
И ОБЪЕМНЫМ МЕХАНИЗМАМИ ФИЛЬТРОВАНИЯ**

Ответственный за выпуск *М. А. Прищепов*
Компьютерная верстка *Е. А. Хмельницкой*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 28.12.2017. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 7,21. Уч.-изд. л. 5,63. Тираж 100 экз. Заказ 459.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.