

А. И. ЕЛЬШИН

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
АСПЕКТЫ
РАЗДЕЛЕНИЯ
ДИСПЕРСНЫХ
СИСТЕМ
ФИЛЬТРОВАНИЕМ**



Новополоцк 1994

Рецензенты: кафедра "Машины и аппараты химических и силикатных производств" Белорусского государственного технологического университета; доктор технических наук, профессор И.М.Плехов, доктор технических наук, профессор Э.И.Левданский.

Ельшин А.И. Теоретические и технологические аспекты разделения дисперсных систем фильтрованием. - Новополоцк. ПГУ, 1994. - 96 с., ил.

В монографии рассмотрены теоретические и технологические аспекты разделения дисперсных систем фильтрованием. Дан анализ тенденций развития данного направления техники как гибкой технологии. Рассмотрены вопросы роботизации фильтровального оборудования, а также влияния концентрации твердой фазы фильтруемой суспензии на производительность фильтра. Монография может быть полезна для специалистов в области фильтрования, а также для аспирантов и студентов химико-технологических специальностей.

ISBN 985 - 418 - 009 - 3

© Полоцкий государственный университет, 1994.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Введение.....	5
Глава 1. О некоторых аспектах фильтрования.....	9
1.1. Краткая историческая справка.....	9
1.2. Общая экономическая оценка.....	10
1.3. Роль технологических факторов при фильтровании.....	13
1.4. Фильтрование с позиции гибкой технологии.....	15
1.5. Роботизация фильтров.....	17
1.6. Взаимосвязь процесса фильтрования и проблем экологии.....	19
1.7. Фильтрование с образованием сжимаемого осадка.....	20
1.8. Систематизация в фильтровании и перспективы развития.....	23
Глава 2. Классификация фильтровального оборудования.....	26
2.1. Система классификации по пространственно-временному принципу.....	26
2.1.1. Исходные данные.....	26
2.1.2. Фильтры непрерывного действия с неподвижными фильтрующей средой или фильтрующими элементами (ФЭ).....	28
2.1.3. Фильтры непрерывного действия с подвижными фильтрующими элементами (1, 2).....	32
2.1.4. Фильтры периодического действия.....	34
2.2. Классификация пористых сред со сквозными порвыми каналами.....	36
Глава 3. От автоматизированных фильтров к роботизированным.....	43
Глава 4. Моделирование влияния концентрации исходной суспензии на производительность фильтра.....	55
4.1. Роль концентрации суспензии при фильтровании.....	55
4.2. Экспериментальные данные.....	61
4.3. Описание зависимости удельного сопротивления осадка от концентрации фильтруемой суспензии.....	65
4.4. Общее сопротивление осадка как функция концентрации.....	71
Глава 5. Моделирование и оптимизация процесса фильтрования по концентрации.....	75
Заключение.....	88
Библиография.....	89

ПРЕДИСЛОВИЕ

На фоне большого разнообразия способов и оборудования для мембранного разделения и фильтрования прослеживаются качественные изменения, которые нуждаются в обобщении.

Прежде всего, растет осознание названных процессов как составной равноправной части гибких технологий. Все большее внимание уделяется применению процессов фильтрования и мембранной технологии в медицине, биотехнологии, чистых технологиях, а также для решения экологических проблем, связанных как с переработкой отходов, так и получением питьевой воды.

Предполагаемая серия изданий, началом которой служит данная книга, призвана восполнить имеющийся пробел в освещении теоретических основ и практических возможностей фильтрования и мембран, что позволит более полно определить область применения этих процессов, заложенный в них потенциал, а также возможность оптимального применения.

При изложении материала автор широко использовал как известные литературные данные, так и результаты собственных исследований. Изложенные здесь вопросы не претендуют на полный охват проблемы, а имеют целью предоставить возможность специалистам увидеть некоторые новые грани уже привычного явления - разделения дисперсных систем с применением пористых сред.

ВВЕДЕНИЕ

Фильтрация и мембранная технология являются динамично развивающимися видами оборудования для разделения жидких неоднородных систем. В этой области процессов и аппаратов химической технологии наблюдается постоянный рост потока информации о выполняемых НИР и ОКР. Многие организации и предприятия направляют значительные усилия на создание названных видов оборудования и технологий разделения дисперсных систем жидкость-твердое.

Процесс фильтрации применяется практически во всех отраслях, где приходится иметь дело с жидкостями и газами: химическая, полимерная, микробиологическая, горно-обогатительная, нефтехимическая, фармацевтическая, электронная, аэрокосмическая, энергетика.

Существенные достоинства фильтрации и мембранной технологии заключаются в возможности разделять или выделять различных компонентов из жидкости в виде целевого продукта, в очистке жидкости от дисперсных примесей, концентрировании дисперсных систем и др.

Процессы разделения ведутся в мягких условиях и обладают низкой энергоемкостью. Частицы размером порядка микрон выделяют из жидкости фильтрацией, с размером до 0,01 мкм - микрофильтрацией, а макромолекулярные вещества, молекулы и ионы - с помощью полупроницаемых мембран.

Разнообразие разделяемых дисперсных систем и их свойств определяет и разнообразие способов фильтрации, конструкций фильтров и фильтрующих сред. В лабораторных условиях объем фильтруемой жидкости измеряется миллилитрами, тогда как в горно-обогатительной промышленности, а также при обработке сточных вод перед фильтрацией стоит другая задача - обезвоживание больших объемов суспензий. Широкий диапазон требований к фильтрации как составной части технологических процессов от эффективности процесса фильтрации в большой степени зависит ряд массо- и теплообменных процессов, так как загрязнения способны отлагаться на теплообменных поверхностях, границах раздела фаз, вести к образованию побочных химических продуктов

Например, одной из причин сдерживания широкого применения теплообменных устройств с пористыми теплообменными элементами (ПТЭ), в том числе и тепловых труб, считается жесткость требований к чистоте теплоносителей. При продолжительной работе теплоноситель должен непрерывно очищаться от механических загрязнений фильтрами, средний размер пор которых в 3-4 раза меньше размера пор ПТЭ [1].

Другой пример [2]. Аппарат для мембранного разделения при работе на предварительно неочищенном от механических примесей растворе может выйти из строя в течение нескольких дней или даже часов, а в случае предварительного удаления загрязнений срок службы мембранного модуля возрастает многократно. Фильтр должен оптимально сочетаться с типом мембранного аппарата и принятой технологией, так как от 40 до 60% общих затрат разделения растворов приходится на их предварительную подготовку.

Возрастает объем потребления стерильных, сверхчистых жидкостей (медицина, биотехнология, электронная промышленность, производство веществ высокой чистоты и т.д.). Здесь фильтрование уже не способно обеспечить требуемое качество очистки и сочетается с очисткой на ионообменных фильтрах, полупроницаемых мембранах и адсорбентах.

Все чаще фильтрование и фильтровальное оборудование рассматриваются не как средство для разделения дисперсных систем, а как комплекс последовательных технологических операций, где фильтрование выступает важным, но не единственным технологическим процессом, призванным обеспечить достижение требуемого результата (цели), то есть как химико-технологическая подсистема. Среди технологических операций, непосредственно определяющих ход фильтрования, и операций, зависящих от результатов фильтрования, можно назвать предварительную обработку суспензий (в частности флокулянтами и коагулянтами), промывку, продувку, отжим и сушку осадка, образовавшегося в результате фильтрования. Таким образом, фильтрование выступает как процесс, интегрированный в химико-технологическую систему, что, соответственно, требует его исследования и разработки как процесса, зависящего от смежных химико-технологических процессов и, в свою очередь, влияющего на протекание последующих технологических процессов.

За счет тесного сотрудничества исследователей разных стран удалось существенно продвинуться в совершенствовании технологии

фильтрация, разработать принципиально новые материалы и конструкции разделительных элементов и оборудования. Ежегодно в этой области техники выданы сотни патентов на изобретения.

Внедрение микропроцессорной техники резко повысило надежность и конкурентоспособность фильтровального и мембранного оборудования по сравнению с другими разделительными процессами. Использование мембранных модулей на полых волокнах позволяет достичь эффективной поверхности массообмена до 1000 кв. м/куб. м. Разработаны анизотропные фильтрующие материалы из керамики и металлов, что увеличило их срок службы и расширило область применения.

Применяются аппараты позволяющие совмещать с фильтрованием реакционные, тепло- и массообменные процессы. Резко возрос уровень автоматизации оборудования, особенно большой единичной мощности, появились системы обслуживания фильтров, по своей идее близкие к роботизированным системам. Одновременно развивается миниатюризация фильтровальных и мембранных модулей, расширяющая их применение в медицине и специальной технике.

На фоне большого разнообразия способов и оборудования для фильтрации прослеживаются качественные изменения в развитии фильтрации, которые нуждаются в обобщении и анализе.

Эффективность применения фильтрации непосредственно связана с правильным сочетанием физико-химических воздействий на дисперсную систему, условий процесса разделения и конструкции оборудования. Следует отметить, что проблемы в области фильтрации тесно примыкают к подобным проблемам в области мембранной технологии (разделительные процессы с полупроницаемыми барьерами или перегородками - мембраками).

В условиях роста цен на энергоносители и сложной экологической обстановки практический интерес для республики представляет разработка энергосберегающих технологий разделения дисперсных систем жидкость-твердое, в том числе для техники защиты окружающей среды, снижения транспортных издержек, эффективного использования ресурсов.

Констатируя прогресс фильтрации и мембранной технологии в целом, следует отметить, что поступательное развитие этой области техники не обеспечивает полной реализации заложенного в ней потенциала.

Для эффективного применения процесса фильтрования в промышленности и особенно в технике защиты окружающей среды необходимо решить ряд проблем, в частности:

- а) систематизировать имеющиеся виды оборудования и процессов;
- б) разработать эффективные методы обобщенной оценки разделительных свойств пористых сред;
- в) исследовать роль концентрации твердой фазы суспензии в процессе формирования осадка и обеспечении оптимальной производительности;
- г) разработка модели, адекватно описывающей свойства сжимаемых осадков в широком диапазоне эффективных напряжений;
- д) создание научных основ применения процесса фильтрования при разделении опасных и вредных продуктов, а также в жестких условиях эксплуатации.

Продвижение к решению перечисленных выше проблем на основе новой концепции развития и применения процессов фильтрования и моделирования пористых сред является целью данного издания.

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ФИЛЬТРОВАНИЯ

I. I. Краткая историческая справка

Фильтрация — один из древнейших технологических процессов. Для описания которого по сегодняшний день широко используем эмпирические и полуэмпирические уравнения и формулы.

Промышленный выпуск оборудования для вакуумного фильтрования охватывает период, приблизительно равный 180 годам. К самым ранним патентам на такое оборудование относятся патенты Диккенсона в 1814, 1811 и 1809 годах, Брамаха в 1805 г. и один патент Вильяма и Джеймса Харта в 1872 году на фильтр, который сейчас мы рассматриваем как обычные вращающиеся барабанные вакуум-фильтры.

Появление мембранных фильтров для тонкой очистки также имеет давнюю историю. В 1846 г. Schoenbein обнаружил, что коллоиды сохраняют гомогенную пористую структуру. В 1907 г. H. Vechhold начал изготавливать мембраны с различными размерами пор на основе коллоиды. На уровень коммерческих изделий мембраны для тонкой фильтрации поднялись в 1919 г., когда Zsigmondy и др. начали изготавливать тонкие фильтрующие мембраны на основе нитроцеллюлозы, которые и явились первыми коммерческими образцами мембранных фильтров. Со времени второй мировой войны промышленность Германии и США обеспечивала мир мембранными фильтрами дисковой формы, основным материалом для которых служила регенерированная целлюлоза, ацетатная целлюлоза и т.п.

В 1852-1855 годах производя опыты по фильтрации в песчаных грунтах, французский инженер Г. Дарси обнаружил линейную зависимость между скоростью фильтрации воды и потерями напора, которая теперь называется законом Дарси.

Первые теоретические исследования фильтрации были начаты Ж. Дюпюи в шестидесятых годах XIX столетия и продолжены Ф. Форхгеймером. В XX веке число работ по фильтрации в пористых средах начинает расти лавинообразно.

В 1912 году Льюисом впервые подробно исследовано фильтрование с образованием осадка.

В настоящее время исследования в области фильтрования проводятся во многих странах мира, созданы национальные и международные ассоциации, в течение года организуются десятки региональные и международных конференции по различным аспектам теории и практике фильтрования.

1.2. Общая экономическая оценка

Лучшим барометром состояния той или иной группы технологического оборудования является объем его продаж. Анализ объема продаж на рынке оборудования для разделения дисперсных систем фильтрованием и полупроницаемыми мембранами показывает, что в области фильтровального и мембранного оборудования происходит рост объема реализуемого оборудования, который может быть приблизительно оценен для ведущих капиталистических стран. Данные для стран, образовавшихся на месте СССР и бывших социалистических стран восточной Европы, отсутствуют.

По выкладкам [3] более 50% объема продаж сепарационного оборудования для разделения дисперсных систем с жидкой дисперсионной средой приходится на долю фильтровального оборудования.

Согласно отчету фирмы "Morton Research", США [4], деловая активность по промышленным фильтрам в 1987 году достигла 1,2 млрд. долларов США. По мнению фирмы интерес представляют следующие показатели:

- бум в области фильтрующих сред;
- продажа фильтров на аэрокосмическом рынке;
- рост экспорта из США, который достиг 52% от всех продаж действующих в этой области компаний в 1989 году;
- объем продажи фильтровального оборудования у некоторых фирм возрос на 37% за последние два года;
- импорт в 1990 году увеличился на 9%.

В разделение дисперсных систем наиболее бурное развитие наблюдается в сфере микрофильтрования, ультрафильтрации и обратного осмоса. Общий потенциал этого рынка к 1995 году оценивается в 4 млрд. дол. [5] и сопровождается расширением ассортимента мембран и микрофильтров. Совершенствование технологии в фармацевтике и электронике увеличивает спрос на фильтры тон-

кой очистки и ультрафильтры. Предполагается, что сбыт названных типов фильтров в 1993 году по сравнению с 1989 годом возрастет для фармацевтики на 75%, для электроники - на 47%.

Объем реализации ультрафильтрационного оборудования, например в США, оценивается в 1993 году в 558 млн. дол., в том числе для фармацевтической промышленности - 393 млн. дол., против 349 млн. дол. в 1989 году (для фармацевтической промышленности - 225 млн. дол.) [6].

Рост производства мембран различного типа и микрофильтров прогнозируется в следующей пропорции [7]: 1990 г. - 574 млн. дол., 1995 г. - 847 млн. и 2000 г. - 1213 млн. долларов США, причем около 50% здесь приходится на микрофильтры.

Согласно другим данным [8], в 1997 году в США продажа оборудования для микрофильтрации, обратного осмоса и ультрафильтрации составит 495 млн. долларов (по курсу доллара в 1987 году).

Расхождение оценок, по-видимому, следует объяснить тем, что в мембранную установку, кроме мембраны и собственно мембранного модуля, входит вспомогательное оборудование, стоимость которого может включаться или не включаться в стоимостные оценки.

Среди прочих потребителей фильтров тонкой очистки и ультрафильтров отмечают пищевую промышленность и производство напитков, где планируется рост спроса в пределах 20%, а также медицину с ростом спроса до 33% [9].

Ежегодно в биотехнологии и биомедицинских исследованиях в аналитических целях используются мембраны на сумму 45 млн. дол. Прирост продажи микрофильтров для обработки сред в производстве различных химикатов составляет 7,5% в год, а для защиты окружающей среды и очистки сточных вод - 14% в год [8].

Если вернуться к традиционным видам промышленного оборудования для фильтрации, где основными путями развития являются модернизация и автоматизация фильтров, а также увеличение единичной мощности оборудования, то в результате корреляционного анализа между стоимостью (С, руб), металлоемкостью (М, кг) однотипного оборудования и его общей площадью фильтрации (F, м²) установлены следующие зависимости [10-13].

1). С увеличением площади фильтрования имеет место экспоненциальное уменьшение удельной стоимости единицы площади фильтрования, но одновременно резко снижается изменение темпа (dC/dF). Для ленточных вакуум-фильтров наблюдается обратная зависимость — рост отношения C/F с увеличением F .

2). Наименьшей удельной стоимостью обладают дисковые и листовые фильтры, а также немеханизированные фильтр-прессы. Однако, несмотря на более низкий показатель C/F для фильтр-прессов и листовых фильтров, необходимо иметь в виду, что это оборудование периодического действия и требует учета характера и продолжительности вспомогательных операций с тем, чтобы обеспечить наибольшую производительность процесса за цикл при наименьших затратах.

3). Относительная стоимость единицы массы фильтров возрастает с увеличением F у специальных фильтр-прессов и ленточных вакуумфильтров. Высокий уровень относительной стоимости на единицу массы имеют патронные и листовые вертикальные фильтры, хотя одновременно обладают наименьшей массой на единицу общей площади фильтрования.

4). Дальнейшее экстенсивное наращивание площади фильтрования не ведет к улучшению технико-экономических показателей фильтровального оборудования, что накладывает ограничение на максимальную общую площадь фильтрования.

5). Для повышения экономичности использования фильтров с большой поверхностью фильтрования на первый план в этой ситуации выдвигается задача автоматизации и оптимизации не только их конструкции, но и самого процесса очистки (разделения) дисперсных систем и сопряженных с ним вспомогательных операций.

Хотя при анализе не учитывались вид используемого фильтрующего материала, капитальные затраты пользователя при установке фильтра и уровень эксплуатационных расходов, однако уже на основе данных [10-13] можно принять решение о целесообразных направлениях совершенствования фильтровального оборудования и способах их осуществления.

Например, улучшение стоимостно-весовых характеристик фильтров на стадии производства может быть достигнуто за счет следующих факторов [12]:

1) перехода к более легким и дешевым конструкционным материалам для всех видов фильтров и особенно для листовых, дисковых и барабанных фильтров;

2) увеличения общей площади фильтрования путем увеличения размеров фильтров, например фильтр-прессов (ограниченно);

3) увеличения общей площади фильтрования без изменения основных габаритных размеров фильтра, то есть используя гофрированные фильтроэлементы; придания фильтроэлементам оптимальной формы с оптимизацией пространственного размещения в камере фильтрования (например, листовые и патронные фильтры);

4) расширения функциональных возможностей оборудования;

5) существенного улучшения характеристик фильтровального оборудования путем правильного подбора фильтрующих сред и организации подготовительных операций с суспензией.

Для обеспечения конкурентоспособности фильтров перед другими типами сепарационного оборудования даже в условиях роста спроса необходимы постоянная модернизация и совершенствование как самих фильтров, так и способов их применения.

1.3. Роль технологических факторов при фильтровании

Существенная комбинсація стоимости фильтровального оборудования достигается путем правильной, оптимальной организации технологии фильтрования, выбора фильтровального оборудования и фильтрующего материала. В области технологии и управления процессами фильтрования находится большое число факторов, определяющих успех фильтрования. Как утверждают исследователи [14], при оптимальном усовершенствовании промышленных процессов фильтрования общие затраты могут быть снижены на величину до 80%. В общие затраты включены стоимость фильтров, зарплата обслуживающего персонала, расход химвеществ и др. Среди факторов, снижающих затраты, отмечены эффективность фильтрования, рациональный подбор фильтровального оборудования, возможность тестирования в заданных условиях эксплуатации.

Детальный расчет энергетических затрат при механическом обезвоживании осадков, когда процесс фильтрования разбит на фазы фильтрования (формирования осадка), вытеснения жидкости из осадка и сушки, показал, что на сушку приходится более 3-4 обдого расхода энергии [15]. Отмечено, что снижение энергозатрат возможно путем изменения структуры осадка в процессе сушки и, как следствие, уменьшением расхода воздуха для сушки.

Если обратиться к способам интенсификации процессов фильтрования, обезвоживания и сушки осадка на фильтре, то большинство из них направлено на изменение структуры осадка: увеличение пористости, уменьшение гидравлического сопротивления, сжимаемости и т.д.

Наиболее сложной является задача интенсификации процесса фильтрования суспензий, образующих сильно сжимаемые осадки. В этом случае приемы, используемые для интенсификации разделения суспензий, образующих несжимаемые или малосжимаемые осадки, могут сводиться на нет из-за эффекта сжатия осадка. Названная задача в настоящее время является основной в повышении эффективности и расширении сферы применения фильтровального оборудования, равно как и других гидромеханических процессов.

При проектировании промышленных установок для разделения дисперсной системы гидромеханическим способом, кроме подбора и расчета основного оборудования (сепарационного), необходимы подбор и стыковка смежного оборудования, например реакторов для коагуляции или флокуляции, емкостей, отстойников и др. оборудования для предварительной обработки суспензии, насосов, компрессоров, теплообменников и т.д.

Устойчивая работа установки по разделению дисперсной системы определяется особенностями оборудования и технологических процессов на предыдущих и последующих стадиях химико-технологической системы. Таким образом промышленное разделение дисперсных систем гидромеханическим способом - это довольно сложная система разнообразного взаимозависимого оборудования, которая требует комплексного подхода.

Широкий диапазон свойств разделяемых суспензий и внешних факторов обуславливает многовариантность технологических реше-

ний, которые должны обеспечить системе разделения гибкое функционирование [16].

1.4. Фильтрация с позиций гибкой технологии

Гибкая химико-технологическая система (ХТС) – это система машин, аппаратов и управляющих устройств, связанных материальными, энергетическими и информационными потоками, предназначенная для осуществления определенных задач, способная адаптироваться к изменениям внешних и внутренних (внутрисистемных) условий при сохранении своих основных характерных функций за счет наличия в резерве избыточных степеней свободы (технологических, конструктивных, структурных и управленческих) [17].

Определение гибкой ХТС применимо и к более частным технологическим системам, например к фильтрованию, так как фильтрование в общем случае, как отмечалось выше, предусматривает целый комплекс взаимосвязанных операций: успех последующих операций зависит от совокупности предыдущих.

Исходя из общей формулировки гибкой ХТС, процесс фильтрования может быть представлен следующим образом (табл. 1.1.)

Таблица 1.1

Схема представления фильтрования как гибкой системы

Признаки	Мероприятия, обеспечивающие гибкость
Поток сырья	Предварительная подготовка и обработка сырья (концентрирование, разбавление, коагуляция, классификация и т.д.). Автоматизированный контроль параметров суспензии, адаптивная система управления качеством и потоками сырья и компонентов.
Поток энергии	Оптимальные режимы фильтрования. Совмещение операций. Поддержание высокой производительности (воздействие на ход процесса внешними факторами различной природы, применение фильтровальных вспомогательных веществ и т.д.). Регулировка тепла. Рациональный подбор технологического оборудования. Энергосберегающие технологии.
Информационный поток	Модернизация оборудования. Новые конструкции и новые организационные решения. Средства вычислительной техники. САПР и АСУ.

Продолжение табл.1.1

Признаки	Мероприятия, обеспечивающие гибкость
Поток продукции	Автоматизированный контроль и управление качеством продукции. Универсальное и комбинированное фильтровальное оборудование. Физико-химические способы кондиционирования жидкой и твердой фаз.
Экологическая гибкость	Регенерация и утилизация отработанных компонентов и реагентов. Замкнутый технологический цикл. Герметичность. Новые фильтрующие материалы с расширенными функциональными возможностями.
Социальная гибкость	Максимальная автоматизация на базе современной техники. Экспертные системы. Применение манипуляторов и промышленных роботов. Безопасность. Условия труда.

Придание технологическому процессу гибкости снимает противоречие между требованиями технологии и возможностями оборудования, позволяя достичь в частности [17-21]:

- гибкого реагирования на изменение физико-химических свойств фильтруемой суспензии и обеспечения оптимального режима работы оборудования в изменяющихся внешних условиях;
- повышения производительности за счет максимального совмещения с помощью роботов или других средств автоматизации вспомогательных операций;
- улучшения условий труда и сокращения численности обслуживающего персонала;
- новых конструкторских решений для фильтров и компоновки оборудования при размещении фильтров в помещениях за счет отказа от традиционных технических решений, связанных с приспособлением фильтровального оборудования под физические возможности человека;
- повышения качественных характеристик фильтровального оборудования и расширения его функциональных возможностей и т.д.

Очевидно, что для обеспечения гибкости процесса фильтрации необходимы скоординированные усилия специалистов в конструировании фильтров, технологии их применения, оптимизации и управления.

1.5. Роботизация фильтров

На основе анализа патентов и общих тенденций развития технологии разделения систем жидкость-твердое показано, что достигнут новый качественный уровень автоматизации фильтров периодического действия и, в частности, фильтр-прессов [18]. Этот уровень позволяет использовать промышленные фильтры для обслуживания автоматизированных фильтр-прессов и некоторых других типов фильтров [19].

Применение роботизированных систем при обслуживании автоматизированного фильтровального оборудования позволяет качественно изменить решение проблем использования фильтров в опасных для человека условиях, связанных с переработкой взрывчатых, радиоактивных, токсичных и других вредных веществ.

Основными сферами применения роботизированных систем для обслуживания фильтров периодического действия являются сборка и разборка фильтров, замена фильтрующих элементов, чистка фильтров, организация пробоотбора и аналитического контроля [21]. Использование роботизированных систем целесообразно при обслуживании фильтров, содержащих большое число одинаковых фильтроэлементов, например, фильтр-пресс, патронный фильтр. Патронные фильтры наиболее приемлемы для работы с вредными веществами, когда их обслуживание передано роботизированной системе.

Оснащение фильтра роботом повышает стоимость фильтровальной установки, что может быть компенсировано только за счет оптимизации процесса фильтрования и минимизации эксплуатационных затрат.

Повышение уровня автоматизации технологического оборудования вынуждает заново проектировать основные технологические процессы и операции для обеспечения их стабильности по отношению к воздействию внешних возмущающих факторов. Поэтому переход к созданию роботизированных фильтров требует решения технологических проблем, приобретающих новые аспекты, в том числе и углубления исследований в области теории фильтрования и фильтрования с образованием осадка в частности.

Для удовлетворения новых требований к фильтровальному обо-

дованию теория фильтрования (процесс с образованием осадка) должна рассматривать "внутренние" механизмы формирования осадка, его сжимаемости, распределения напряжений, пористости и других характеристик в осадке. Теория должна охватывать стадии предварительной подготовки суспензии, например, отстаивание, центрифугирование, а также следующие после фильтрования: промывку осадка, обезвоживание, отжим и сушку.

Общий подход к перечисленным процессам делает возможным не только описание стадий разделения и обезвоживания суспензий, но и предсказание возможных путей протекания процессов, следующих за разделением: отстаивание → фильтрование → обезвоживание → промывка → отжим → сушка.

Разработка общих теоретических принципов разделения суспензии фильтрованием, в частности с образованием сжимаемого осадка, охватывающего все этапы выделения твердой фазы, необходима для:

- 1) выбора и анализа способов предварительной обработки суспензии путем физико-химического воздействия или предварительного сгущения, что дает возможность прогнозировать и контролировать получаемые результаты;
- 2) разработки методов стабилизации свойств суспензии, подаваемой на фильтр (концентрации, температуры, вязкости, среднего размера частиц и т. д.), что достигается за счет пункта 1 при активном контроле и управлении;
- 3) поддержания заданных характеристик фильтрующей среды и проницаемости осадка в ходе фильтрования путем регулирования давления, толщины осадка и других технологических параметров;
- 4) выбора режима промывки, обезвоживания и отжима на базе информации о свойствах сформировавшегося при фильтровании осадка (показателя сжимаемости, проницаемости, распределения пористости и др.);
- 5) усовершенствования методов расчета процесса фильтрования;
- 6) разработки методов оптимизации на основе общей математической модели формирования осадка и его свойств;
- 7) обеспечения оптимального сочетания толщины осадка, числа фильтроэлементов или общей площади фильтрования, продолжитель-

ности вспомогательных операций (регенерация, замена и т.д.).

Аналогичным образом могут быть сформулированы задачи и для глубокого фильтрования в фильтроэлементах объемного типа.

Таким образом, развитие роботизированного фильтровального оборудования требует особого внимания к теории фильтрования и оптимизации основных технологических операций.

1.6. Взаимосвязь процесса фильтрования с проблемами экологии

Гидромеханические процессы разделения дисперсных систем, в том числе фильтрование и мембранная технология, могут играть значительную роль и при решении экологических проблем, как непосредственно путем их применения, так и опосредованно через свои экологические показатели [3, 22].

Прямое воздействие на промышленном уровне - сгущение, разделение дисперсных систем, очистка сырья, реагентов, полупродуктов и продуктов, улавливание и/или концентрирование вредных веществ и т.д. В этом случае к преимуществам разделительных процессов относятся: невысокие рабочие температуры; низкое энергопотребление на единицу продукции (в несколько раз ниже, чем при использовании тепловых процессов); возможность совмещения в одном аппарате нескольких технологических процессов; уменьшение в результате сгущения или обезвоживания объемов материальных потоков на последующих стадиях технологической системы; возможность регулирования состава жидких и газообразных фаз (мембранные процессы).

Опосредованное воздействие разделительных процессов в промышленности выражается, например, повышением качества и срока эксплуатации машин и механизмов, в которых используются чистые газы и жидкости; снижением затрат на хранение и доставку потребителю продукции; уменьшением энергозатрат (например при сушке, выпаривании) и т.п.

Следует иметь в виду, что фильтровальное оборудование может работать в экстремальных условиях и "дружественно" к реакционному, тепло- и массообменному оборудованию. Оборудование для фильтрования и центрифугирования можно устанавливать непосредственно

в месте образования стоков, обеспечивая их локальную очистку и снижая нагрузку на основные очистные сооружения.

Гидромеханические и мембранные процессы еще не нашли свое место в области рецилинга отходов, особенно жидко-твердое и газ-твердое. Именно здесь открываются качественно новые возможности за счет сочетания традиционных процессов разделения и мембранной технологии.

Среди экологических проблем, где может быть существенный прогресс при использовании фильтрования, выделяются две: обезвоживание осадков сточных вод и избыточного активного ила и обработка опасных шламов.

Сложность первой проблемы состоит в больших объемах подлежащих разделению суспензий, а также в том, что в подавляющем большинстве образующиеся при фильтровании осадки относятся к категории сильно сжимаемых [23] .

Вторая проблема при своем решении требует применения специализированного фильтровального оборудования, в том числе обслуживаемого роботами. Представляет интерес разработка оборудования, работающего по принципу роторных машин и роторно-конвейерных систем [24] . Системы роторного типа могут использоваться на заключительной стадии обработки опасных продуктов, когда дисперсная фаза поступает в виде концентрата, пасты, требующей порционного фильтрования или окончательного обезвоживания для последующей фиксации твердой фазы, например спеканием, пропиткой, отверждением, осаждением фиксирующего вещества в поровом пространстве осадка, упаковкой и т. д.

Усилия исследователей в этой области должны быть направлены на то, чтобы придать новый импульс развитию фильтрования и сепарации и раскрыть еще не использованные их возможности [22, 24] .

1.7. Фильтрование с образованием сжимаемого осадка

Во многих отраслях народного хозяйства производители продукции сталкиваются с проблемой разделения или обезвоживания дисперсных систем, образующих сильно сжимаемые осадки. Примерами таких систем являются коллоидные дисперсии, волокнистые суспензии, биосуспензии, органоминеральные суспензии и др. Ввиду сво-

их специфических свойств такие дисперсные системы плохо отделяются от жидкой фазы и требуют больших энергозатрат при обезвоживании. Решением данной проблемы занимаются практически все промышленно развитые страны, так как успешное решение этой задачи часто определяет конкурентоспособность продукции или эффективность экологических мероприятий.

В качестве примера можно назвать две задачи, связанные с необходимостью получения фундаментальных данных о сжимаемости осадков при их обезвоживании: добыча озерного сапропеля в качестве экологически чистого удобрения и обезвоживание избыточного активного ила и шлаков установок по очистке промышленных и бытовых сточных вод. Запасы сапропеля в Республике Беларусь оцениваются в 2-3 млрд. куб.м [25]. Не намного меньше порядок ежегодных объемов сточных вод: только в Германии ежегодно образуется до 50 млн. куб.м шлама, осажденного из воды [26]. По оценкам российских специалистов [27], объем различных видов осадков, образующихся при очистке сточных вод, составляет 150-180 млн. куб.м в год при средней влажности 96,2%.

Очевидно, что любые мероприятия, позволяющие снизить энергозатраты и себестоимость разделения и обезвоживания таких дисперсных систем, несут большую экономическую выгоду.

Следует отметить, что способность образовывать сильно сжимаемые осадки проявляют как мало-, так и высококонцентрированные суспензии. Поэтому с проблемой сжимаемости осадков приходится сталкиваться в самых различных отраслях промышленности, где для разделения дисперсных систем используются гидромеханические процессы. Подобного рода явления дают себя знать также в процессах ультрафильтрации (UF) и обратного осмоса (RO).

Обезвоживание суспензий, образующих сжимаемые осадки, порождает проблемы на всех этапах технологического процесса: от подготовки суспензии к обезвоживанию до собственно обезвоживания сформированных осадков. Обобщенно можно сказать, что эти проблемы вызваны тремя причинами.

Во-первых, наиболее ярко выраженную способность к образованию легкосжимаемых осадков проявляют тонкодисперсные частицы, которые перед их концентрированием и последующим обезвоживанием требуют применения физико-химических методов обработки с

целью предварительной агрегации частиц или создания осадков с более жестким каркасом или пористостью.

Во-вторых, под воздействием напряжений, возникающих в осадке от приложения к осадку в процессе обезвоживания внешних сил, происходит уплотнение осадка, ведущее к росту гидравлического сопротивления и снижению водоотдачи.

В-третьих, из-за большой удельной поверхности осадок содержит значительное количество жидкой фазы, удаление которой с помощью одного отдельно взятого процесса либо физически невозможно (например, отстаивание), либо не экономично (например, сдвиг без предварительного гидромеханического обезвоживания).

Именно при гидромеханическом обезвоживании сжимаемый осадок подвергается воздействию внешних сил, величина которых лежит в широких пределах, что приводит к кардинальному изменению структуры и свойств осадка.

Основными причинами, ведущими к доформированию осадка, являются: 1) структурные изменения укладки элементов слоя за счет их относительного сдвига; 2) упругие деформации пограничных адсорбционных слоев жидкости на поверхности структурных элементов слоя; 3) упругие и пластические деформации материала слоя или структурных элементов, образующих пористую среду; 4) разрушение структурных элементов слоя.

Разнообразные комбинации перечисленных причин дают сложную картину деформации реального пористого слоя (осадка), что порождает большое число моделей поведения осадка в ходе фильтрования и отжима [28]. Однако в большинстве моделей остается не раскрытым вопрос начальной стадии формирования осадка (область малых эффективных сжимающих напряжений), который определяет весь дальнейший ход процесса фильтрования, а также роль концентрации фильтруемой суспензии в структуре осадка, а следовательно и сжимаемости.

Несмотря на сложность задачи, получение качественных моделей поведения сжимаемых осадков в области малых эффективных сжимающих напряжений крайне актуально в связи с большими объемами обрабатываемых в промышленности суспензий с дисперсной фазой, находящейся в сфлукулированном состоянии. Характер изменения свойств осадка в таких суспензиях при малых эффективных напряже-

ниях часто определяет весь дальнейший ход процесса: децентрализация и обезвоживания отстаиванием, фильтрование, отжимом и т.п.

Для прогнозирования поведения осадка при изменении эффективных напряжений, действующих в осадке, а также для определения оптимальных условий ведения процесса необходимы уравнения, позволяющие описывать свойства сжимаемого осадка как можно в более широком диапазоне этих напряжений. Получение такого рода соотношений является одной из задач данной работы.

1.8. Систематизация в фильтровании и перспективы развития

К перечисленным выше проблемам вплотную прижимает задача разработки новых принципов систематизации процессов и оборудования, включая пористые среды [21,23] .

Разработка новых систем классификации фильтровального и мембранного оборудования на основе анализа всего разнообразия существующих в этой области технических решений — насущная потребность сегодняшнего дня, так как разнообразие конструкций оборудования и технологических приемов ведения процесса давно вышло за рамки традиционных систем классификации, используемых уже не один десяток лет.

Основными классификационными признаками в новых системах могут являться, например [21], пространственное и временное положение фильтрующей среды (фильтрующих элементов) в процессе разделения и регенерации, а также другие признаки.

Разработка новых систем классификации может дать следующие преимущества: разработку систем автоматизированного проектирования, в принципе меняющих подход к созданию новых типов и конструкций фильтров, а также методов их расчета путем возможности комбинирования унифицированных признаков различных групп фильтров; создание экспертных систем, позволяющих разрабатывать новые технологии; совершенствование существующего фильтровального оборудования и оптимизацию технологических процессов вместе с системами их управления.

Аналогична ситуация и в области пористых сред (осадков).

Широкое использование пористых сред в технике и технологии

создало потребность в поиске методов обобщенной оценки разнообразных параметров этих сред для управления ими или их контроля и для возможности взаимного сопоставления (сравнения). С этой целью внимание может быть обращено на адаптацию принципов теории информации для характеристики структурных и других неоднородностей пористой среды. В качестве меры совокупной неупорядоченности различных признаков структурной неоднородности может служить информационная энтропия [17, 29].

Если информационный подход даст эффективный критерий оценки степени неупорядоченности пористых сред, то возникает реальная возможность разработки разнообразных пористых сред с заданными и контролируемыми свойствами, что в свою очередь непосредственным образом скажется на процессах и устройствах, в которых применяются пористые среды.

Предварительные исследования [23] показали, что расширение числа системных признаков требует и система классификации деформируемых пористых сред - слямаемых осадков, что позволит связать различные явления, сопровождающие процессы разделения дисперсных систем - от эффекта "коллалса" пористой структуры до явления псевдоожождения.

Продвижение вперед в решении перечисленных выше проблем даст возможность расширить сферу применения фильтрования, например, в область создания новых композиционных материалов с применением процесса фильтрования или в область решения технологических задач индустриализации космоса.

Рост внимания к вопросам индустриализации космического пространства не в последнюю очередь обусловлен расширяющимися возможностями получения новых материалов, организации новых технологий, решения энергетических проблем и использования ресурсов Луны.

Отмечая роль процессов фильтрования и мембранной технологии в системах жизнеобеспечения космических пилотируемых объектов, предлагается более широко взглянуть на возможности этих процессов при решении некоторых задач индустриального освоения космического пространства [30, 31]. К достоинствам мембранных процессов и фильтрования относятся: малая чувствительность к пониженной гравитации; возможность осуществления нескольких технологи-

ческих процессов в одном аппарате; возможность использования в процессах таких факторов космического пространства, как вакуум, излучение, невесомость; возможность интенсификации процессов за счет их восприимчивости к таким управляющим воздействиям, как электрическое, тепловое, магнитное и другие поля.

Следует обратить внимание на возрастающую роль пористых сред для удержания и манипулирования материальными и энергетическими потоками в условиях пониженной гравитации.

Более детальный анализ особенностей процесса фильтрования и мембранной технологии в условиях невесомости может открыть новые сферы применения, однако для перехода от общих рассуждений к конкретным технологиям необходимы исследования как теоретического, так и практического плана. Пока же здесь больше вопросов, чем ответов:

- какие принципы закладывать в создание новых фильтрующих материалов для их многократного использования;
- как регулировать вакуум в процессе фильтрования при одновременном сведении к минимуму потерь фильтрата, жидких и газообразных сред при промывке и сушке;
- каковы должны быть конструкторские решения для промышленных фильтров в условиях невесомости;
- каковы в условиях невесомости закономерности фильтрования, а также структура осадка при разделении полидисперсных суспензий, подверженных при фильтровании в земных условиях седиментации;
- какова техническая и экономическая целесообразность гидромеханических процессов при различных объемах перерабатываемой суспензии и т. д.

В настоящее время отсутствуют критерии, позволяющие определить роль и место названных процессов в решении проблем индустриализации космоса. Нет систематизированных идей и конструкторских решений по гидромеханическим процессам применительно к названной проблеме.

Тем не менее, имеющийся уже опыт дает основания считать, что процессы фильтрования и мембранной технологии могут играть более значительную роль в индустриализации космоса.

Г Л А В А 2

КЛАССИФИКАЦИЯ ФИЛЬТРОВАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1. Система классификации по пространственно-временному принципу

2.1.1. Исходные данные

Прежде всего фильтровальное оборудование может быть разделено на две основных группы: фильтры с неподвижными при фильтровании фильтрующими элементами (ФЭ) и фильтры, у которых ФЭ или фильтрующая поверхность в процессе фильтрования изменяет свое пространственное положение (фильтры с подвижными ФЭ).

В дальнейшем для сокращения названий подгрупп фильтров в системе классификации введем условную индексацию следующего вида (рис. 2.1).

Исходной при классификации будет являться схема, представленная на рис. 2.2.

При непрерывном фильтровании и в фильтрах периодического действия в подавляющем большинстве конструкций предусмотрена регенерация ФЭ в ходе фильтрования или после его завершения.

В том и другом случаях регенерация ФЭ может осуществляться гидромеханическими, механическими или физическими способами.

Гидромеханическая регенерация осуществляется путем изменения направления или скорости движения жидкости, а также давления в различных областях фильтра. Используются струйные течения и турбулентность, гидроудар.

Механическая регенерация - удаление загрязнений с поверхности ФЭ путем механического воздействия удар, вибрация, колебательное движение, встряхивание, срез, сдвиг и т.д.

Под физическими способами регенерации имеется в виду применение различных физических полей и их комбинаций для воздействия на загрязненный ФЭ. Это звуковые, инфра- и ультразвуковые, электрические, магнитные поля, центробежные силы и др.

При регенерации ФЭ могут находиться в фиксированном положении или в движении.

В дальнейшем будем рассматривать случаи, когда регенерация

фильтрующей среды происходит в ходе процесса фильтрации, хотя описываемый способ классификации позволяет продолжить ее и в область регенерации, проводимой по завершении процесса фильтрации.

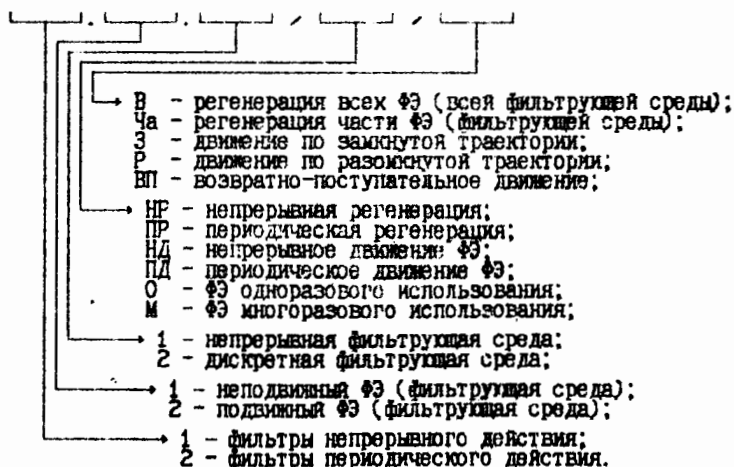


Рис. 2.1. Индексация типов фильтров при их классификации.

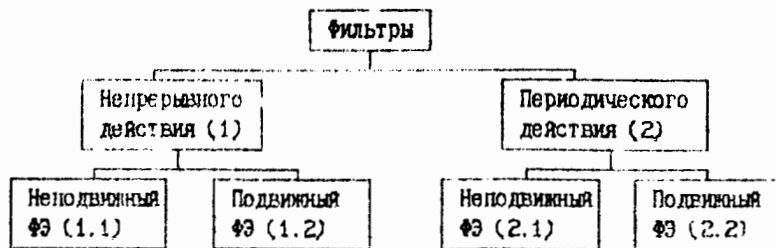


Рис. 2.2. Исходная схема классификации фильтров.

2.1.2. Фильтры непрерывного действия с неподвижной фильтрующей средой или фильтрующими элементами (ФЭ)

Фильтрам этой группы могут иметь непрерывную (1.1.1) или дискретную (перевальную) фильтрующую среду, т.е. в виде отдельных секций или фильтроэлементов (1.1.2), рис. 2.3.

В том и другом случаях эти подгруппы фильтров включают фильтры с непрерывной регенерацией всей поверхности фильтрования или ее части, а также фильтры с периодической регенерацией всей фильтрующей поверхности или ее части в ходе фильтрования.

Перечислим наиболее распространенные конструкции фильтров, относящиеся к подгруппам низшего уровня.

I.1.1/HP/B - фильтры с непрерывной фильтрующей средой (пергородкой), в ходе фильтрования имеющие непрерывную ее регенерацию:

- фильтры с тангенциальным движением фильтруемой среды относительно поверхности ФЭ (данный способ фильтрования носит название тангенциального или перекрестного фильтрования);

- динамические фильтры типа Artison [32], где между неподвижными фильтрующими кольцевыми секциями размещены на общем валу вращающиеся диски с лопастями, создающими поток суспензии вдоль фильтрующей поверхности;

- фильтры-циклоны;

- шнековые фильтр-прессы;

- фильтры с вихрями Тейлора [33];

- емкостные фильтры-сгустители с непрерывно работающей при фильтровании мешалкой и другие менее распространенные конструкции фильтров.

Для интенсификации процесса регенерации наряду с гидромеханическими способами в данном случае широко практикуется и физическое.

К фильтрам данной группы проявляется повышенный интерес в связи с их относительно простой конструкцией и расширением сферы применения юксо- и ультрафильтрации, где используются аналогичные конструкции.

1.1.1/НР/Ча - фильтры с непрерывной фильтрующей средой и непрерывной регенерацией части фильтрующей среды в ходе фильтрования.

Для фильтров этого типа характерно наложение процесса регенерации части фильтрующей поверхности на процесс фильтрования, т.е. вся фильтрующая поверхность находится в режиме фильтрования.

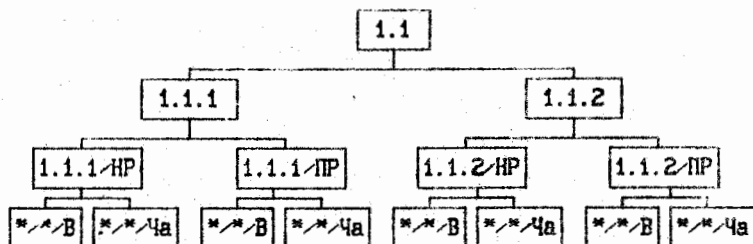


Рис. 2.3. Схема классификации фильтров непрерывного действия с неподвижной фильтрующей средой (1.1) (обозначения те же, что на рис. 2.1).

а зона регенерации непрерывно перемещается по ее поверхности. При этом в каждый данный момент времени регенерируется только часть фильтрующей поверхности.

Фильтрами такого типа являются:

- фильтры, снабженные подвижными устройствами отсоса, отдува или сыва загрязнений, размещенными над фильтрующей поверхностью, или подвижными устройствами, расположенными с внутренней стороны фильтрующей перегородки, и работающими по принципу отдува или промывки;

- фильтры с непрерывно перемещающимися по фильтрующей поверхности скребками, щетками для удаления загрязнений и другими устройствами такого же назначения.

Однако в настоящее время область применения фильтров последнего типа ограничена из-за следующих причин: наличия подаваемых механических устройств, работающих в условиях абразивного износа, что усложняет конструкцию фильтра и требует тщательного

контроля за этими устройствами при эксплуатации; проблематично их применение для фильтрования суспензий, образующих осадки с большой силой адгезии к фильтрующей перегородке.

1.1.1/ПР/В - фильтры с непрерывной фильтрующей средой и периодической регенерацией всей фильтрующей поверхности в ходе фильтрования.

Во время фильтрования в данном случае осуществляется периодическая регенерация всей фильтрующей поверхности, как правило, через равные, достаточно короткие промежутки времени. Это обеспечивает высокую скорость фильтрования, если продолжительность регенерации много меньше периода фильтрования.

К этому типу относится небольшая группа фильтров, в которых регенерация фильтрующей перегородки (удаление осадка) проводится путем периодического наложения вибрации. В результате накопившийся осадок сползает с фильтрующего элемента, но при этом процесс фильтрования не прекращается. Возможна и регенерация путем быстрого изменения формы или конфигурации фильтрующей поверхности, в результате чего осадок растрескивается и за счет сил инерции сбрасывается с фильтроэлемента, при этом фильтр не выходит из режима фильтрования.

Сюда же можно отнести фильтры, в которых поверхность фильтрования регенерируется за счет импульсного воздействия обратного тока фильтрата (например, при фильтровании через плоскую горизонтальную перегородку в направлении, противоположном силе тяжести). Практически это фильтры полунепрерывного действия, но так как продолжительность и частота периодического воздействия при регенерации всей поверхности фильтрования много меньше времени фильтрования, то их условно можно отнести к группе фильтров непрерывного действия.

Возможно наложение на непрерывную регенерацию в качестве дополнительного составляющего (то есть одновременно с непрерывной регенерацией) периодического воздействия на всю фильтрующую поверхность по схеме: 1.1.1/(ПР + ПР)/В (например, при перекрестном непрерывном фильтровании на фильтрующую перегородку периодически воздействует импульсом обратного тока фильтрата) или 1.1.1-ПР/Ча + ПР/В, когда за счет того же импульсного воздействия периодически регенерируется вся поверхность фильтрования при одновре-

менной работе устройства непрерывной регенерации части поверхности фильтрования.

1.1.1/ПР/Ча - представляет чаще всего разновидность названных в 1.1.1/ПР/Ча фильтров, когда регенерирующее устройство приводится в действие периодически, например, при достижении предельно допустимого перепада давления. Однако применение таких фильтров ограничено.

Возможна комбинация способов регенерации в виде 1.1.1/ПР/В - ПР/Ча, что имеет место в трубчатых фильтрах с перекрестным фильтрованием при движении фильтрата изнутри наружу, когда для удаления загрязнений с внутренней поверхности трубы через трубчатый фильтр периодически пропускают чистящее тело (шарообразной или другой формы), движимое потоком фильтруемой суспензии.

Группа фильтров 1.1.2/ПР/В чаще всего представляет собой фильтры-сгустители, в которых фильтрующие элементы непрерывно омываются потоком фильтруемой суспензии, сводя тем самым к минимуму отложение твердой фазы на фильтрующей поверхности.

Фильтры типа 1.1.2/ПР/Ча характеризуются тем, что на регенерацию выводится поочередно только часть фильтроэлементов или отдельные фильтроэлементы при работе остальной части ФЭ в режиме фильтрования.

Обычно это фильтры с подвижной воронкой для отсоса осадка.

Воронка периодически подводится к фильтроэлементу для его генерации, при этом вместе с осадком теряется часть очищенной жидкости из-за обратного тока фильтрата при отсосе.

1.1.2/ПР/В - фильтры с фильтрующими элементами, периодически и одновременно регенерируемые импульсным обратным током фильтрата.

Конструкции фильтры данного типа в последнее время начинают прогрессировать, так как в них удается реализовать процесс фильтрования по характеру, близкому к непрерывному.

К фильтрам группы 1.1.2/ПР/Ча можно отнести некоторые разновидности фильтров 1.1.2/ПР/Ча, в которых устройства для регенерации ФЭ приводятся в действие только после достижения критических параметров процесса фильтрования.

Здесь также возможны комбинации регенерирующих периодических и непрерывных воздействий на фильтрующие элементы во время филь-

трования: 1.1.2(НП+НР)/В; 1.1.2(НП+НР)Ча; 1.1.2(НР+Ча+НР)/В и т.п.

Большинство фильтров типа (1.1) представляют собой фильтры-сгустители, предназначенные для концентрирования суспензий.

2.1.3. Фильтры непрерывного действия с подвижными фильтрующими элементами (1.2)

Схема возможных вариантов таких фильтров приведена на рис.2.4. Все фильтры (1.2) могут быть разделены на следующие группы:

а). 1.2.1 - фильтры, у которых фильтрующая среда является непрерывной, т.е. она представляет собой замкнутую поверхность или слой, на различных участках которых одновременно осуществляются разные этапы процесса разделения (фильтрование, отжим, промывка, сушка, выгрузка осадка и т.п.);

б). 1.2.2 - фильтры с дискретной фильтрующей средой или ФЭ, для которых характерно то, что на отдельных ФЭ или дискретных участках фильтрующей среды в данный момент времени осуществляют только одну определенную технологическую операцию.

В свою очередь группы фильтров 1.2.1 и 1.2.2 могут быть разделены на две подгруппы: фильтры с непрерывным движением фильтрующей среды (ФЭ) - 1.2.1/НД и 1.2.2/НД, а также фильтры с периодическим движением фильтрующей среды или ФЭ - 1.2.1/ПД и 1.2.2/ПД.

В названных подгруппах движение фильтрующей среды (ФЭ) может быть организовано по замкнутой линии (траектории) - ***/З или разомкнутой ***/Р.

Ниже приведены примеры принадлежности фильтров к этим группам.

1.2.1/НД/З - барабанные и дисковые фильтры под вакуумом или под давлением; ленточные фильтры; ленточные фильтр-прессы; фильтры с движущимся зернистым фильтрующим слоем (с регенерацией загрузки и возвратом в фильтр); тарельчатые вакуум-фильтры; центробежные фильтры (фильтрование через вращающийся вокруг оси фильтрующий элемент).

1.2.1/НД/Р - фильтр с рулонной фильтрующей лентой, которая сматывается с рулона на непрерывно движущийся конвейер, выполняющий роль дренажного основания; ленточные фильтры с намотанным фильтрующим слоем.

1.2.1/ЦД/З - зернистые фильтры с периодическим выводом отработавшей фильтрующей среды из зоны фильтрования.

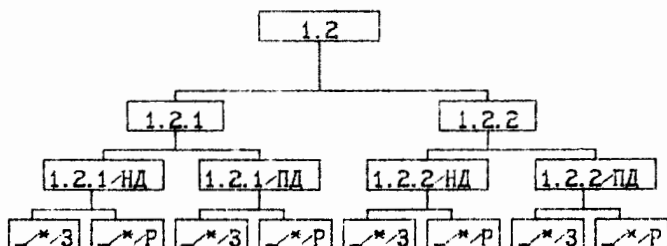


Рис. 2.4. Схема классификации фильтров непрерывного действия с подвижной фильтрующей средой (1.2).

1.2.1/ЦД/Р - фильтры с рулонной фильтрующей лентой, которая периодически подается в зону фильтрования для замены отработанного участка, например, фильтры для очистки смазочно-охлаждающих жидкостей [34].

1.2.2/НД/З - карусельные (ковшовые) вакуум-фильтры; роторные патронные фильтры [35,36]; роторно-дисковые фильтры [37].

1.2.2/НД/Р - фильтры конвейерного типа с фильтрующими элементами одноразового использования, например, патронного типа, которые постоянно устанавливаются на конвейерную систему, перемещаются в зону фильтрования и после ее прохождения удаляются с конвейерной системы, например, для регенерации.

1.2.2/ЦД/З - роторные патронные фильтры и др.

1.2.2/ЦД/Р - фильтры конвейерного типа.

В большинстве своем фильтры типа (1.2) предназначены для обезвоживания концентрированных и среднеконцентрированных суспензий. Как предельный случай, движение фильтрующего элемента по замкнутой траектории может быть представлено возвратно-поступательным движением.

Регенерация фильтрующей перегородки или ФЭ в большинстве фильтров непрерывного действия (1.2) осуществляется вне зоны фильтрования, хотя и вариант с дополнительной регенерацией ФЭ в

зоне фильтрования не лишен смысла, если задача фильтрования состоит в сгущении суспензии.

В данной группе фильтров следует выделить роторные и конвейерные фильтры, конструктивная разработка которых может дать новые перспективные фильтрующие системы для переработки ограниченных объемов концентрированных суспензий.

Здесь, как и в рассмотренной выше группе фильтров (1.1), возможно сочетание различных признаков, например, в роторно-конвейерных фильтрах, разработка которых находится в настоящее время на начальной стадии.

2.1.4. Фильтры периодического действия

Фильтры периодического действия - наиболее давно используемый вид оборудования, который представлен наибольшим разнообразием конструкторских решений.

Фильтры периодического действия условно можно разбить на фильтры с однократным ФЭ и фильтры с многократным использованием ФЭ.

К фильтрам с однократным ФЭ относятся также, в которых ФЭ или фильтрующая среда не подлежат регенерации и заменяются после каждого цикла фильтрования на новые. Так как данная группа фильтров предназначена для работы в ответственных условиях, то она достаточно хорошо исследована.

2.1.1/0 - фильтры с неподвижными ФЭ или непрерывной однократно используемой фильтрующей средой. Здесь под непрерывной фильтрующей средой подразумевается плоская или ленточная фильтрующая перегородка и фильтры с одним фильтрующим элементом (если число ФЭ превышает единицу, то такой фильтр переходит в разряд 2.1.2).

Как правило, фильтры с однократным использованием ФЭ предназначены для работы с малоконцентрированными суспензиями, когда процесс фильтрования протекает с закупориванием пор ФЭ или сопровождается удержанием частиц в слое фильтрующего материала с развитой поверхностью (глубинное фильтрование). К данной группе фильтров можно отнести: нутч-фильтры с однократной фильтрующей

перегородкой, фильтрующие патроны, диски, мешочные фильтры с одним мешком, фильтрующий рукав и т. п.

2.1.1/М - преимущественно является конструктивным развитием предыдущего барьента, но с учетом многократной регенерации $\Phi\text{Э}$ по месту их установки, что требует особой конструкции как $\Phi\text{Э}$, так и конуса фильтра, более сложной методики технологического расчета.

2.1.2/О или 2.1.2/М - конструктивное развитие вариантов (2.1.1). Фильтровальное оборудование, используемое для этих целей - многоэлементные патронные, трубчатые, мешочные фильтры, а также дисковые микрофильтры для стерилизации, некоторые типы фильтр-прессов, листовые фильтры с напыленным слоем и т. д. Положение фильтрующих элементов в этих фильтрах при регенерации не меняется.

Регенерация $\Phi\text{Э}$ в фильтрах периодического действия осуществляется многократно и затраты на нее становятся сопоставимы с затратами на фильтрование. В этой связи приобретает смысл разделение фильтров этого типа по характеру технических средств, используемых для регенерации: 1) с ручной регенерацией; 2) с механизированной регенерацией; 3) с автоматизированной регенерацией; 4) с использованием роботов или манипуляторов.

В отношении оборудования могут встречаться все перечисленные виды технических средств регенерации и обслуживания. Например, для малых фильтр-прессов применяют ручное обслуживание фильтра при регенерации; для фильтр-прессов средних размеров - механизированное, а для больших фильтр-прессов - автоматизированное и/или роботизированное обслуживание при регенерации.

При переходе от технических средств первой группы к последующим имеет место их качественное изменение. Роботизированное обслуживание фильтров интегрирует в себе все перечисленные выше технические средства на принципиально новом уровне, позволяющем обслуживать фильтры различных размеров при минимальном участии человека.

Использование роботизированных систем наиболее целесообразно при обслуживании фильтров, содержащих большое число однотипных фильтроэлементов. Например, при обслуживании патронных фильтров или для извлечения $\Phi\text{Э}$, содержащих опасные осадки.

При использовании роботизированных систем могут появляться и новые оригинальные конструкции фильтров, не связанные с традиционными решениями, основанными на участии человека, как элемента системы их обслуживания.

Периодические фильтры с непрерывной фильтрующей средой (2.2.1) могут иметь фильтрующую перегородку одноразового применения, движущуюся по разомкнутой траектории, и фильтрующую среду многократного использования движущуюся по замкнутой траектории. Обычно движение фильтрующей среды осуществляется после завершения фильтрования. К фильтрам типа (2.2.1) относятся автоматизированные фильтр-прессы ФПАЖМ и др.; горизонтальные ленточные фильтры с гидравлическим прессом [38]; емкостные фильтры со сходящим фильтровальным полотном [39, с.126]; фильтр-пресс с бумажной фильтрующей лентой для очистки СОЖ; фильтры типа Nutrex и другие.

Дискретные подвижные фильтрующие среды (2.2.2) применяются в конструкциях дисковых фильтров типа Фонда с центробежной выгрузкой осадка; дисковых фильтров с удалением осадка щетками [40]; в некоторых конструкциях фильтр-прессов.

Пространственно-временной принцип по отношению к ФЭ выявляет такие особенности фильтров, которые в традиционных классификациях (систематизациях) не находят места или уходят на второй план.

Предложенная систематизация позволяет получать новые варианты фильтров путем систематизации приемов фильтрования, обеспечивает дифференцированный подход к расчету фильтров (теории моделирования процесса фильтрования) за счет поэтапного перехода от низших ступеней в классификационной пирамиде к высшим.

2.2. Классификация пористых сред со сквозными поровыми каналами

Упрощенная классификация пористых слоев со сквозными порами, учитывающая как структуру среды, так и ее сжимаемость (способность деформироваться под воздействием внешних сил), впервые дана в [41], однако реальное разнообразие пористых сред гораздо шире, что привело к необходимости расширить рамки классификационной схемы (табл.2.1).

Как видно из приведенной схемы, во всех типах пористых слоев со сквозными порами (гранулированные, негранулированные, смешанные) возможно образование деформируемых структур, причем их способность к деформированию будет определяться свойствами материалов, формирующих пористый слой, а также видом первоначальной укладки частиц в слое.

Под деформируемостью здесь следует понимать не только способность слоя изменять свой объем, в частности сжиматься, под воздействием внешних нагрузок, но и способность изменять объем, пористость под воздействием эффективных напряжений, возникающих при движении жидкости (газа) из-за силы трения между движущейся средой и поверхностью частиц слоя (поверхностью порового канала). Эти эффективные напряжения в слое осадка распределены не равномерно и нарастают от входа движущейся среды в канал к выходу из него [28].

Обычно в гидромеханических процессах седиментации, фильтрации, центрифугирования, откачки и промывки вместо термина "деформирование осадка" используют термин "сжимаемость осадка" - способность осадка уменьшать свой объем (пористость) под воздействием возникающих в нем сжимающих напряжений (выражается в увеличении гидравлического сопротивления). Однако это определение нуждается в корректировке.

Основными причинами, вызывающими деформирование осадка (в частности сжимаемость), являются:

- 1) структурные изменения в укладке элементов слоя;
- 2) упругие деформации пограничных адсорбционных слоев жидкости на поверхности структурных элементов слоя;
- 3) упругие и пластические деформации материала (структурных элементов, образующих пористую среду);
- 4) разрушение структурных элементов (частиц) слоя.

Данный перечень является укрупненным и не охватывает всех возможных причин деформирования осадков, но позволяет их систематизировать.

Деформации пористого слоя могут быть упругие и неупругие (пластические).

Таблица 2.1

Классификация пористых слоев со сквозными порами

Вид слоя (пористой среды)	Структура	Поведение	Примеры
Слой из гранул (1)	→ Твердые недеформируемые частицы (точечный контакт)	→ несжим. слой	Песок, кварц и т.п. (1.1)
	→ Из деформируемых частиц (контакт по площади)	→ сжим. слой	Уплотнение за счет изменения укладки частиц. В принципе допустимые пригодны для всех осадков. (1.2)
Негранулированные слои (2)	→ Жесткий скелет	→ несжим. слой	Керамика, пористые металлы (2.1)
	→ Деформируемый скелет	→ сжим. слой	→ Эластичные, губчатые (2.2) → Неэластичные тестообразные (2.3)
Смешанные слои (3)	→ Жесткий скелет + жесткие частицы наполнителя	→ несжим. слой	Композиты из металлов и металлокерамики (3.1)
	* → Жесткий скелет + деформируемые частицы наполнителя	→ сжим. слой	Композиты с деформируемыми частицами наполнителя (3.2)
	→ Деформируемый скелет + жесткие частицы наполнителя	→ сжим. слой	Нетканые материалы с минеральным наполнителем и т.п. (3.3)
	→ Деформируемые скелет и частицы наполнителя	→ сжим. слой	Нетканые материалы с деформируемым наполнителем и т.п. (3.4)

* - степень сжимаемости определяется соотношением доли гранул (частиц) и материала скелета в слое. Эти материалы можно условно отнести к полусжимаемым.

Разнообразные комбинации названных причин дают сложную картину деформации реального пористого слоя (осадка).

Из названных выше причин деформации пористого слоя останемся на двух: упругие деформации материала слоя и изменение структуры слоя.

В зависимости от граничных условий упругие деформации материала слоя могут вести как к сжатию, так и расширению слоя (рис. 2.5). Если внутренняя поверхность слоя жесткая и неподвижная, то пористый материал при деформировании под воздействием приложенного перепада давления и эффективных напряжений, создаваемых движущейся средой, будет сжиматься (рис. 2.5а). При жесткой фиксации лобового слоя пористого материала и сетчатой структуре взаимосвязанных элементов слоя будет наблюдаться обратное явление - расширение слоя (рис. 2.5б). Примером здесь могут служить материалы типа трикотажного "спандекс".

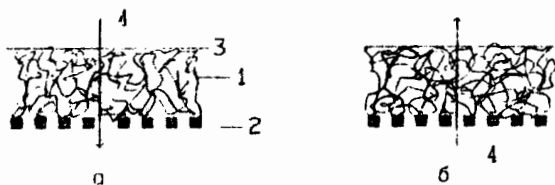


Рис. 2.5. Схема деформации пористого материала со сквозными порами. 1- пористый материал; 2- жесткая пористая неподвижная подложка или основание пористого материала; 3- свободная поверхность материала; 4- направление движения среды через пористый слой.

Если элементы слоя не связаны между собой в сетку и имеют возможность пространственного перемещения в слое, то пористый материал может деформироваться аналогично схеме (рис. 2.5). Предельным случаем для восходящего потока (рис. 2.5б) при отсутствии общей (связанной) сетчатой структуры частиц слоя (насыпной слой) является псевдооживленный слой (свободная миграция частиц в слое).

Очевидно, что псевдооживленный слой не относится к деформируемому слою, предполагающему наличие скелета, воспринимающего нагрузку, которая передается от частицы к частице за счет их контакта. Однако предлагаемый подход позволяет органично включить деформируемые в гидромеханических процессах среды в более общую систему расширяющихся пористых сред, где имеется качественный переход от расширяющейся деформируемой пористой среды к псевдооживленному слою.

Интересной задачей для моделирования может являться комбинированный случай: расширяющаяся пористая среда с внутренней псевдооживленной фазой - наполнителем.

Структурные изменения в пористом слое могут происходить без изменения его общего объема за счет только перераспределения одной из компонент пористого композиционного слоя внутри жесткого скелета слоя под воздействием массовых сил или гидродинамического потока. В этом случае происходит перераспределение локальной пористости внутри пористого материала и изменение длины и конфигурации сквозных пор, сопровождающееся изменением общего гидравлического сопротивления слоя. В предельном случае несвязанной со скелетом компоненты пористого композиционного слоя может наблюдаться суффозия, то есть миграция свободных частиц в скелете слоя с потоком.

Таким образом для гидромеханических процессов деформируемую пористую среду (осадок) можно определить как пористую среду со сквозными порами, которая под воздействием внешних условий и гидродинамического потока способна изменять объем и/или пористость, в том числе и за счет ее перераспределения в объеме пористого материала, а в результате этого происходит изменение ее гидравлического сопротивления (проницаемости).

Частным случаем деформируемых пористых сред являются сжимаемые пористые среды (осадок), пористость которых уменьшается и/или перераспределяется в объеме пористого материала с одновременным увеличением его гидравлического сопротивления под воздействием внешних сил и сил гидродинамического потока, движущегося через пористую среду.

Таким образом расширение схемы классификации деформируемых пористых слоев, образующихся или применяемых в гидромеханичес-



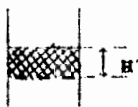
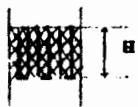







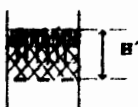



ких процессах, выявило обширную группу смешанных (композиционных) сред, некоторые типы которых не принимались во внимание при моделировании деформируемых осадков, а также при технологических расчетах. Расширено понятие деформируемости пористых сред в гидромеханических процессах разделения дисперсных систем не только на сжимаемые, но и расширяющиеся среды вплоть до состояния псевдооживления. Дана более общая формулировка сжимаемых осадков по сравнению с [28], что позволяет включить в модель осадка пористые среды, для которых рост гидравлического сопротивления обусловлен не изменением средней пористости в объеме, а перераспределением твердой фазы внутри объема среды с созданием градиента пористости в ней.

Деформируемые осадки и пористые фильтрующие среды на основе проведенного выше анализа могут быть расположены в следующий ряд (табл. 2.2):

1. Сжимаемые	↑ Направление движения сплошной среды (дисперсионной среды) через пористую среду: от внешней поверхности - к подложке
2. Полусжимаемые (жесткий каркас, сжимаемый наполнитель)	
3. НЕСЖИМАЕМЫЕ	<hr/>
4. Полураширяющиеся (жесткий каркас, расширяющийся наполнитель)	↓ Направление движения дисперсионной среды через пористую среду: от подложки - к внешней границе
5. Ограниченно расширяющиеся (сетчатая структура, закрепленная на подложке или на жестком каркасе)	

Таблица 2.2

Типы деформируемых пористых сред в гидромеханических процессах

№	Исходное состояние	Направление потока	Деформированное состояние
1			 $H' < H$
2			 $H' = H$ XX-каркас ■-наполнитель
3			 $H' = H$
4			 $H' = H$
5			 $H' > H$

В теории и практике фильтрации ограничивались анализом и моделированием осадков и пористых сред типов 1 и 3, хотя в настоящее время известны конструкции фильтров, реализующих фильтрацию с пористыми средами остальных типов 2, 4 и 5, которые содержат потенциальные возможности повышения эффективности фильтрации.

Г Л А В А 3.

ОТ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ФИЛЬТРОВ К РОБОТИЗИРОВАННЫМ

В настоящее время достигнут новый качественный уровень автоматизации фильтров периодического действия и, в частности, фильтр-прессов. Этот уровень позволяет использовать промышленных роботов для обслуживания автоматизированных фильтр-прессов и некоторых других типов фильтров периодического действия.

В качестве примера приведем механизм для выгрузки осадка из нутч-фильтра [42] (рис. 3.1).

Механизм состоит из вертикальной стойки и колесчатого рычага с ковшовым или роторным рабочим органом. Управление работой устройства можно осуществлять по программе с помощью программируемого микропроцессора.

В качестве примера роботизированного фильтра приведем устройство, описанное в патенте [43] (рис. 3.2 и 3.3).

Фильтр-пресс смонтирован на горизонтальной несущей балке. Все операции по обслуживанию рабочих элементов выполняются роботом, перемещаемым вдоль фильтра. Робот снабжен манипулятором, который раздвигает и сдвигает рамы, счищает осадок, меняет фильтрующий полотно и проводит другие операции. Робот управляется по специальной программе, снабжен видеокамерой для корректировки своих действий и может перемещаться вдоль направляющих, расположенных сбоку от фильтра.

В зависимости от размеров фильтров, продолжительности цикла фильтрования, длительности операции по обслуживанию могут быть предложены различные схемы компоновки фильтров и робота (рис. 3.4): а) неподвижные индивидуальные разгрузочно-погрузочные роботы; б) индивидуальные разгрузочно-погрузочные мобильные роботы; в) обслуживание двух рядов фильтров одним подвижным роботом; г) обслуживание одним подвижным роботом расположенных в три ряда роботов; д) обслуживание подвесным мобильным роботом. Здесь М - магазин-накопитель, предназначенный в зависимости от цели для подачи фильтрующих элементов или накопления отработанных. Предполагается, что магазин-накопитель и робот связаны между собой кинематически, причем магазин-накопитель может перемещаться синхронно с роботом, а при необходимости выводиться из рабочей зоны робота и заменяться на другой.

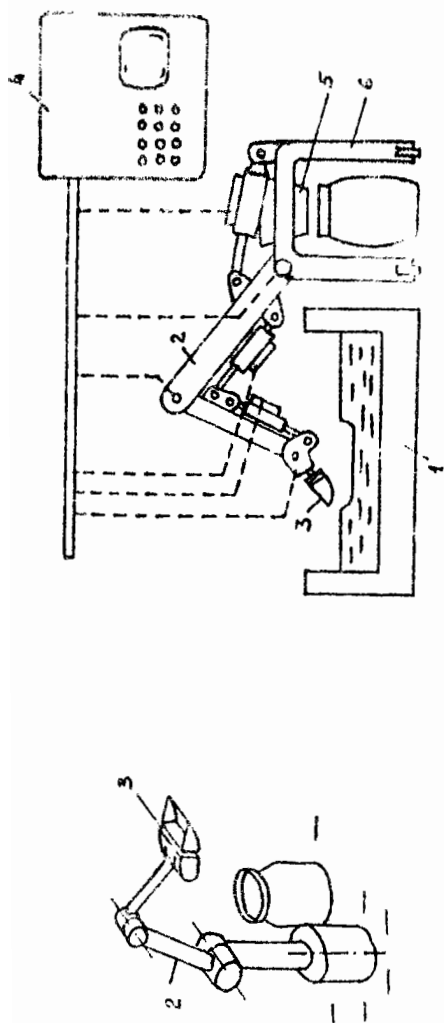


Рис. 3.1. Нутчфильд [42]. 1 - нутч; 2 - коленчатый рычаг; 3 - рычаг; 3 - ковшовый или роторный рабочий орган; 4 - управляющая станция; 5 - воронка; 6 - станция.

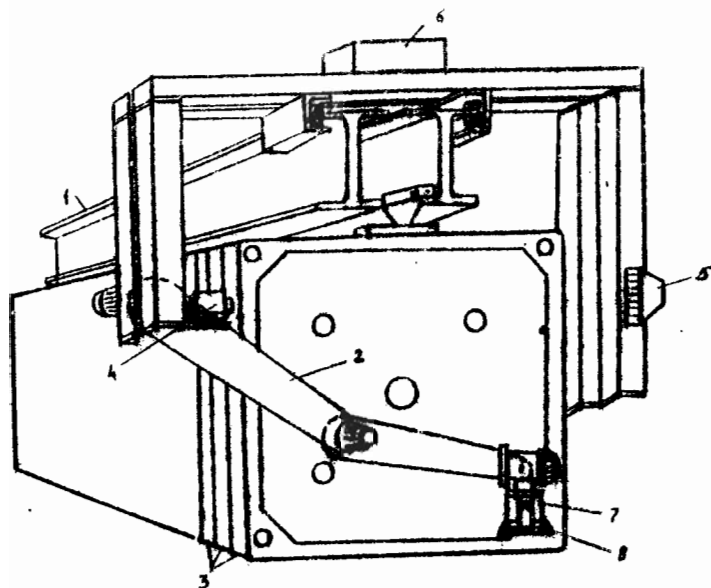


Рис. 3.2. Фильтр-пресс [43]. 1 — горизонтальная несущая балка с транспортной тележкой; 2 — манипулятор; 3 — плиты фильтр-пресса; 4 — видеокамера; 5 — фара; 6 — привод; 7 — захват; 8 — сменные устройства для удаления осадка с рам.

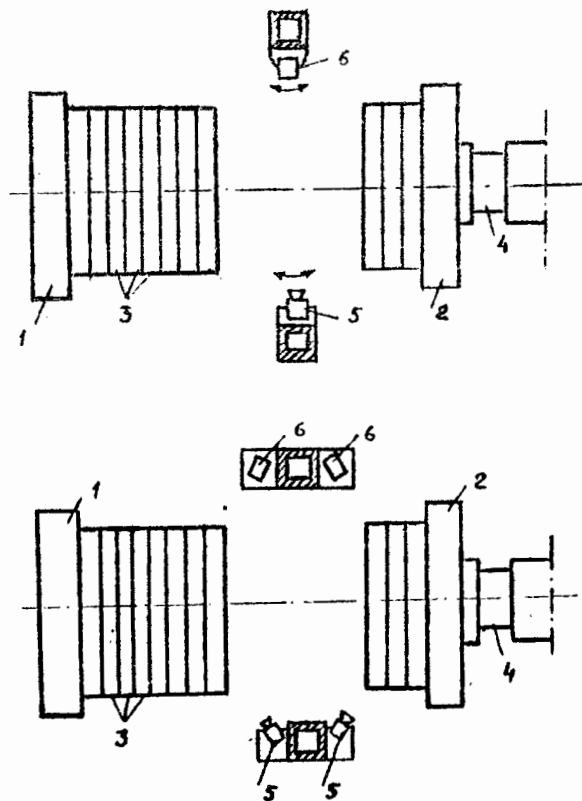


Рис. 3.3. Фильтр-пресс. 1,2 - зажимные плиты фильтра; 3 - рама; 4 - гидроцилиндры; 5 - видеокамеры; 6 - феры.

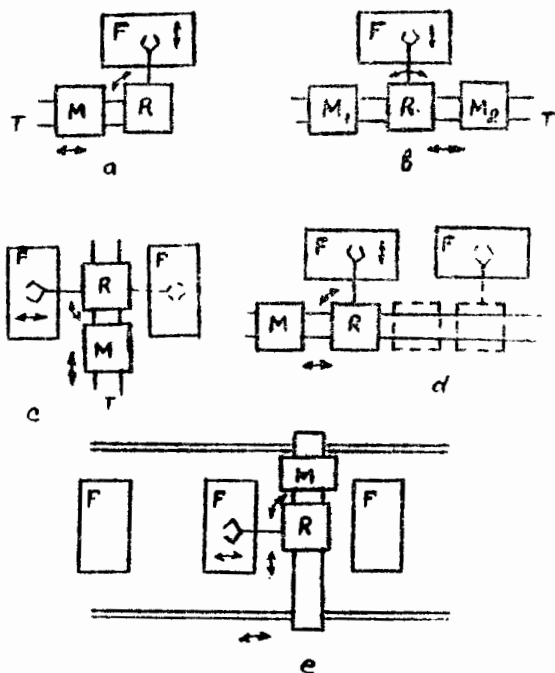


Рис. 3.4. Схема возможных компоновок роботов и обслуживаемых ими фильтров (F): M - магазин-накопитель; T - трасса движения робота; R - робот.

Вариант (а) при неподвижной установке робота пригоден для обслуживания куч-фильтров.

Для фильтр-прессов с большими габаритными размерами наиболее рациональным следует считать применение роботов в комплексе с механизмами для раздвижения и перемещения плит и рам.

Перспективно использование роботов для обслуживания фильтров, оснащенных большим числом однотипных фильтроэлементов, например, патронных фильтров.

В зависимости от конструкции патронные фильтры имеют от одного до нескольких сотен патронов в одном корпусе, длина фильтровальных патронов варьируется от 0,1 до 1,8 м [44]. Длинные патроны могут формироваться путем последовательного соединения нескольких коротких (длина короткого патрона обычно 0,1 - 0,25 м). Увеличение количества патронов, установленных в одном корпусе, позволяет снизить приходящуюся на них удельную нагрузку по твердой фазе, что увеличивает срок службы патронов. Процесс фильтрования может вестись как с образованием осадка на патроне, так и по глубинному механизму задерживания загрязнений в объеме фильтровального материала патрона.

Обычно патроны в фильтре размещают вертикально с креплением их верхних концов в грубой решетке. Такое расположение удобно и для манипулятора робота, так как центр тяжести патрона находится ниже точки захвата патрона манипулятором в течение всего времени манипулирования: отсоединения от решетки, подъема, а также при установке и закреплении нового патрона. Робот может обслуживать фильтры с длинными патронами, когда последние набираются из нескольких коротких через уплотнения или соединительные втулки.

При большом числе фильтроэлементов, размещенных в корпусе фильтра, возможны варианты, когда робот неподвижен, а корпус фильтра поворачивается вокруг вертикальной оси. В результате в рабочую зону манипулятора последовательно вводятся сектора грубой решетки фильтра с патронами (рис. 3.5 (а)).

Интересен вариант сборки длинных составных патронов непосредственно на грубой решетке фильтра. В этом случае полезно рассмотреть вариант типа фильтра "Nutrex" с корпусом, поворачивающимся на цапфах вокруг горизонтальной оси (рис. 3.5 (б)).

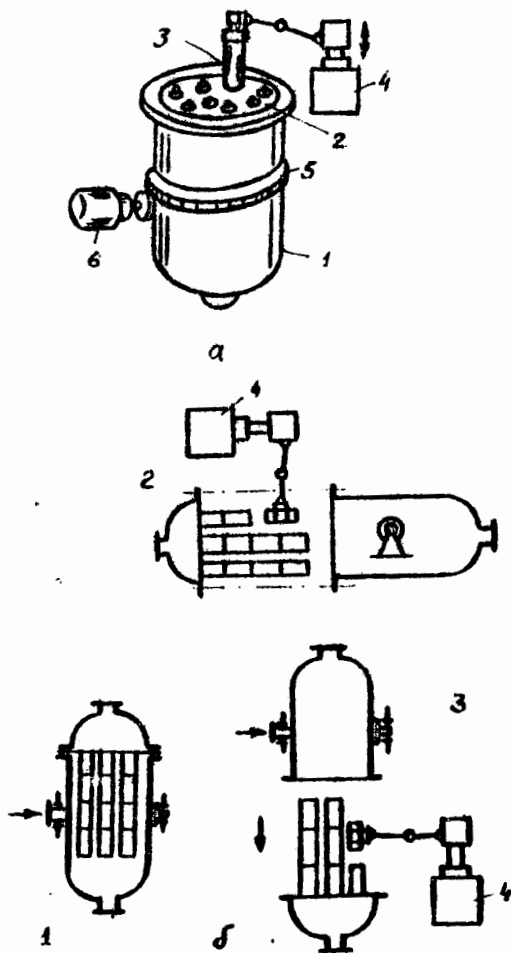


Рис. 3.5. Схемы установки патронных фильтров. (а) - фильтр с большим числом патронов в корпусе: 1 - корпус фильтра; 2 - трубная решетка с закрепленными патронами; 3 - патрон; 4 - робот; 5 - приводное зубчатое колесо; 6 - привод. (б) - фильтр с поворачивающимся корпусом для составных патронов, собираемых непосредственно на трубной решетке фильтра: 1 - рабочее положение фильтра; 2 - положение фильтра во время сборки и разборки (при повороте корпуса на 90°); 3 - то же при повороте корпуса на 180° .

При глубинном механизме фильтрования тонкодисперсных суспензий, не подверженных седиментации и не образующих на поверхности патрона осадка (осветлительное фильтрование), можно взамен вертикального расположения фильтроэлементов использовать вариант горизонтального расположения корпуса и патронов.

Пространственное положение фильтроэлементов перестает играть какую-либо существенную роль при отсутствии седиментации в процессах фильтрования без образования осадка. В этом случае предложена горизонтальная схема расположения патронных фильтроэлементов (рис. 3.6).

Для патронных фильтров на рис. 3.6 показано три варианта конструкторских решений. Общим для них является подвижный съемный корпус фильтра, который может откатываться в направлении, указанном на рисунке стрелкой. В результате фильтроэлементы становятся доступными для замены с помощью робота (робот на рис. 3.6 не указан для упрощения схемы) [45].

Так как в рассматриваемых вариантах проблема удаления осадка из корпуса фильтра отсутствует, то штуцер 3 для подачи суспензии может быть совмещен с камерой для фильтрата 2, и конструкция съемного корпуса упрощается:

Устройство перемещения корпуса с целью создания дополнительного рабочего объема для манипулятора робота снабжается поворотным приспособлением. В этом случае корпус после откатывания поворачивается на 90° в горизонтальной плоскости.

Остановимся более подробно на этой конструкции патронного фильтра, так как она имеет ряд достоинств, которые могут быть полезны и в случае, когда робот не используется.

В традиционных конструкциях патронных фильтров решетку с патронами нужно извлекать из корпуса, а для фильтров с большой суммарной площадью фильтрования приходится использовать вспомогательные устройства, например, кран-балку. В случае небрежного выполнения операции извлечения решетки с фильтровальными патронами возможны удары патронов о корпус фильтра, что приводит к их повреждению. Аналогичные затруднения могут возникать и при сборке фильтра.

Перемещения решетки с патронами за пределы фильтра ведет к загрязнению рабочей зоны и может представлять угрозу для обслужи-

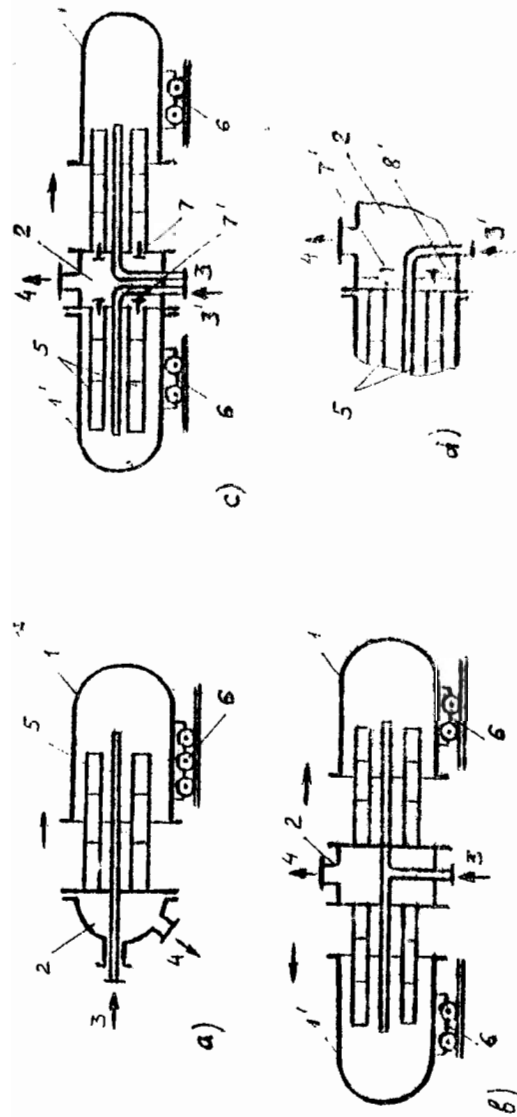


Рис. 3.6. Варианты конструкторского решения для фильтра: (а) — горизонтальным расположением фильтроэлементов. (а) — фильтр со ствольным корпусом; (б) — ствольный фильтр с общей камерой для фильтрата и раздельным питанием суспензиию семян с фильтроэле-ментами; (в) — ствольный фильтр непрерывного действия; (г) — вариант установки клапанов в фильтре с большим числом фильтроэле-ментов. 1, 1' — ствольный корпус; 2 — камера для фильтрата; 3, 3' — вод суспензия; 4 — штуцер для отвода фильтрата; 5 — фильтроэле-менты; 6 — устройство для пережатия корпуса; 7, 7' — клапаны, установленные в гнездах крепления патрубков в трубной решетке; 8 — клапанная таблица.

важного персонала. В этом случае жесткое крепление решетки к крышке фильтра уменьшает количество уплотнений, периодически подвергаемых разборке, с двух до одного, повышая надежность герметизации фильтра. Кроме того, патроны как при сборке, так и при разборке будут находиться в строго фиксированном положении, что дает возможность производить их замену непосредственно в рабочей зоне фильтра с применением средств механизации.

Варианты вертикального размещения фильтра, когда корпус сдвигается вверх или вниз с поворотом на 90° , рассмотрены в [45].

Для увеличения общей площади фильтрования фильтр может иметь две камеры для суспензии и одну общую камеру для фильтрата (б). Замена фильтроэлементов проводится одновременно на обеих трубных решетках, что вынуждает предусмотреть установку двух роботов, каждая из которых обслуживает свою секцию с патронами. Возможно обслуживание фильтра одним роботом при последовательной обработке секций, но при этом увеличивается продолжительность вспомогательных операций.

В вариантах (а) и (б) фильтр вынужден находиться в состоянии простоя при замене фильтроэлементов, что снижает его среднюю производительность за цикл.

Совмещение процесса фильтрования и замены фильтроэлементов обеспечивается вариантом (в), где одна секция, например 1', находится в режиме фильтрования, а другая - на обслуживании.

Такой режим работы достигается за счет установки в каждом гнезде трубной решетки клапана, отдельного подвода суспензии в секции и поддержания в камере фильтрата избыточного давления.

Во время работы одной из секций в режиме фильтрования в корпусе фильтра создается давление выше, чем в камере 2, и клапаны трубной решетки секции 1' открываются для пропуска фильтрата из внутренней полости патронов в камеру 2. Если секция 1 находится на обслуживании, то за счет избыточного давления в 2 клапаны в трубной решетке этой секции будут закрыты, предотвращая тем самым утечку фильтрата.

Если число фильтроэлементов в секции велико, то для уменьшения числа клапанов может быть установлена дополнительная клапанная тарелка, на которую вынесены перепускные клапаны. Это делает фильтр более конкурентоспособным.

Сопоставим рассмотренные варианты, полагая для простоты что при прочих равных условиях общая площадь фильтрования каждой секции одинакова, а время фильтрования t равно продолжительности обслуживания t_D одной секции (см. табл. 3.1). Здесь за единицу принята производительность за цикл $t_c = t + t_D$ фильтра по варианту (а).

Таблица 3.1
Сопоставление вариантов обслуживания фильтров

Вариант, рис. 4.6	Относительная производительность за цикл	Число обслуживаемых роботов	Примечание
а	1	1	
б	1,33	1	Один робот последовательно обслуживает две секции
б	2	2	Одновременное обслуживание каждой секции отдельным роботом
в	2	1	

Как следует из таблицы, по соотношению (производительность)/(число обслуживаемых роботов), варианты располагаются в следующей последовательности: (в) > (б₁) > (а) = (б₂). Внимания заслуживает вариант (в), для которого относительный показатель производительности становится больше 2, если $t > t_D$ (например, при $t_D = t/2$ производительность за цикл по отношению к варианту (а) составляет приблизительно 2,7). Поскольку замена фильтроэлементов в одной секции делается одновременно с фильтрованием в другой, средняя производительность рассчитывалась как средняя за период, в течение которого сдвиг фаз в цикле фильтрования и обслуживания равен нулю.

При фильтровании в направлении изнутри патрона наружу форма корпуса может быть видоизменена, например, до близкой к параллелепипеду, когда патроны могут быть размещены в ряды или в шахматном порядке, что упрощает в прямоугольных координатах задачу ориентации и позиционирования робота.

Для роботизированного обслуживания пригодны мешочные фильтры, а также фильтры, у которых фильтровальные патроны представляют собой набор дисков, колец и т.п.

Патентные виды схемы не исчерпывают все многообразие систем фильтрации. Следует иметь в виду, что для эффективной работы системы необходимо установить строгий контроль за широким кругом технологических параметров, что особенно важно, когда один робот обслуживает группу фильтров.

Применение для роботизированных фильтров автоматических систем пробного фильтрования с целью определения свойств суспензии и осадка [46-49] и экстраполяции полученных результатов на промышленный процесс фильтрования может значительно продвинуть проблему в область практического применения. Термин "пробное фильтрование" здесь означает фильтрование суспензии на специальном измерительном модуле непосредственно перед началом промышленного цикла, а не определение свойств суспензии в лабораторных условиях. Результаты пробного фильтрования должны анализироваться компьютером и на основе сравнения с заданными технологическими параметрами корректироваться в нужном направлении.

Более глубокое понимание взаимосвязи между кинетикой процесса фильтрования и конструкциями фильтровального оборудования (включая варианты с применением роботов) достижимо при дальнейшей разработке принципов классификационной системы, рассмотренной в главе 2.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖИДКОЙ СУСПЕНЗИИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ФИЛЬТРА

Для дисперсной системы с твердой фазой соотношение дисперсной фазы и дисперсионной среды играет определяющую роль в реологии, структурообразовании и, как следствие, в технологических процессах с использованием дисперсных систем и свойствах конечных продуктов. Изучение свойств дисперсных систем в зависимости от концентрации твердой фазы занимает большое место в коллоидной химии, механике дисперсных систем, химической технологии и др.

Роль дисперсной фазы резко возрастает с уменьшением размера частиц, когда преобладающими становятся физико-химические факторы связанные с развитой поверхностью раздела фаз. Физико-химические явления ответственны за коагуляцию, пептизацию, адсорбцию и многие другие явления. Имеется обширная литература посвященная различным аспектам поведения дисперсных систем жидкость-твердое, например, [50 - 55] .

4.1. Роль концентрации суспензии при фильтровании

Традиционно используемые методы расчета фильтров не в полной мере отражают влияние содержания твердой фазы суспензии на производительность фильтровального оборудования, хотя часто именно этот фактор является определяющим при выборе способа фильтрования. Знание закономерности фильтрования суспензий при различной концентрации в них твердой фазы необходимо для обеспечения правильного выбора способа фильтрования, конструкции фильтра, способа предварительной обработки фильтруемой суспензии, оптимальных условий ведения процесса и т. д.

Математическая модель фильтрования с образованием осадка, сопротивление которого зависит от концентрации суспензии, необходима для разработки эффективной системы управления фильтрами в условиях нестабильной, переменной концентрации фильтруемой суспензии. Модель полезна в расчетах фильтров-сгустителей, а также при выборе концентрации вспомогательных веществ, обеспечивающих требуемую проницаемость наивысшего слоя и осадка [56] .

Известны различные соотношения, связывающие во внимание зависимость производительности фильтра от концентрации суспензии [93, 57, 22], например, для дискового вакуум-фильтра в обзоре [57] предлагается формула, согласно которой $w \sim \sqrt{bs/(1-as)}$, где a и b — коэффициенты: a — концентрация твердой фазы суспензии (масс. дожд), поступающей на фильтр. На основе этой формулы для угольных флотс-концентратов установлено, что оптимальная скорость вращения дисков фильтра пропорциональна концентрации суспензии.

При изменении удельного сопротивления осадка по степенной зависимости предложено уравнение [55]:

$$w = \Delta p / (\mu (As^{-k} x_m V + R_m)),$$

где w — скорость фильтрования; μ — вязкость; A — коэффициент пропорциональности; Δp — перепад давления на фильтре; x_m — отношение массы осадка на фильтре к объему фильтрата; V — объем фильтрата; k — показатель степени; R_m — сопротивление фильтровальной перегородки.

Horvath L. [57] для определения наибольшей производительности фильтра периодического действия использовал соотношение

$$t_{\max} = t_b + k \sqrt{1/c_s - 1/\rho_s (1-\epsilon)},$$

где t_{\max} — оптимальная продолжительность процесса фильтрования; c_s — объемная концентрация суспензии; t_b — длительность вспомогательных операций; ϵ — пористость; ρ_s — плотность твердой фазы суспензии; $k = 2 \sqrt{\mu R_m^2 t_b / 2 \Delta p \alpha}$, α — удельное массовое сопротивление осадка.

Можно показать, что если c_s выразить через плотность суспензии $\rho_c = 1/(s/\rho_s + (1-s)/\rho)$ и массовую концентрацию твердой фазы $c_s = \rho_c s$, разность под знаком радикала примет вид

$$1/c_s - 1/\rho_s (1-\epsilon) = 1/x_m (s) = (1 - ms)/s \rho_s,$$

где m — отношение массы влажного осадка к массе сухого осадка

$$m = 1 + \epsilon \rho / (1 - \epsilon) \rho_s,$$

ρ — плотность жидкости. Таким образом получим

$$t_{max} = t_v + k/[x_m(s)]^{0,5},$$

при этом видно, что данная формула не учитывает зависимость удельного сопротивления осадка от концентрации.

Объективные результаты расчета процесса фильтрования можно получить только при учете зависимости как удельного сопротивления осадка (объемного α_v или массового α) от концентрации, так и отношения объема или массы отложившегося на фильтре осадка к объему фильтрата $x_0 = x_0(s)$ или $x_m = x_m(s)$ соответственно. С учетом сказанного уравнение фильтрования с образованием несжимаемого осадка следует записать в виде

$$W = dV/Fdt = \Delta p / \mu [\alpha(s) \cdot x(s)q + R_m], \quad (4.1)$$

где F — площадь фильтрования, t — время фильтрования, q — удельный объем фильтрата, полученного с единицы фильтрующей поверхности.

Здесь под $\alpha(s)$ и $x(s)$ подразумеваются зависимости $\alpha_v(s)$ или $\alpha(s)$ и $x_0(s)$ или $x_m(s)$ соответственно.

Интегральная форма уравнения (1) имеет вид

$$t = a_1 \alpha(s) \cdot x(s)q^2 + bq, \quad (4.2)$$

где $a_1 = \mu/2\Delta p$ при $\Delta p = \text{const}$ и $a_1 = \mu/\Delta p$ при $W = \text{const}$, $b = \mu R_m / \Delta p$.

Зависимость $x(s)$ может быть представлена формулами

$$x_0(s) = Ds/(1 - ms), \quad (4.3)$$

$$x_m(s) = \rho s/(1 - ms), \quad (4.4)$$

где $D = \rho[1/\rho_s + (m-1)/\rho]$; $x_0(s) = x_m(s)/\rho_s(1-\epsilon)$; $m = 1+\epsilon\rho/(1-\epsilon)\rho_s$.

Следует иметь в виду, что формулы (4.3) и (4.4) справедливы при $s < s_{max} = 1/m$, так как при $s \rightarrow s_{max}$ $x(s) \rightarrow \infty$ ($q \rightarrow 0$), т.е. величина s_{max} характеризует предельный случай, когда на фильтр подается суспензия состава осадка.

Другой фактор, требующий внимания, — это возможность перехода от фильтрования с образованием осадка к фильтрованию с закупориванием пор фильтровальной перегородки при $s \rightarrow 0$.

Рядом исследователей [58,59] предлагаются соотношения для комплекса $\alpha(s)x(s)$, включающие удельную поверхность частиц твердой фазы и пористость осадка. Этот подход встречает ряд трудностей, связанных со сложностью определения соответствующих условий фильтрования величины удельной поверхности и пористости, а также из-за того, что оба параметра не могут быть определены традиционным методом обработки результатов фильтрования в характеристических координатах, например, $t/q - q$ для фильтрования с образованием осадка, с помощью которого рассчитываются удельное сопротивление осадка, либо комплекс $\alpha_V x_0$ или $\alpha \cdot x_0$.

Для производственных условий и инженерных расчетов желательно упростить процедуру определения зависимостей $\alpha(s)$ и $x(s)$, что достигается путем определения этих функций непосредственно из эксперимента с обработкой результатов опытов в координатах $t/q - q$.

Для иллюстрации потребности учета зависимостей как α_V , α так и x_0 , x_m от концентрации фильтруемой суспензии проведем расчет по формуле (4.2), а результаты сопоставим с экспериментальными данными для дрожжевой суспензии со следующими параметрами: $\alpha_V(s) = 9 \cdot 10^{13} \cdot (1/s)$, m^{-2} ; $\Delta p = 0,1$ МПа; $R_m = 1 \cdot 10^{11}$ 1/м; $m = 1,623$; $D = 1,56$; $\mu = 1$ МПа·с; $x_0(s) = 1,56 \cdot s / (1 - 1,623 \cdot s)$ в интервале концентрации суспензии от 0,08 до 0,33 кг/кг. Расчеты выполнены для $\alpha_V(s)$ и $x_0(s)$, а также варианты условий $\alpha = \alpha_V(s)$, $x_0 = \text{const}$ и $\alpha_V = \text{const}$, $x_0 = x_0(s)$. Величина $\alpha_V = \text{const}$ принята как средняя от ее величин при двух концентрациях суспензий $\alpha_V = \alpha_{0V} = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$, где α_1 и α_2 - соответственно удельное сопротивление осадка при $s = 0,08$ и $0,33$. Аналогичным образом определена величина x_{0V} , $x_{0V} = (x_1 + x_2)/2$ для $x_0 = \text{const}$ [60].

Результаты вычислений и экспериментальные данные приведены на рис.4.1 и подтверждают справедливость уравнения (4.2). Пренебрежение изменением с концентрацией одного из параметров (α_V или x_0) вызывает погрешность в определении объема фильтрата, полученного за время фильтрования в 1,5 и более раз.

Использование эмпирических формул, полученных обработкой экспериментальных данных в координатах $t/q - q$ для $\alpha_V(s)$ и $x_0(s)$, позволяет избегать необходимости определения удельной поверх-

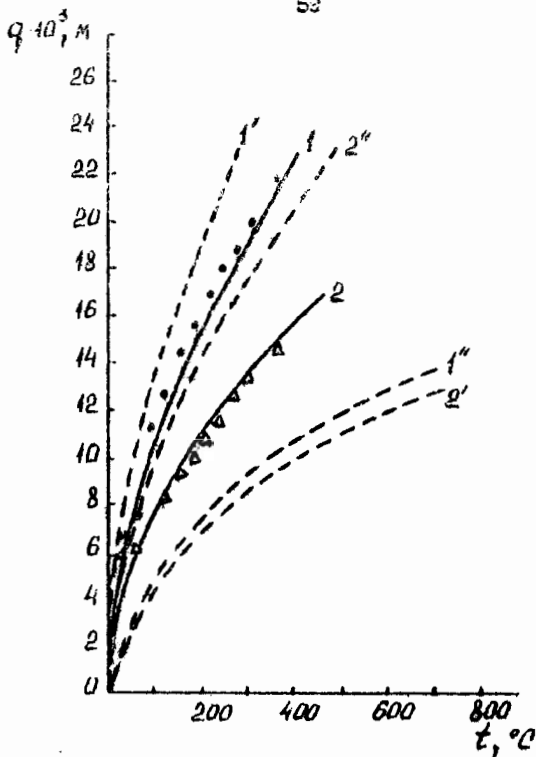


Рис. 4.1. Фильтрационные характеристики дробневой суспензии с содержанием твердой фазы $s = 0,06$ (кривые 1, 1' и 1'') и $s = 0,33$ (кривые 2, 2' и 2''): 1, 2 - расчет по уравнению (4.2); 1', 2' - расчет при $\alpha_V(s) = \alpha_{qV} = \text{const}$, $\alpha_{qV} = 7 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$; 1'', 2'' - расчет при условии $x_V(s) = x_{qV} = \text{const}$, $x_{qV} = 0,63$. Точки - экспериментальные данные.

ности частиц и пористости осадка, что упрощает процедуру расчета процесса фильтрования для переменной концентрации суспензии.

Экспериментальные данные, которые будут обсуждаться в следующем разделе, показывают, что удельное сопротивление осадка с ростом концентрации фильтруемой суспензии может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от ряда факторов, в том числе гидродинамических. Такого рода зависимости в большинстве случаев носят степенной характер и могут быть обобщены формулой

$$\alpha = \alpha_0 + b_0 s^k, \quad (4.5)$$

где α_0 и b_0 — коэффициенты; k — показатель степени, который может принимать в зависимости от свойств суспензии и условия формирования осадка как положительные, так и отрицательные значения, причем характер процесса фильтрования при различной концентрации суспензии существенно зависит от величины показателя степени.

Оценим роль показателя степени k в комплексе $\alpha(s)x(s)=r(s)$, приняв $\alpha_0 = 0$, откуда $r(s) = \alpha_V x_0 = Db_0 s^k / (1 - ms)$. Считая $R_m = 0$, получим выражение для скорости фильтрования при прочих равных условиях, кроме концентрации, $w \sim 1 / \alpha_V(s)x_0(s) = 1/r(s)$.

Таким образом можно оценить роль показателя степени k при двух фиксированных концентрациях суспензии s_1 и s_2 :

$$w_1/w_2 = \frac{(1-ms_1)}{(1-ms_2)} \cdot \left[\frac{s_2}{s_1} \right]^{k+1}$$

где w_1 и w_2 — соответственно скорость фильтрования при s_1 и s_2 .

Приняв $s_1 = 0,10$ и $s_2 = 0,15$, то есть $s_2/s_1 = 1,5$ получаем:

$k = 1$	$w_1/w_2 \sim 2,3$
$k = 0$	$w_1/w_2 \sim 1,5$
$k = -1$	$w_1/w_2 \sim 1,1$
$k = -1,5$	$w_1/w_2 \sim 0,8$

Таким образом, характер изменения удельного сопротивления осадка с изменением концентрации фильтруемой суспензии является определяющим в процессе фильтрования, что необходимо принимать во внимание при проектировании и выборе фильтровального оборудо-

дования в тех случаях, когда исходная суспензия имеет переэкзную концентрацию, в противном случае возможны большие ошибки в вычислении производительности фильтров. Более подробный анализ влияния показателя степени k на фильтрационные характеристики дан в последующих разделах.

4.2. Экспериментальные данные

В зависимости от физико-химических свойств дисперсной системы гидравлическое сопротивление осадка может изменяться от концентрации суспензии различным образом.

По мнению ряда исследователей, одним из определяющих факторов, влияющих на процесс фильтрации при изменении концентрации, является изменение устойчивости дисперсной системы, причем способность к коагуляции, как правило, возрастает с увеличением содержания твердой фазы в суспензии [28, 61, 62].

В большинстве случаев удельное сопротивление осадка уменьшается с увеличением концентрации суспензии, что связывают с повышением пористости осадка [57, 63]. Снижение сопротивления осадка с ростом концентрации используется для интенсификации процесса фильтрации путем предварительного сгущения суспензии, подаваемой на фильтр. Например, при подаче суспензии высокоглиноземистого кромолита на фильтр центробежным насосом α осадка, полученного без предварительного сгущения суспензии, равно $372,5 \cdot 10^{13} \text{ л} \cdot \text{м}^2$, а при фильтрации сгущенной суспензии - $142 \cdot 10^{13} \text{ л} \cdot \text{м}^2$; при подаче суспензии на фильтр самотеком - соответственно $156,9 \cdot 10^{13}$ и $42,1 \cdot 10^{13} \text{ л} \cdot \text{м}^2$ [64].

Кроме увеличения пористости осадка с ростом концентрации суспензии возможно и обратное явление - уменьшения пористости [62]. Экспоненциальное уменьшение пористости и влажности осадка в диапазоне концентрация от 7,5 до 50% наблюдалось для суспензий кромолита, глины, флотационных хвостов, известняка, а также суспензии цементного шлама.

В большинстве случаев для описания изменения удельного сопротивления осадка с ростом концентрации используются зависимости типа [28, 61, 63, 65]:

$$\alpha = \alpha' \cdot s^k, \quad (4.6)$$

$$\alpha_V = \alpha'_V \cdot s^k, \quad (4.7)$$

$$\alpha_V = k_1 - k_2 \phi + k_3 \Delta p, \quad (4.8)$$

где α' , α'_V , k_1 , k_2 , k_3 — эмпирические коэффициенты; ϕ — объемная концентрация.

Показатель степени k в (4.6) и (4.7) может быть как положительным, так и отрицательным числом в довольно широком диапазоне значений. По данным [51] значение k изменяется от $-0,06$ до $-2,15$. Для карбоната кальция при температуре 57°C сопротивление осадка пропорционально $s^{0,746}$ [56]. При фильтровании суспензии гидроокиси магния, полученной в реакторе с рециркуляцией затравки, величина α осадка в интервале концентраций от 10 до 20% изменялась независимо, то есть $k \sim 0$ [57]. Для гидроокиси железа увеличение концентрации с 1 до 10 г/л вызывает уменьшение удельного сопротивления осадка более чем в 4 раза [58]; у суспензии перлита с ростом концентрации от 0,07 до 5% аналогичная величина уменьшалась более чем в 3 раза [53]. Фильтрование активного ила в диапазоне концентраций от 5 до 50 кг·м⁻³ дало линейную зависимость $\alpha \cdot \chi_m$ от ϕ [59].

Фильтрование на барабанном вакуум-филт্রে суспензий CaCO_3 и MgCO_3 при $s > 0,2$ дало соответственно следующие зависимости между производительностью филтра по осадку q_{oc} и массовой концентрацией: CaCO_3 $q_{oc} \sim s^{2,36}$; MgCO_3 $q_{oc} \sim s^{3,64}$ [59].

В ходе фильтрования культуральных жидкостей продуцентов антибиотиков установлено, что отношение весового удельного сопротивления осадка разбавленной суспензии к соответствующей величине у исходной суспензии пропорционально α^{-k} [70]. Здесь α — отношение объема жидкости в суспензии после разбавления к объему жидкости в исходной суспензии. Показатель степени k изменяется в пределах от 0,45 до 1,35.

Наряду со степенной зависимостью удельного сопротивления осадка от концентрации фильтруемой суспензии встречается и другой характер изменения удельного сопротивления, когда с ростом

концентрации функция $\alpha(s)$ проходит через максимум [71-72] или минимум [61, 62].

Согласно [71], причиной роста сопротивления осадка при низкой концентрации суспензии является высокая скорость потока, приводящая к образованию более плотного осадка и внедрению частиц в фильтровальную перегородку. Влияние скорости потока на формирование осадка отмечается также в [28, 61, 68, 73]. При значительном содержании твердой фазы возможно образование сводиков из нескольких частиц над порами фильтровальной перегородки, что снижает гидравлическое сопротивление в процессе фильтрования [73].

Другой причиной снижения сопротивления осадка при больших концентрациях твердой фазы является коагуляция частиц. Действие указанного фактора подтверждается резким уменьшением сопротивления осадков из полидисперсных частиц при достижении определенной концентрации s_k [61, 62, 65], которая зависит от природы вещества твердой фазы, например, для цементного шлама $s_k \sim 40\%$, суспензии тетрафталевоы кислоты в уксусной кислоте $s_k \sim 25\%$, для некоторых других суспензий $s_k \sim 10\%$. По мере приближения формы частиц к сферической их влияние на удельное сопротивление осадка уменьшается [61].

Влияние концентрации на сопротивление осадка при фильтровании наглядно иллюстрируют данные, заимствованные из [63], рис. 4.2.

Приведенные примеры не исчерпывают всех возможных факторов, влияющих на удельное сопротивление осадка при изменении концентрации, например, такого, как взаимное направление движения фильтруемой среды через перегородку и силы тяжести (рис. 4.3) и др.

Основываясь на экспериментальных данных можно заключить, что для различных суспензий и условий фильтрования зависимость сопротивления осадка от концентрации суспензии может быть монотонной возрастающей или убывающей функцией, проходить через максимум или минимум, быть кусочно-непрерывной.

Рассмотренные выше формулы для описания зависимостей $\alpha(s)$ носят частный характер и могут быть сведены к степенной зависимости, пригодной только для осадков с монотонно убывающим или

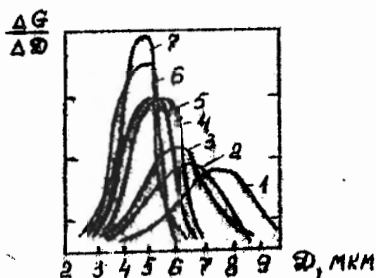


Рис. 4.2. Зависимость функции распределения количества фильтрующейся жидкости по размерам проводящих пор при различной концентрации перлита в суспензии [63]: 1 - $s = 5$ вес%; 2 - 2,5; 3 - 1; 4 - 0,7; 5 - 0,5; 6 - 0,2; 7 - 0,07.

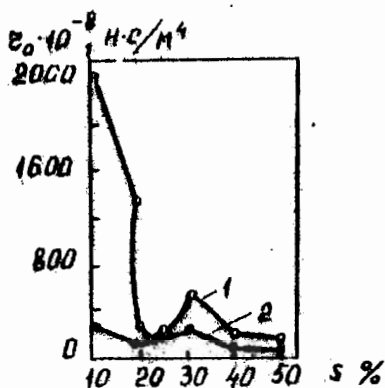


Рис. 4.3. Удельное сопротивление осадка для ФЭЦО им. Артема в зависимости от концентрации суспензии [72]: 1 - направление силы тяжести и движение фильтрата противоположны; 2 - направление силы тяжести и движение фильтрата совпадают.

возрастающим с концентрацией сопротивлением и непригодны для описания зависимостей с экстремумом [74].

4.3. Описание зависимости удельного сопротивления осадка от концентрации фильтруемой суспензии

Из-за сложности физической картины процесса фильтрации, общая зависимость сопротивления осадка от концентрации суспензии $\alpha(s)$ найдена подбором формулы, охватывающей наибольшее количество возможных вариантов зависимости $\alpha(s)$ [74 - 77]:

$$\alpha = \alpha_0 + b_0 s^k \exp(d_0 s), \quad (4.9)$$

где α_0 , b_0 , k и d_0 - коэффициенты, определяющие форму кривой $\alpha(s)$.

Сопротивление осадка может быть выражено как через объемное α_v , так и массовое α сопротивление. В зависимости от величин входящих в (4.9) коэффициентов формула позволяет описать разнообразие экспериментальные зависимости $\alpha(s)$, встречающиеся на практике, в том числе уже предложенные ранее ($d_0 = 0$ [56]) и ($d_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$ [28]).

Так как зависимость $\alpha(s)$ находится в практике фильтрации экспериментальным путем, то основным в применении формулы (4.9) является определение входящих в нее коэффициентов, что можно сделать, например, методом выравнивания или методом наименьших квадратов.

Наиболее простым является метод выравнивания, позволяющий путем замены переменных получить линейное уравнение. С этой целью перепишем формулу (4.9) следующим образом

$$\alpha - \alpha_0 = b_0 s^k \exp(d_0 s).$$

Для функций, имеющих экстремум, рекомендуется принять $\alpha_0 = 0$.

Заменяя переменные и выбирая значения концентрации суспензии таким образом, чтобы они образовывали арифметическую прогрессию с разностью h , приходим к следующему линейному уравнению

$$Y = 0.4343hd_0 + kX, \quad (4.10)$$

$$l = 1, 2, 3, \dots, n.$$

где $X = \Delta \lg s = \lg s_i - \lg s_{i+1}$; $Y = \Delta \lg(\alpha - \alpha_0) = \lg(\alpha_i - \alpha_0) - \lg(\alpha_{i+1} - \alpha_0)$;

Коэффициент α_0 ищем в виде

$$\alpha_0 = (\alpha_1 \alpha_2 - \alpha_3^2) / (\alpha_1 + \alpha_2 - 2\alpha_3) \quad (4.11)$$

Для этого выбираем две крайние точки (s_1, α_1) и (s_2, α_2) и третью точку на оси абсцисс $s_3 = \sqrt{s_1 s_2}$, имеющую ординату α_3 .

Из уравнения (4.10) находят коэффициенты d_0 и k , а затем из уравнения

$$\sum \lg(\alpha_i - \alpha_0) = n \lg b_0 + k \sum \lg s_i + 0.4343 d_0 \sum s_i$$

определяют величину b_0 . Здесь n - число заданных значений s .

Более достоверные значения коэффициентов, входящих в (4.9), могут быть найдены с помощью метода наименьших квадратов.

Если представить функцию (4.9) в общем виде как $\alpha = f(s, \alpha_0, b_0, k, d_0)$ и потребовать выполнения условия

$$\sum [\alpha_i - f(s_i, \alpha_0, b_0, k, d_0)]^2 = \min,$$

где α_i - сопротивление осадка в i -ой точке, характеризуемой концентрацией твердой фазы в суспензии s_i , то получим систему уравнений, решение которой даст искомые величины α_0, b_0, k, d_0

$$\sum [d_i - f(s_i, \alpha_0, b_0, k, d_0)] \left[\frac{\partial f}{\partial d} \right]_i = 0$$

Здесь $\partial f / \partial \alpha_0$, соответственно $\partial f / \partial b_0$, $\partial f / \partial k$ и $\partial f / \partial d_0$.

Решение полученной системы уравнений для функции вида (4.9) представляет сложную задачу, поэтому удобнее искать приближение для линейного уравнения (4.10), обозначив через α произведение $0.4343 d_0$ и определяя коэффициент α_0 по формуле (4.11). В этом случае получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} \sum X_i Y_i - k \sum X_i^2 - \alpha \sum X_i &= 0, \\ \sum Y_i - k \sum X_i - \alpha n &= 0, \end{aligned}$$

решение которых дает

$$k = (Z_4 - Z_1 Z_2) / (Z_3 - Z_1^2),$$

$$d_0 = a/0.4343h = (Z_2 - kZ_1)/0.4343h.$$

$$\text{Здесь } Z_1 = \frac{1}{n} \sum X_i = \frac{1}{n} \sum \Delta l g s_i; \quad Z_2 = \frac{1}{n} \sum Y_i = \frac{1}{n} \sum \Delta l g (\alpha_i - \alpha_0);$$

$$Z_3 = \frac{1}{n} \sum X_i^2 = \frac{1}{n} \sum (\Delta l g s_i)^2; \quad Z_4 = \frac{1}{n} \sum X_i Y_i = \frac{1}{n} \sum (\Delta l g s_i) \cdot [\Delta l g (\alpha_i - \alpha_0)].$$

Аналогичные операции можно провести над упрощенными уравнениями, являющимися частными случаями (4.9)

$$\alpha(s) = \alpha_0 + b_0 s^k \quad (4.12)$$

$$\alpha(s) = b_0 s^k, \quad (4.13)$$

которые дают удовлетворительное приближение экспериментальным зависимостям при монотонном изменении сопротивления осадка от концентрации.

Для иллюстрации возможностей обобщенной формулы (4.9) ниже приведены результаты обсека метода выравнивания экспериментальных данных, полученных исследователями при фильтровании суспензий, образующих различные по свойствам осадки.

Зависимости гидравлического сопротивления осадка α суспензии CaSO_4 при различных концентрациях и различных перепадах давления Δp на фильтре приведены на рис. 4.4. Точками отмечены экспериментальные данные, сплошными линиями — локальные кривые, приведенные в [71] для интерполяции значений α между экспериментальными точками, пунктир — результаты, полученные методом выравнивания по формуле (4.9) при $\alpha_0 = 0$. Значения найденных коэффициентов при различных перепадах давления:

Δp (кПа)	$b_0 \cdot 10^{-13}$ (м/кг)	k	d_0
138	45	1,625	-25
103,2	11,98	1,3	-21,59
68,9	1,8	0,83	-14,97
34,5	1,4	0,94	-17,3

Аналогичные обозначения кривых сделаны на рис. 4.5, где данные [72] обсеканы с помощью формулы (4.9) со следующими коэффициентами:

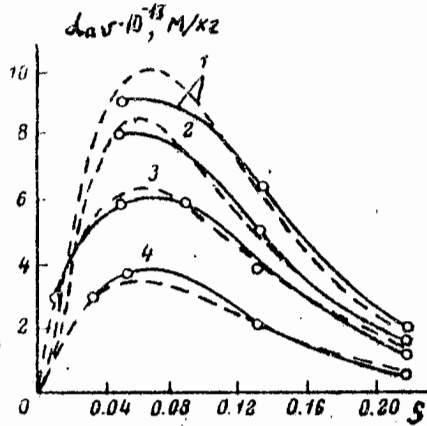


Рис. 4.4. Зависимость удельного гидравлического сопротивления осадка $\alpha(s)$ (м/кг) от концентрации суспензии s (объяснение в тексте).

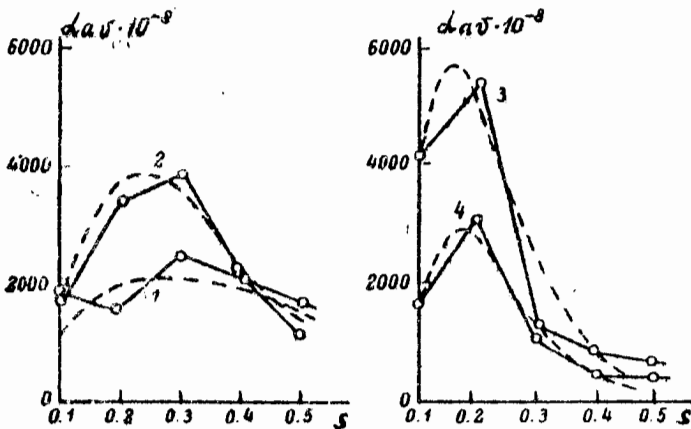


Рис. 4.5. Зависимость удельного сопротивления осадка α ($\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^4$) от концентрации суспензии [72]: 1 - известняк; 2 - сырьевая цементная шлам; 3 - цинковый концентрат; 4 - глина. Фильтрация подсосом.

	b_0 (Н·с/м ⁴)	k	d_0
Известняк	$77,8 \cdot 10^{11}$	1,6	-5,53
Сырьевой цементный шлам	$309,9 \cdot 10^{12}$	2,78	-11,51
Цинковый концентрат	$24,58 \cdot 10^{14}$	2,96	-18,42
Глина	$79,67 \cdot 10^{10}$	2,8	-17,27

Зависимость $\alpha(s)$, для аппроксимации которой требуется применение формулы (4.9) со сдвигом относительно оси ординат (встречается в [62]), приведена на рис. 4.6, где сплошные линии - данные [14], пунктир - рассчитанные по формуле (4.9). Получены следующие значения коэффициентов:

	$a_0 \cdot 10^{-9}$ (Н·мин/м ⁴)	$b_0 \cdot 10^{-9}$ (Н·мин/м ⁴)	k	d_0
Известняк	680	159	1,25	5,3
Цементный шлам	0	1,2	-2,17	7,48
Флотационные хвосты	0	27,1	-0,54	2,68
Глина	129	-41,2	0,8	2,3

Для кривой 5 (рис. 4.6) удовлетворительное приближение не найдено ввиду того, что левая и правая ветви этого графика описываются различными уравнениями.

Для монотонно убывающих или возрастающих функций хорошие результаты дает приближение по более простой формуле (4.12) ($d_0=0$ [56]), а также (4.13). Кроме того, уравнение типа (4.12) удобно в случаях, когда при определенной концентрации имеет место переход от одной функциональной зависимости к другой, например, кривая 5, рис. 4.6:

s	$a_0 \cdot 10^{-9}$ (Н·мин/м ⁴)	$b_0 \cdot 10^{-9}$ (Н·мин/м ⁴)	k
< 0,4	-130	235	-0,098
> 0,4	114,6	949,5	4,65

Следует обратить внимание на различный характер зависимостей $\alpha(s)$ для одних и тех же типов суспензии (рис. 4.5 и 4.6). Различие в фильтруемости однотипных суспензий, полученное авторами [62, 72], вызвано различием способов фильтрования. В том случае, когда при фильтровании направление движения фильтрата совпадает с

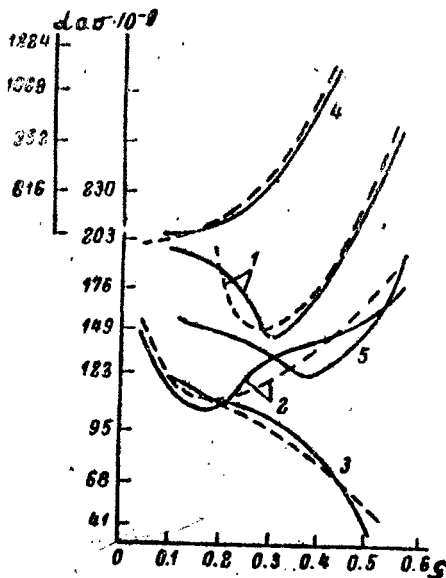


Рис. 4.6. Зависимость удельного сопротивления осадка α_v ($\text{Н} \cdot \text{мин} / \text{м}^4$) от концентрации суспензии [62]: 1-4 - при перепаде давления $6,94 \cdot 10^4$ Па, 5 - при $2,11 \cdot 10^4$ Па. 1 - цементный шлам, 2 - флюидостойкие хвосты, 3 - глина, 4 - известняк, 5 - цементный шлам (остальные обозначения в тексте).

направлением силы тяжести, функции имеют максимум (рис. 4.5). При противоположном направлении силы тяжести и движения фильтра функции имеют минимум и тенденцию к росту $\alpha(s)$ с увеличением s . Тем не менее, во всех случаях формула (4.9) применима в качестве аппроксимирующей функции, которая в последующем может быть использована для оптимизации и управления процессом фильтрования.

4.4. Общее сопротивление осадка как функция концентрации

Достоинством экспоненциально-степенной формулы, рассмотренной выше, является возможность описания функциональной зависимости $\alpha(s)$ как в случае неограниченного возрастания сопротивления осадка с уменьшением концентрации суспензии, так и при снижении $\alpha(s)$.

Первый случай характерен для процесса фильтрования суспензий, в которых преобладают частицы с размером меньше размера пор фильтровальной перегородки. Концентрация твердой фазы недостаточна для образования сводиков над порами и частицы, проникая внутрь фильтровальной перегородки, постепенно забивают поры, вызывая увеличение сопротивления осадка.

Второй случай характерен для суспензий с частицами ассиметричной формы, размер которых больше размера пор фильтровальной перегородки. Такие частицы задерживаются на поверхности фильтра, образуя слой осадка с низким гидравлическим сопротивлением.

Общее сопротивление осадка определяется величиной $R_{oc} = \alpha \cdot q$, где q — удельный объем полученного фильтра.

Проанализируем влияние концентрации суспензии и вида функции $\alpha(s)$ на R_{oc} и $\alpha(s) \cdot x(s)$.

В первом приближении считаем, что $x(s)$ выражается формулами (4.3) или (4.4), принимая m и D постоянными. На практике величины m и D связаны с концентрацией твердой фазы в суспензии через пористость осадка. Однако сделанные допущения можно считать справедливыми, если полагать, что в диапазоне рабочих концентраций изменение пористости невелико. Таким образом R_{oc} пропорционально при прочих равных условиях

$$\alpha_v(s) x_0(s) = D \cdot s [a_0 + b_0 s^k \cdot \exp(d_0 s)] / (1 - ms) \quad (4.14)$$

формула справедлива при $s < s_{\max} = 1/m$. Если $s \rightarrow s_{\max}$, то $x_0 = V_{\text{ос}}/V \rightarrow \infty$, то есть объем полученного фильтрата $V \rightarrow 0$. Иными словами, величина s_{\max} характеризует предельный случай, когда на фильтр подается суспензия состава образующегося осадка.

Преобразуем формулу (4.14), приняв $\alpha_0 = 0$:

$$R_x = \alpha_V(s)x_0(s)/Db_0 = s^k \exp(d_0 s)/(s^{-1} - m). \quad (4.15)$$

Рассмотрим как изменяется величина R_x при различных значениях коэффициентов k и d_0 , приняв $m = 1,6$.

При $d_0 > 0$ и $k \geq -1$ функция R_x монотонно возрастает с увеличением s , для $k < -1$ проходит через минимум. При $d_0 < 0$ R_x сильно зависит от значения коэффициента d_0 , уменьшение которого вызывает "деформацию" графика функции, который приобретает Π -образную форму (рис. 4.7). Таким образом коэффициент d_0 является определяющим в "формообразовании" графика функции R_x , пропорциональной $\alpha_V(s)x_0(s)$.

В общем случае функция (4.15) имеет два экстремума, определяемых условием

$$s_{1,2} = \frac{d_0 - mk}{2md_0} \pm \sqrt{\left[\frac{d_0 - mk}{2md_0} \right]^2 + \frac{k+1}{md_0}} \quad (4.16)$$

$$0 < s < 1/m.$$

Наименьшему сопротивлению слоя осадка при $d_0 < 0$ соответствует знак плюс в формуле (4.16), при $d_0 > 0$ - знак минус.

Для частного случая $d_0 = 0$, $\alpha_0 = 0$

$$R_x = \alpha_V(s)x_0(s)/Db_0 = s^k/(s^{-1} - m). \quad (4.17)$$

В этом случае функция имеет минимум при $s = (k+1)/mk$, если $k \leq -1$, а при $k > -1$ - неограниченно возрастает в области $s \rightarrow s_{\max}$ (рис. 4.8).

Таким образом применение общей формулы (4.9) при анализе зависимости удельного сопротивления осадка от концентрации суспензии позволяет определить условия, при которых путем целенаправленного воздействия на суспензию может быть достигнут минимум комплекс $\alpha(s)x(s)$, пропорционального общему сопротивлению осадка, а следовательно максимум производительности.

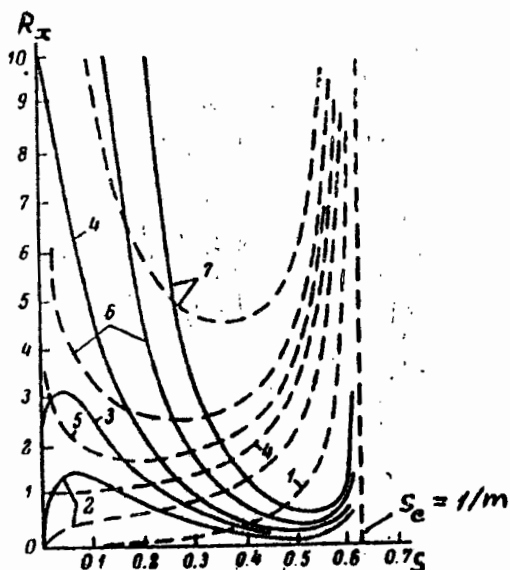


Рис. 4.7. Зависимость R_x от s (мас доля) при $d_0 < 0$. Сплошные линии - $d_0 = -10$, пунктирные - $d_0 = -1$. Значения k : 1 - 1; 2 - (-0.5); 3 - (-0.75); 4 - (-1.0); 5 - (-1.25); 6 - (-1.5); 7 - (-2).

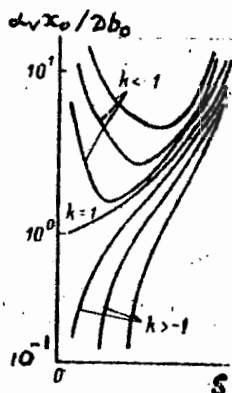


Рис. 4.8. Зависимость $\alpha_v x_0 / D_0^2$ (уравнение 4.17) от s при различных k .

Введение в математическую модель процесса фильтрования с образованием осадка соотношения (4.9) позволяет обосновать оптимальные условия процесса при колебании концентрации фильтруемой суспензии, выбрать способ фильтрования и конструкцию фильтра, а также способ предварительной обработки фильтруемой суспензии и тип фильтровальной перегородки, которая также оказывает влияние на характер зависимости (4.9).

Использование общей формулы открывает широкие возможности для прогнозирования процессов фильтрования, промывки и сушки осадка.

ГЛАВА 5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ
ПО КОНЦЕНТРАЦИИ

Проанализируем соотношения, связывающие производительность фильтра периодического действия при регенерации фильтровальной перегородки с параметрами процесса фильтрования в случае, когда сопротивление осадка зависит от концентрации твердой фазы в суспензии.

В большинстве процессов фильтрования приходится иметь дело с суспензиями, концентрация твердой фазы в которых является переменной величиной. Для оперативного управления такими процессами необходима математическая модель, позволяющая определить и поддерживать оптимальные с точки зрения производительности фильтра условия процесса.

Рассмотрим в качестве общего случая фильтр периодического действия, в котором происходит многократная регенерация фильтровальной перегородки в промежутках между периодами фильтрования и последующая остановка фильтра для выгрузки осадка, замены или более полной регенерации фильтровальной перегородки после n циклов промежуточной регенерации.

Полный цикл работы такого фильтра можно представить в виде суммы

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{\text{рп}} + t_{\text{в}} = \sum_{i=1}^n t_{\text{п}} + t_{\text{в}},$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где $\sum_{i=1}^n t_{\text{п}} = \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{i=1}^n t_{\text{рп}}$; t_i - продолжительность фильтрования в i -ом периоде; $t_{\text{рп}}$ - длительность промежуточной регенерации фильтра (обратной промывкой) в i -ом периоде; $t_{\text{в}}$ - длительность вспомогательных операций, осуществляемых после n периодов работы фильтра; $t_{\text{п}}$ - длительность i -ого периода работы фильтра; n - число периодов работы фильтра.

Если во всех периодах продолжительность фильтрования и промежуточной регенерации одинакова, то

$$t_{\Sigma} = (t + t_{\text{рп}}) \cdot n + t_{\text{в}} = nt_{\text{п}} + t_{\text{в}}.$$

Так как промежуточные регенерации носят вспомогательный характер, то цикл работы фильтра удобно представить в виде

$$t_{\text{ц}} = \Sigma t_i + t'_B.$$

где $t'_B = \Sigma t_{\text{рпi}} + t_B$.

Пусть промежуточная регенерация фильтровальной перегородки осуществляется обратным током фильтрата или отдувкой, когда часть жидкости из внутренней полости фильтроэлемента и коммункация вытесняется в направлении, обратном фильтрованию, и смешивается с исходной суспензией, тогда производительность фильтра за цикл будет равна

$$W_{\text{ц}} = q_{\text{ц}} / t_{\text{ц}} = (\Sigma q_i - \Sigma q_{\text{рi}}) / (\Sigma t_i + t'_B). \quad (5.1)$$

где q_i - удельный объем фильтрата, полученный в i -ом периоде фильтрования; $W_{\text{ц}}$ - условная скорость фильтрования (производительность $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$) за цикл; $q_{\text{ц}}$ - удельный объем фильтрата за цикл; $q_{\text{рi}}$ - удельный объем фильтрата, поступающего в суспензию при регенерации в i -ом периоде работы фильтра.

Длительность промежуточной регенерации в i -ом периоде представим суммой

$$t_{\text{рпi}} = t_{\text{рi}} + t_{\text{пкi}}. \quad (5.2)$$

где $t_{\text{рi}}$ - время собственно регенерации, в течение которого осуществляется обратный ток фильтрата; $t_{\text{пкi}}$ - время переключения фильтра с фильтрования на регенерацию и обратно.

Удельный объем фильтрата, расходуемого при промывке,

$$q_{\text{рi}} = \Delta p_{\text{р}} \cdot t_{\text{рi}} \cdot \mu R_m. \quad (5.3)$$

где $\Delta p_{\text{р}}$ - перепад давления при регенерации.

Если во всех периодах величины q_i , $q_{\text{рi}}$, $t_{\text{рi}}$ и $t_{\text{пкi}}$ постоянны, уравнение (5.1) принимает более простой вид

$$W_{\text{ц}} = n(q - q_{\text{pl}}) \cdot [n(t + t_{\text{рп}}) + t_{\text{в}}] = (q - q_{\text{pl}}) \cdot (t + t_{\text{рп}} + t_{\text{в}} \cdot n). \quad (5.4)$$

Если $q_{\text{р}} \ll q$, то

$$W_{\text{ц}} \approx q \cdot (t + t_{\text{рп}} + t_{\text{в}} \cdot n). \quad (5.5)$$

то есть при прочих равных условиях с увеличением частоты промежуточной регенерации производительность фильтра растет. Для $t_{\text{рп}} = 0$ и $n=1$ приходим к обычной формуле для периодического фильтрования без промежуточной регенерации.

Сделаем следующие допущения: 1) фильтрование протекает с образованием осадка; 2) концентрация суспензии, подаваемой на фильтр, в течение одного цикла постоянная; 3) осадок, сбрасываемый с поверхности фильтрующего элемента при промежуточной регенерации, не диспергируется в объеме суспензии, а оседает на дно фильтра, либо выводится из зоны фильтрования любым известным способом; 4) сопротивление фильтровальной перегородки постоянно и равно средней величине за цикл; 5) пористость осадка равна средней его пористости в рассматриваемом диапазоне изменения концентрации.

Высоту фильтровального элемента или скорость оседания осадка на дно фильтра (скорость вывода осадка из зоны фильтрования) будем предполагать такой, что к моменту начала нового периода фильтрования весь осадок выводится из зоны фильтрования.

Допущения эффективны при относительно небольшом содержании твердой фазы в суспензии. При высоких концентрациях в суспензии происходит изменение характера процесса фильтрования, а сброс осадка обратным током фильтрата и вывод его из зоны фильтрования становятся практически невозможными ввиду явления реологического, физико-химического и механического характера, возникающих в высококонцентрированных суспензиях.

Определим концентрацию суспензии, обеспечивающую наибольшую производительность фильтра за цикл, и соответствующий этому объем фильтрата.

С учетом зависимости сопротивления осадка от концентрации твердой фазы суспензии

$$t = a_1 \cdot \alpha_V(s) x_0(s) q^2 + b q, \quad (5.6)$$

где $\alpha(s) \cdot x_0(s)$ представлено формулой $\alpha_V(s) = a_0 + b_0 s^k \cdot \exp(d_0 s)$.

Условие наибольшей производительности фильтра соответствует максимуму функции (5.1). Будем искать параметры s_M и q_M , соответствующие наибольшей производительности, для случая уравнения (5.4), который наиболее часто реализуется на практике.

Сделав в (5.4) соответствующие подстановки, определив частные производные $\partial W_{II} / \partial q$ и $\partial W_{II} / \partial s$ и приняв их равными нулю, получим систему уравнений:

$$a_0 + b_0 [(k+1)s_M^k + (d_0 - mk)s_M^{k+1} - d_0 s_M^{k+2}] \cdot \exp(d_0 s_M) = 0 \quad (5.7)$$

$$q_M = q_p + (q_p^2 + (b q_p + t_B'')(s_M^{-1} - m) / a_1 D \cdot [a_0 + b_0 s_M^k \exp(d_0 s_M)])^{0.5} \quad (5.8)$$

$$q_M > q_p; \quad 0 < s_M < 1/m.$$

Здесь $t_B'' = t_{pII} + t_B/n$; q_M - объем фильтра, полученный за один период работы фильтра, который обеспечивает наибольшую производительность за цикл при $s = s_M$.

Величину s_M в уравнении (5.7) удобнее всего искать численным методом. Ввиду сложного характера зависимости $\alpha_V(s) x_0(s)$ корни уравнения (5.7) могут соответствовать как минимуму, так и максимуму анализируемой функции. Поэтому, после нахождения корней уравнения, необходимо их проверка по изменению знака производной $\partial W_{II} / \partial s$ при прохождении через точку экстремума. Вторая производная $\partial^2 W_{II} / \partial s^2$ дает громоздкую формулу, поэтому, учитывая, что ряд сомножителей, входящих в первую производную, по физическому смыслу может принимать только положительные значения, знак производной может быть определен по формуле

$$r' = b_0 [d_0 s^k - (d_0 - mk)s^{k-1} - (k+1)s^{k-2}] \cdot \exp(d_0 s) - a_0 s^{-2}.$$

В частных случаях уравнение (5.7) приобретает более простую вид.

При $a_0 = 0$ решением уравнения является:

$$s_M = \frac{d_0 - mk}{2d_0 m} \pm \left\{ \left[\frac{d_0 - mk}{2d_0 m} \right]^2 + \frac{k+1}{d_0 m} \right\}^{0.5} \quad (5.9)$$

При $d_0 < 0$ в (5.9) следует брать знак "плюс", при $d_0 > 0$ - "минус". Для $d_0 > 0$ и $k > (-1)$ оптимум по s отсутствует, что является полезным фактом в предварительном анализе зависимости $\alpha_V(s)$ на наличие s_M . Значения s_M , рассчитанные для $m = 1.6$, $d_0 > 0$, $d_0 < 0$, приведены на рис. 5.1.

В другом частном случае, встречающемся на практике, $d_0 = 0$, $a_0 = 0$, величина s_M определяется из уравнения

$$a_0 + b_0(k+1)s_M^k - b_0 m k s_M^{k+1} = 0, \quad (5.10)$$

$$0 < s_M < 1/m.$$

В этом случае оптимум по s имеет место только при $k < (-1)$.
При $a_0 = 0$

$$s_M = (k+1)/mk \quad (5.11)$$

формула (5.11) может быть использована вместо (5.10), когда $a_0 \ll b_0$.

Если в области $0 \leq s < 1/m$ максимум функции W_{II} по концентрации отсутствует, следует искать наибольшее значение W_{II} .

Таким образом, величина s_M является функцией свойств осадка, не зависящей от сопротивления фильтровальной перегородки, а также от длительности вспомогательных операций, объема полученного фильтрата и q_p , т.е. способа промежуточной регенерации.

Если $q_p = 0$, $t_{pII} = 0$, $n=1$, то соотношения (5.7) и (5.8) перейдут в условие наибольшей производительности фильтра периодического действия без промежуточной регенерации (фильтровальная перегородка (одноперiodное фильтрование)):

$$q_{II} = q_M = \left[t_B / \alpha_1 \alpha_V(s_M) \chi_0(s_M) \right]^{0.5} \quad (5.12)$$

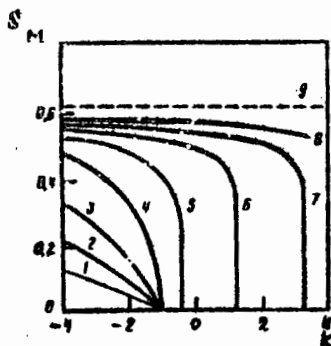


Рис. 5.1. Зависимость s_M от k : 1 - $d_0 = 20$; 2 - 10; 3 - 5; 4 - (-1); 5 - (-5); 6 - (-10); 7 - (-15); 8 - (-20); 9 - $s_M = 1/m$.

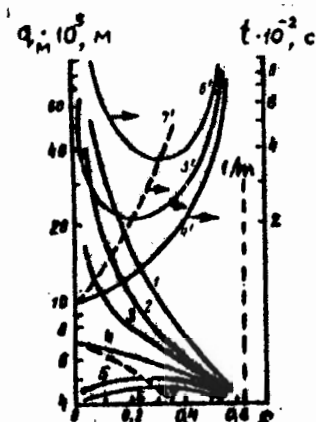


Рис. 5.2. Зависимость $q_M = q(s)$ (1-7) и $t_{|q=q_M} = t(s)(1'-7')$ при различных законах изменения α_V : 1 - $k=0,5$; 2 - 0; 3 - (-0,5); 4,4' - (-1,0); 5,5' - (-1,5); 6,6' - (-2,0); 7 - $q_M = q(s_M)$ при $k < (-1)$; 7' - $t_{|q=q_M} = t(s_M)$ при $k < (-1)$.

Интересно отметить, что если формулу (5.8) переписать в более общем виде

$$q_M = q_p + \left[q_p^2 + \frac{bq_p + t_B''}{a_1 \alpha_V(s_M) \chi_0(s_M)} \right]^{0.5} =$$

$$q_p + \left[\frac{a_1 \alpha_V(s_M) \chi_0(s_M) q_p^2 + bq_p + t_B''}{a_1 \alpha_V(s_M) \chi_0(s_M)} \right]^{0.5}.$$

то сумма $a_1 \alpha_V(s_M) \chi_0(s_M) q_p^2 + bq_p + t_B'' = t_{DM}$ будет представлять собой время фильтрования, необходимое для получения объема фильтрата q_p при $s = s_M$. Тогда

$$q_M = q_p + \left[\frac{t_{DM} + t_B''}{a_1 \alpha_V(s_M) \chi_0(s_M)} \right]^{0.5}.$$

Полученная формула удобна тем, что в нее не входит в явном виде сопротивление фильтровальной перегородки.

Если ввести обозначения

$$q_{pM} = \sqrt{t_{DM}} / \sqrt{a_1 \alpha_V(s_M) \chi_0(s_M)},$$

$$q_{цM} = \sqrt{t_B''} / \sqrt{a_1 \alpha_V(s_M) \chi_0(s_M)}.$$

то можно получить другую интерпретацию формулы (5.8):

$$q_M = q_p + q_{pM} + q_{цM}$$

Оптимальный объем фильтрата при фильтровании с промежуточной регенерацией за один период представляет сумму объема фильтрата, возвращаемого при регенерации в суспензию q_p , и оптимальных объемов фильтрата, полученных в периодических процессах без промежуточной регенерации, с длительностью вспомогательных операций t_{DM} (объем фильтрата q_{pM}) и t_B'' (объем фильтрата $q_{цM}$) соответственно.

Полученные формулы расчета процесса фильтрования с образованием осадка при условии обеспечения постоянного давления фильтрования и наибольшей производительности по фильтрату могут быть использованы при оптимизации по условию наибольшей экономичности, если перед соответствующими слагаемыми в (5.1), (5.4) известны коэффициенты, учитывающие различные затраты на единицу времени операций, входящих в цикл, по отношению к затратам в единицу времени фильтрования.

На практике довольно часто встречаются суспензии, у которых зависимость $\alpha_v(s)$ носит монотонный характер ($d_0 = 0$).

Оценим влияние различных параметров процесса фильтрования на условие наибольшей производительности для $\alpha_0 = 0$, приняв характерные для практики фильтрования параметры: $b_0 = 1 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$; $R_m = 1 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-1}$; $\mu = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\Delta p = 0,1 \text{ МПа}$; $q_p = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2$ ($t_p = 4 \text{ с}$); $m=1,6$; $D=1,56$.

Рассмотрим условие наибольшей производительности для одного периода работы фильтра-стаканчика ($t_B'' = t_{p\text{п}}$), считая, что сбрасываемый обратным током фильтрата осадок оседает на дно фильтра, не изменяя концентрации фильтруемой суспензии. Полученные результаты будут справедливы и в случае $t_B'' = t_{p\text{п}} + t_p/n$.

Оценивая зависимость $W_{\text{ИД}}$ от величины α_0 и t_B'' для различных k , можно заключить, что наибольшая производительность мало чувствительна к величине коэффициента α_0 по крайней мере до $\alpha_0/b_0 > 1$, например, в условиях расчетного примера при $\alpha_0 = b_0$ значения $W_{\text{ИД}}$ отличается от соответствующей величины при $\alpha_0 = 0$ на 3 - 5%. При $\alpha_0/b_0 > 1$ роль α_0 в производительности фильтра возрастает (для $\alpha_0 = 1 \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$ значения $W_{\text{ИД}}$ меньше соответствующей величины при $\alpha_0 = 0$ на 20 - 50%). Иными словами, для $\alpha_0 \ll b_0$ вместо двучленного уравнения $\alpha_v(s)$ можно без значительного ущерба в точности использовать формулу $\alpha_v(s) = b_0 s^k$ при $k < (-1)$ для определения s_M . Значения $W_{\text{ИД}}$ монотонно уменьшаются с увеличением t_B'' и тем интенсивнее, чем больше коэффициент k .

Влияние показателя степени k на оптимальные условия фильтрования рассмотрим, полагая для удобства $c_0 \ll b_0$ и приняв $t_B = 20$ с. Результаты расчетов приведены на рис. 5.2 и 5.3. Во всех случаях при $k > (-1)$ увеличение концентрации фильтруемой суспензии ведет к резкому падению экономичности процесса (по фильтрату) и увеличению длительности периода фильтрования. При этом экономичность фильтра существенно зависит от колебаний концентрации фильтруемой суспензии, особенно при низких концентрациях.

Г в связи с тем, что кроме организации процесса фильтрования с регенерацией фильтровальной перегородки по достижении оптимального объема фильтрата возможно ведение процесса, в котором регенерация проводится после получения одинаковых в каждом периоде порций фильтрата. На рис. 5.4 и 5.5 для условий примера ($d_0 = 0$) приведены графики, иллюстрирующие влияние k и s на продолжительность получения постоянного объема фильтрата $q = 0,01$ м. Следует отметить, что для $k > 0$ и малых концентраций твердой фазы в суспензии время получения постоянного объема фильтрата мало зависит от величины коэффициента k .

Из полученных выше соотношений следует, что для суспензия с возрастающим сопротивлением осадка от s уменьшение величины $b = \mu R_m / \Delta p$ является существенным резервом повышения производительности фильтра (рис. 5.6).

На практике довольно часто встречаются суспензии, у которых зависимость $\alpha(s)$ носит монотонный характер ($d_0 = 0$).

Проанализируем формулу (5.8) для этого случая в области $s > 0$, хотя указанная область часто не соответствует фильтрованию с образованием осадка. При малых концентрациях суспензии применимость (5.8) может быть определена только на основе экспериментальных данных, позволяющих установить вид процесса фильтрования, т.е. найти минимальную концентрацию фильтруемой суспензии, при которой процесс носит характер фильтрования с образованием осадка.

При рассмотрении теоретических следствий, вытекающих из полученных выше соотношений, будем считать, что во всем диапазоне изменения концентраций процесс имеет характер фильтрования с образованием осадка.

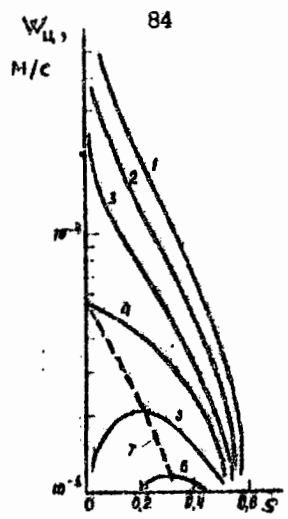


Рис. 5.3. Зависимость $W_{ц} = W(s)$ при различных законах изменения $\alpha_{в}$: 1 - $k=0,5$; 2 - 0; 3 - $(-0,5)$; 4 - $(-1,0)$; 5 - $(-1,5)$; 6 - $(-2,0)$; 7 - $W_{цM} = W(s_M)$ при $k < (-1)$.

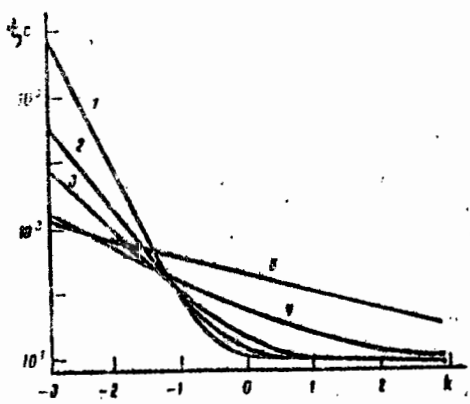


Рис. 5.4. Продолжительность получения постоянного объема фильтра-та $q=0,01$ м при $b=1 \cdot 10^3$, $\alpha_0 = 0$: 1 - $s = 0,01$; 2 - 0,05; 3 - 0,1; 4 - 0,3; 5 - 0,5.

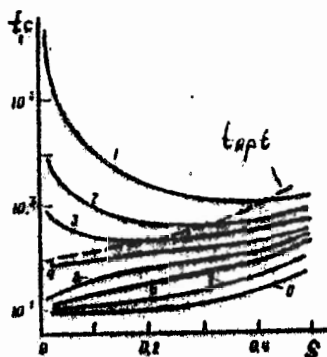


Рис. 5.5. Влияние концентрации фильтруемой суспензии на продолжительность получения $q=0.01$ м при $b=1 \cdot 10^3$, $\alpha_0=0$; 1 - $k=(-3)$; 2 - (-2) ; 3 - (-1.5) ; 4 - (-1) ; 5 - (-0.5) ; 6 - 0; 7 - 1; 8 - 2.

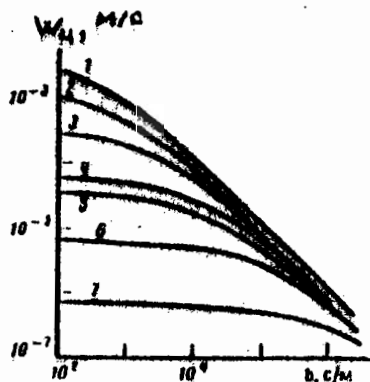


Рис. 5.6. Влияние b на $W_{ц}$ при концентрации, отличной от оптимальной ($s=0,1$), при различном характере изменения α_v ($t_{в}^{\text{опт}}=20$ с, $\alpha_0=0$, $q_p=4 \cdot 10^{-3}$ м): 1 - $k=2$; 2 - 1; 3 - 0; 4 - (-1) ; 5 - (-1.5) ; 6 - (-2) ; 7 - (-3) .

Исходя из сделанного допущения, дадим физическое толкование поведения функции W_{II} в области малых концентраций. Возможны следующие варианты: $W_{II} \rightarrow 0$; $W_{II} \rightarrow \text{const}$; $W_{II} \rightarrow \infty$. Предел, к которому стремится условная скорость фильтрования W_{II} , определяется характером изменения комплекса $\alpha(s) = \alpha_V(s) \times \alpha_0(s)$. Рассмотрим предел

$$\lim_{s \rightarrow 0} \alpha(s) = \lim_{s \rightarrow 0} [a_1 D(a_0 + b_0 s^k) \cdot s / (1 - ms)].$$

При $(k + 1) < 0$, $k < (-1)$ $\alpha(s) \rightarrow \infty$, $q_M |_{s \rightarrow s_M} \rightarrow 2q_p$, $t |_{q=q_M} \rightarrow \infty$.

Неограниченное возрастание t в этом случае связано с тем, что при $s \rightarrow 0$ сопротивление осадка резко возрастает. Это характерно для малоконцентрированных суспензий с тонкодисперсной фазой, когда преобладает процесс закупоривания пор перегородками. С ростом концентрации увеличивается вероятность образования "сводов" из частиц над устьями пор, что ведет к снижению общего сопротивления.

Для $k = (-1)$ $\alpha(s) \rightarrow b_0$ и $q_M |_{s \rightarrow s_M} \rightarrow \text{const}$. Так как при $k = (-1)$ обычно величины $(bq_p + t_B)/\alpha(s)$ при $s \rightarrow 0$ много меньше q_p , можно принять $\text{const} \approx 2q_p$.

При $k > (-1)$ $\alpha(s) \rightarrow 0$, $q_M |_{s \rightarrow s_M} \rightarrow \infty$, что обусловлено незначительным сопротивлением осадка. Такая ситуация возможна при фильтровании малоконцентрированных крупнодисперсных суспензий. Полученные результаты указывают на определяющую роль характера изменения сопротивления осадка от концентрации суспензии, а наличие или отсутствие оптимума по s зависит от величины показателя k .

Таким образом использование в модели фильтрования с образованием несжимаемого осадка общей формулы, описывающей зависимость α от s , позволило установить нижеследующее.

Свойства осадков определяются не только концентрацией суспензии, но и показателем степени k в формуле $\alpha(s)$. При показателе степени $k > -1$ отсутствует оптимум фильтруемой суспензии по концентрации, а производительность фильтра тем больше,

чем меньше содержание твердой фазы в суспензии. В этом случае мероприятия по предварительному сгущению суспензии не эффективны, т.к. ведут к снижению производительности. При показателе степени $k < -1$ существует оптимальная концентрация, обеспечивающая наибольшую скорость фильтрования. Работа фильтра при концентрации, отличной от оптимальной, ведет к падению производительности.

Оптимальная концентрация суспензии для несжимаемых осадков зависит от показателя степени k и не зависит от таких параметров, как R_m , q , t , μ , $\Delta\rho$, что открывает возможность расчета и создания химико-технологического процесса, включающего предварительное сгущение суспензии до s_m и фильтрование при s_m до q_m .

Выбор способа воздействия на параметры из числа μ , $\Delta\rho$, R_m с целью увеличения производительности фильтра нуждается в дифференцированном подходе к суспензиям с различным характером изменения сопротивления осадка в зависимости от концентрации.

Полученные результаты моделирования полезны при выборе способа предварительной обработки суспензии и прогнозирования свойств осадка по величине показателей степени в формуле $\alpha(s)$.

Модель процесса может быть использована в адаптивных автоматических системах управления процессом фильтрования, в котором исходная концентрация суспензии подвержена колебаниям под воздействием различных технологических факторов [47,78].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные выше аспекты теории и практики фильтрования являются лишь частью общей проблемы процессов с твердой дисперсной фазой и, в частности, процессов разделения дисперсных систем жидкость-твердое.

Отметим, что по признанию специалистов разных стран, имеется разрыв между уровнем оборудования и технологий, связанных с системами жидкость-твердое, и общим уровнем развития химической технологии.

Специалисты из "Dow Chemical U.S.A." приводят следующую статистику: 1) крупные предприятия, работающие с твердыми веществами в основном процессе, имеют для этих целей гораздо худшее оборудование, чем предприятия, которые работают с газами и жидкостями; 2) строящиеся установки, как правило, оснащены не лучше, чем в 60-х годах; 3) в среднем предприятие, имеющее дело с твердым сырьем, работает только на 50% от проектной производительности.

В свою очередь фирма "DuPont", производящая около 3000 продуктов, так оценивает роль процессов в системе жидкость-твердое: 62% продукции - сухие порошки (волокна, таблетки, гранулы, пигменты, катализаторы и т.д.) 18% - смеси жидкость-твердое (суспензии, эмульсии, кремы, пасты и т.д.), причем около 80% инженеров-химиков сталкиваются на своей первой должности в "DuPont" с процессами, связанными с твердой фазой, к которым они совершенно не подготовлены.

В результате все большее число специалистов обращает свое внимание на процессы переработки дисперсных систем жидкость-твердое. Можно констатировать, что данное направление в ближайшем десятилетии будет той активной точкой роста, которая существенно повлияет на химическую технологию и технику защиты окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1989.
2. Дегнерский Д.И., Кочаров Р.Г. Некоторые проблемы теории и практики использования баромембранных процессов // Журнал Всес. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева. - 1987. - 32, №6. - с.607-614.
3. Ельшин А.И. Некоторые вопросы развития процессов фильтрации и мембранной технологии // Дел. №2973-892 от 14.10.92. - Новолоцк, НПИ. - Рукопись деп. в ВНИИТИ, М. - 1992. - 18 с.
4. The market for industrial filters // Fluid/Particle Separation Journal (USA). - 1992. - 5, №3. - p.315.
5. Разгитин В.Ю., Прокофьева Н.В., Карлов А.М. Мембранные биореакторы: состояние и перспективы // Процессы и аппараты химико-фармацевтических производств. Обзорн. информ. - М.: ВНИИСЭТИ, 1990. - Вып.4. - 24 с.
6. Кочергина Е.Л. Рынок оборудования для ультрафильтрации в США // Химико-фармацевтическое производство за рубежом. Экспресс-информация. - М.: ВНИИСЭТИ, 1990. - Вып.19. - с.10.
7. Greger E.C. The state of the art of microfiltration and its expected growth until the year 2000 // Fluid/Particle Separation Journal (USA). - 1989. - 2, №4. - p.190-195.
8. Future forecast for membrane microfiltration // Filtration News (USA). - 1988. - 6, №5. - p.16.
9. Action plenty in filtration // Chem.Eng.(USA). - 1990. - 97, №2. - p.85-88,90.
10. Ельшин А.И. Студенческие суспензии микробиологических производств и способы интенсификации процесса // Процессы и аппараты микробиологических производств. Обзорная информация. - М.: Машмед-биопром, 1987. - Вып.3. - 29 с.
11. Yelshin A. Making batch and continuous filters better known // Filtr. and Separ. - 1989. - 26, №6. - p.402-403.
12. Yelshin A. How cost can be correlated to certain parameters of filtration equipment // Filtr. and Separ. - 1990. - 27, №1. - p.10-11.
13. Ельшин А.И. Исследование процесса фильтрации, разработка новых аппаратов, методов расчета и оптимизации // Отчет по

- НИР ГВ 1286. - Новололоцк: НИИ. - 1991. - н ГР 01.86.0029179. - 63 с.
14. Von Phul, Ballard D., Stephen A. Cut filtration costs by 80% // Chem.Eng.Progr. - 1991. - 87, N5. - p.65-68.
 15. Пужнатый А.Е., Гольдберг Ю.С. Энергетический подход к проблеме обезвоживания // Ин-т Механообрчермет. - Кривой Рог, 1990. - 21 с. - Деп. в Черметинформации 10.08.90. - N5567-чм90.
 16. Ельшин А.И. О возможности создания гибкого автоматизированного химико-технологического процесса фильтрования при использовании робото- и микропроцессорной техники // Повышение эффективности познания. Деят-ти в науке и практике в свете решения 27 съезда КПСС: Тезисы докл. н.-практ. конференции. - Минск: БелНИИТИ, 1986. - 3. - с.56-58.
 17. El'sin A.I. Entwicklungstendenzen des Filtrationsprozesses als flexible technologie und die bewertung der porosen medien aus der sicht der entropie // Mechanische Flussigkeitsabtrennung. Vortragstexte 23. Diskussionstagung mit internationaler Beteiligung 11-12 Oktober 1988. - Magdeburg (DDR), 1988. - s.85-91.
 18. Ельшин А.И. Применение промышленных роботов для обслуживания фильтров периодического действия // Химическое и нефтяное машиностроение. - 1985. - N11. - с.12-13.
 19. Yelshin A. Apptying robots to batch filtration equipment // Filtr. and Separ. - 1990. - 27, N2. - p.73.
 20. Ельшин А.И. Перспективы создания гибких производств с применением гидромеханических процессов разделения дисперсных систем // Гибкие производственные системы химического профиля (По материалам Всес.н.-техн. конф., Ленинград-Поддубская). - Препринт N125. - Л.: ИИАН, 1990. - с.38-39.
 21. Ельшин А.И. Тенденции развития фильтрования и фильтровального оборудования // Химическое и нефтеперерабатывающее машиностр. Обзорная информация. Сер. ХМ-1. - М.: ЦИНТИхонефтемах, 1992. - 44 с.
 22. Yelshin A. Separation technology and progress // Filtr. and Separ. - 1992. - 29, N6. - p.481,483,485.
 23. Исследование свойств дисперсных систем с сильноосаждаемыми осадками. Отчет по НИР ГВ 1392 / Рук. А.Ельшин. - Новололоцк:

- НПИ, 1992. - 73 с.
24. Yelshin A. The development of filtering equipment for hazardous materials //Fluid/Particle Separation Journal.- 1992.- 5,N3.- p.126-129.
 25. Лопотко М.З. Сапропели ВССР, их добыча и использование. - М.: Наука и техника, 1974.
 26. Anlauf Harald. Viele Möglichkeiten Verfahren zur Fest-Flüssig-Trennung im Rahmen des Aufbereitens von Abwasser //Maschinenmarkt.- 1992.-98,N11.- с.30-31.
 27. Яковлев С.В., Туровский И.С. Обработка осадков сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника.-1992.-N7.- с.2-4.
 28. Жуковский В.А. Фильтрация. - М.:Химия, 1980.- 400 с.
 29. Ельшин А.И. К вопросу о моделировании некоторых пористых сред //Охрана окружающей среды. Респ. между. сб.- Мн.: Выд. школы.- 1984.- Вып. 3.- с.88-92.
 30. Yelshin A. Filtration and membranes in space industrialization//EuroMembrane-92. Annual Congress of the European Society of Membrane Science and Technology (ESMST). Oct.5-8, 1992.- Paris, France, 1992.- 6 p.p.
 31. Ельшин А.И. Принципы фильтрации и мембранной технологии в индустриализации космоса //Доп. N2933-В92 от 9.10.92.- Новополоцк, НПИ.- Рукопись деп. в ВИНТИ, М., 1992.- 16 с.
 32. Artisan continuous filter//Bulletin N 4060 of "Artisan Industries, Inc." (USA).
 33. Патент 4911874. МКИ В 01 D 13/00 (США).-Заявл. 16.12.87; Опубл. 27.03.90.
 34. Проспект фирмы "Gottswan National Corp." (США), 1989.
 35. Заявка 56-49528. МКИ В 01 D 33/08 (Япония). Патронный вакуум-фильтр для разделения суспензии.- Опубл.12.12.80.
 36. А.с. 276004. МКИ В 01 D 27/00 (СССР). Непрерывно действующий патронный фильтр.
 37. Avery L. Filtration plant-scale// Chemtech.- 1985.- 15,N 10.- p.622-631.
 38. Tiller F.M., Yeh C.S. The role of porosity in filtration. Part XI//AIChE Journal.- 1987.- 33,N8.- p.1234.
 39. Разделение суспензий в химической промышленности/ Е.Ф.Малковская и др.- М.:Химия, 1983.

40. Indrex Brush - Cleaned Pressure filter// Выходень фирмы "Zimpro/Passavant" (США). - 1988.
41. Yeh S.H. Coke deliquoring and radial filtration// Dissertation of Ph.D. - Houston: University of Houston (USA), 1985. - 263 p.p.
42. Заявка 3520249 ФРГ, МКИ В 01 D 29/10. Механизм для разгрузки нутч-фильтра. Vorrichtung zum Austragen von Filterkuchen aus einer Mische. - Заявл. 5.06.85. Опубл. 11.12.86.
43. Заявка 3508774 ФРГ, МКИ В 01 D 25/38. Роботизированный фильтр-пресс. Filterpress. - Заявл. 15.03.86, Опубл. 17.09.87.
44. Lowton D.J., Constantino T. What makes cartridge filters perform effectively? // Chem. Eng. Progr. - 1987. - N11. - p.20-25.
45. А.с. 1175131 СССР, Патронный фильтр /А.И.Ельшин, С.П.Малугевич. - 1992. - Бюл. N42.
46. Ельшин А.И. Методика определения постоянных в уравнениях фильтрования // Заводская лаборатория. - 1985. - 52, N7. - с.58-59.
47. Ельшин А.И., Вадлак О.В. К разработке автоматической системы фильтрования при колебании концентрации фильтруемой суспензии // Разработка и применение систем автоматизированного проектирования и АСУ горного производства. Материалы Всес. совещания. - Азна-Ага: КавПТИ, 1987.
48. Ельшин А.И., Васечкин В.Н. и др. Автоматизированная система исследования процесса фильтрования // Создание и производство опытных установок для биотехнологических процессов. Тезисы докл. Всес. совещания. Пушкино, 1987. - М.: ВНИЭСНТИ, 1987. - с.30-31.
49. Ельшин А.И. Методы и оборудование для тестирования свойств фильтров и фильтруемых дисперсных систем в США // Автоматизация биотехнологических производств. Автоматизация-90. Тезисы докл. Всес. конференции. - М.: Издобрэконоиника, 1990. - с.80-83.
50. Вороний С.С. Курс коллоидной химии. - М.: Химия, 1976. - 512 с.
51. Коагуляционные контакты в дисперсных системах / В.В.Яковлев, В.А.Пчелин, Е.А.Амелина и др. - М.: Химия, 1982. - 185 с.
52. Арефьев В.А. Физико-химические основы компактирования волокнистых композиционных материалов. - М.: Металлургия, 1988. - 192с.
53. Протодакионов И.О., Лублюжская И.Е., Рыжков А.Е. Гидродинами-

- ка и массообмен в дисперсных системах жидкость-твердое тело. - Л.: Химия, 1987. - 336 с.
54. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. - М.: Химия, 1988. - 256 с.
 55. Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. - Л.: Химия, 1982. - 268 с.
 56. Ельшин А.И. Влияние концентрации фильтруемой суспензии на производительность фильтра-сгустителя // Дип. №141 от 16 февр. 1984. - Рукопись деп. в ЦИТИХиНафтамаш, М. - 20 с.
 57. Митрохин А.М. Современное состояние теории промышленного фильтрования и вспомогательных процессов // Итоги науки и техники. Сер. Процессы и аппараты химической технологии. - М.: ВИНТИ, 1979. - №6. - с.3-115.
 58. Лялюкис И.М. Фильтрование с применением вспомогательных веществ. - Киев: Техника, 1975. - 192 с.
 59. Rushton A., Nemeed S. The effect of concentration in rotary vacuum filtration // Filtr. and Separ. - 1969. - 6, №2. - p.136-139.
 60. Ельшин А.И. Влияние концентрации исходной суспензии на производительность фильтра // Журнал прикладной химии. - 1985. - 58, №5. - с.1163-1166.
 61. Гутин Д.В., Жушков В.А. Влияние концентрации суспензии на удельное сопротивление осадка при фильтровании // Химическая пром-сть. - 1967. - №5. - с.388-391.
 62. Поспелов Ф.М., Барбин М.Б., Поспелова З.Е. Влияние концентрации суспензии на показателя ее фильтрования // Хим. и нефтяное машиностроение. - 1970. - №12. - с.14-15.
 63. Федотов Л.А., Рейбах М.С., Жушков В.А. Исследование структуры вспомогательных веществ с использованием лимонноспиртовых индикаторов // Химическая пром-сть. - 1972. - №4. - с.291-294.
 64. Ширинкин Л.Г., Загудав А.М., Бороздин А.П. К вопросу о влиянии условий получения суспензий на процесс фильтрования в производстве неорганических веществ // Процессы и аппараты технологии неорганических веществ. Тр. ИИХИМ. - Л.: Химия, 1979. - Вып.48. - с.17-24.
 65. Экспериментальное исследование фильтрации суспензии тетрафталевой кислоты в уксусной кислоте. III. Влияние

- некоторых факторов на удельное объемное сопротивление осадка и выбор режима разделения суспензий ТФК в центробежном поле /В.Н.Петраков, И.С.Зарх, С.П.Карасева и др.//Тр. Всес. н.-и. и проект. ин-та мономеров. - 1974. - Вып. 4. - с.172-180.
66. Leenderts R. Essais de laboratoire, chapitre troisieme //Filtration industriel de liquides. - 1977. - 5. - p.43-105.
 67. Красик Э.М. Исследования седиментационных и фильтрационных свойств гидрокиси магния, осажденной из природных растворов //Автореф. дис... канд. техн. наук. - Л.:ГИГХ, 1970. - 22 с.
 68. Баранов Г.П., Ивин Д.Ф., Чemezov В.А. Исследование разделения суспензий гидрокиси железа фильтрованием с использованием вспомогательного вещества //Химическая пром-сть. - 1962. - №3. - с. 201-204.
 69. Kavanagh P.V. The dewatering of activated sludge: mesurment of or specific resistance of filtration and capillary suction time// Water Pollut. Contr. - 1980. - 79,№3. - p.388-398.
 70. Лынькова О.С., Жужовская С.А. Влияние степени разбавления культуральной жидкости антибиотиков на показатель фильтруемости // Антибиотики. - 1975. - №7. - с.596-599.
 71. Alt C. Stand der filtrationstheorie und seine bedeutung fur die praktische anwendung // Aurbereit Techn. - 1980. - 21,№4. - s.177-183.
 72. Поспелов Ф.М., Колбасаров М.Т., Маренкова Е.В. Влияние концентрации пульпы на удельное сопротивление осадка кока при фильтровании подсосом // Изв. вузов. Горный журнал. - 1976. - №3. - с. 169-171.
 73. Малиновская Т.А. Разделение суспензий в промышленности органического синтеза. - М.:Химия, 1971. - 320 с.
 74. Ельшин А.И. Формула для описания зависимости сопротивления осадка от концентрации фильтруемой суспензии // Журнал прикладной химии. - 1985. - 58,№12. - с.2671-2675.
 75. Jelsch A. Berechnung und optimierung der filtration bei variablen konzentrationen der suspensionen // Mechanische Flussigkeitsabtrennung. Vortragsbestatigung zur 22. Diskussionstagung it internationaler. - Dresden (DDR). - 1986. - 6 s.s.

76. Jelschin A. //Chem. Techn. (DDR) — 1986. — №11. — s.485.
77. Ельшин А.И. Влияние концентрации фильтруемой суспензии на производительность фильтра периодического действия // Теор. основы хим. технологии. — 1988. — 22, №1. — с.84-89.
78. Ельшин А.И. Некоторые теоретические предпосылки создания системы выбора степени сгущения биосуспензий // Создание и производство пилотных установок для биотехнологических процессов. Тезисы докл. Всес. совещания. Пушкино, 1987. — М.: ВНИИСЭНТИ, 1987. — с.35-36.

Александр Иванович Елькин
Теоретические и технологические аспекты разделения
дисперсных систем фильтрованием

Подписано в печать 20.10.94 Формат 60x84/16 Печать офсетная
Усл. печ. л. 6,73 Уч. изд. л. 6,85 Тираж 150 Заказ 30
Цена 1500 р.

Отпечатано на ротационной ПГУ
211440, г.Новолодоцк, ул. Влохина, 29