

УДК 66.067+628.33+532.546+51-74

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЧАСТИЦ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ФИЛЬТРЕ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

© 2010 В.А. Девисилов, Е.Ю. Шарай

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, г. Москва

Поступила в редакцию 14.12.2010

В статье рассмотрено моделирование работы гидродинамического вибрационного фильтра с помощью программного комплекса для гидромеханических расчетов. Представлены предварительные расчетные результаты, которые показали перспективность предлагаемой схемы очистки. Машинное моделирование позволяет определить оптимальные режимные параметры и минимизировать объем экспериментальных исследований фильтра.

Ключевые слова: очистка жидкости, фильтрование, гидродинамический фильтр, машинное моделирование, неньютоновская жидкость.

1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы фильтрации и фильтрования жидкостей в настоящее время недостаточно изучены. Имеющиеся теоретические разработки по этим вопросам базируются на рассуждениях и выводах, которые зачастую не достаточно подтверждены результатами экспериментальных работ. Особенно это относится к фильтрованию высоковязких и реологически сложных жидкостей. Большинство таких жидкостей обладают неньютоновскими свойствами, эффективная вязкость которых зависит от скорости деформации. Движение таких жидкостей в пористой среде изучено мало. При построении теории фильтрации и фильтрования используются допущения и упрощения, которые не позволяют получить целостную картину процесса. Отсутствие адекватной модели гидродинамики неньютоновской жидкости в гидродинамическом фильтре является основной проблемой на пути создания общей методики расчета аналогичных аппаратов. Поэтому построение математической модели фильтрования, основанной на численном решении уравнений Навье-Стокса, весьма актуально особенно при рассмотрении многофакторных процессов, теоретическое описание которых весьма сложно.

Использование численного эксперимента при решении таких задач конкретизирует направления экспериментально-теоретического исследования процессов фильтрации и фильтрования, позволяет выявить уже на стадии проектирования оптимальные режимы работы филь-

тра, оптимизировать элементы его конструкции и сосредоточиться на основных задачах экспериментального исследования.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время в МГТУ им. Н. Э. Баумана на кафедре “Экология и промышленная безопасность” ведётся работа по созданию гидродинамического вибрационного фильтра, описание которого представлено в [1-4]. Процесс очистки заключается в том, что жидкость пропускают через фильтровальную перегородку, которая вращается и вибрирует вдоль оси вращения, при этом часть очищаемого потока перепускается вдоль перегородки (рис. 1).

Задача заключается в создании расчетной графоаналитической модели, с помощью которой можно было бы оценить влияние различных факторов на процесс очистки, в частности:

- свойств очищаемой среды (реологических свойств, плотности);
- параметров отделяемой твердой фазы (размера частиц и их плотности);
- режимов работы фильтра (частоты вращения фильтроэлемента, частоты и амплитуды его вибрации, скорости течения жидкости вдоль фильтровальной перегородки, соотношения объемов очищаемой и перепускаемой жидкости).

Анализ современных программных продуктов показал, что базой для расчетного исследования гидродинамических и сепарационных процессов, происходящих в фильтре, может являться программный комплекс “STAR-CD”. Использование программного продукта предполагает численное решение уравнений Навье-Стокса, осреднённых по числу Рейнольдса при заданных граничных условиях, методом конечных объёмов. На первом этапе работы создана упрощенная графоаналити-

Девисилов Владимир Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры “Экология и промышленная безопасность”. E-mail: devisil@mail.ru

Шарай Елена Юрьевна, аспирант кафедры “Экология и промышленная безопасность”. E-mail: elena.sharai@yandex.ru

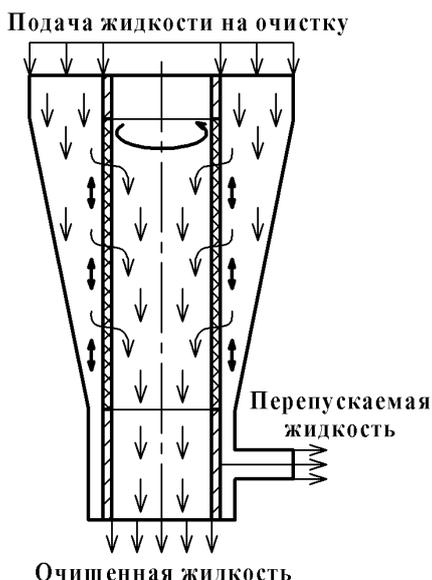


Рис. 1. Схема работы фильтра

ческая модель и проведены предварительные расчеты с целью обоснования возможности использования программного комплекса для решения поставленной задачи.

Для подтверждения возможности использования результатов, полученных с использованием программного комплекса “STAR-CD”, и адекватности разработанной графоаналитической модели для изучения процессов фильтрования смоделированы и рассчитаны некоторые течения, для которых известны точные аналитические решения, и проведено их сравнение. Программа показала довольно высокую сходимость с аналитическим решением, на основании чего

сделан вывод о возможности использования результатов, полученных в “STAR-CD”.

3. СОЗДАНИЕ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Построение геометрии

Создание модели начинается с построения её геометрии. Геометрическая модель предусматривает разбиение на 1 953 540 структурированных гексоэдрических ячеек – элементарных объёмов, в которых происходит расчет. Такое мелкое разбиение позволяет достичь сходимости решения. Ячейки сгущаются к областям образования пограничного слоя. На первом этапе работы при построении геометрии были приняты следующие упрощения:

- не рассматривается течение жидкости в отводящем патрубке;
- фильтровальный элемент, состоящий из сетки, закрепленной на каркас в виде перфорированного цилиндра, заменен эквивалентной пористой средой.

Исходные данные для расчетов

Рассматривались случаи:

- вращения фильтровальной перегородки с различными частотами при фильтрации ньютоновской жидкости;
- вращения фильтровальной перегородки при фильтрации неньютоновской жидкости с различным индексом течения.

Параметры сред, режимов и конструкции, для которых на первом этапе работы выполнялись расчеты, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры сред, режимов работы и конструкции фильтра

Наименование	Материал, значение	Примечания
Жидкая среда	Вода, 20°С	
	Масло инд., 20°С	
Твердая фаза	Железо	Плотность $\rho_p = 7800 \text{ кг/м}^3$
	Карбид бора	Плотность $\rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$
Диаметр частиц d , мкм	20; 40; 60; 100; 300; 500	
Расход жидкости через фильтр, л/мин ($\text{м}^3/\text{с}$)	2 ($3,333 \cdot 10^{-5}$)	
Средняя скорость жидкости на входе, м/с	0,029	
Частота вращения фильтровальной перегородки f , Гц	1,7; 5,0; 10,0	
Фильтровальный материал	Сетка С 685	ТУ 14-1-697-2001
Расход перепускаемой жидкости	15% от полного расхода	$4,999 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$
Расход очищенной жидкости	85% от полного расхода	$2,833 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$
Индекс течения n	0,4; 0,6; 0,8; 1,0	Реологическая кривая жидкости описывается степенной зависимостью
Коэффициент консистенции жидкости k , Па $\cdot\text{с}^{(2n-1)/n}$	0,153	

Задание фильтровальной перегородки

Фильтровальная перегородка в модели задаётся эквивалентным гидравлическим сопротивлением и величиной пористости материала. Сопротивление в направлении движения потока в пористой среде описывается значением коэффициента λ , примененного для канального течения. Коэффициент сопротивления λ представляется в программе в виде:

$$\lambda = C_1 \text{Re}^m \left(1 + \frac{C_2}{\text{Re}} \right) \left[\equiv \frac{\tau}{\rho v'^2} \right], \quad (1)$$

где C_1, C_2, m – константы, зависящие от типа жидкости; Re – число Рейнольдса ($\text{Re} = \rho v' D / \mu$); v' – средняя скорость жидкости в среде, м/с, μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; D – характерный диаметр канала, м; τ – касательное напряжение, кг/(м·с²).

Средняя скорость жидкости в среде

$$v' = \frac{Q_{\text{фп}}}{S_{\text{фп}} \cdot \varepsilon}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{фп}}$ – расход жидкости через фильтровальную перегородку, м³/с; $S_{\text{фп}}$ – площадь фильтровальной перегородки, м², ε – пористость фильтровального материала.

Потеря давления на единицу длины канала может быть представлена как:

$$\frac{dp}{L} = -\tau \frac{P}{A'}, \quad (3)$$

где P – периметр смоченной поверхности, м; A' – площадь поперечного сечения каналов пористой среды, м².

Из уравнения (3) следует, что:

$$\tau = -\frac{dp}{L} \frac{A'}{P}. \quad (4)$$

Используя уравнения (1) и (4) получаем:

$$C_1 \text{Re}^m \left(1 + \frac{C_2}{\text{Re}} \right) = -\frac{dp}{L} \frac{A'}{P \rho v'^2}. \quad (5)$$

После преобразования выражения (5) получаем:

$$\frac{dp}{L} = -\frac{PC_1 \rho u^2 \text{Re}^m}{2\varepsilon^3 A} - \frac{PC_1 C_2 \mu u \text{Re}^m}{2\varepsilon^2 AD} = \alpha u^2 + \beta u, \quad (6)$$

где u – приведенная скорость (определяется отношением средней скорости к доле твердой фазы

пористой среды, $u = v' \varepsilon$), м/с; A – поверхностная площадь фильтровальной перегородки ($A = A' / \varepsilon$), м².

С помощью коэффициентов α [кг/м⁴], β [кг/(м³с)] и пористости ε задаётся эквивалентное гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки.

Канальное течение представляется как течение в ортотропной пористой среде. Поэтому значения коэффициентов α и β для направлений, где нет течения (т.е. в направлении стенок канала), берутся на 5-6 порядков выше, чем в направлении течения. Такое задание условий понимается программой как течение в одном направлении.

В нашем случае рассматривается ламинарное течение в круглом канале, поэтому коэффициент гидравлического сопротивления имеет вид [5]:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (7)$$

В уравнении (1) константы $C_1 = 64$; $C_2 = 0$; $m = -1$.

$$\alpha = \frac{64 P \rho \text{Re}^{-1}}{2 \varepsilon^3 A}; \beta = 0. \quad (8)$$

В программе проведён расчет для двух жидкостей, существенно различающихся по вязкости: воды и масла. Параметры используемых жидкостей, представлены в табл. 2.

Средняя скорость прохождения жидкости через фильтровальную перегородку равняется $v' = 7,277 \cdot 10^{-3}$ м/с.

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$\text{Re} = \rho v' D / \mu.$$

$$\text{Re}_{\text{вод}} = 1,085 \cdot 10^1 - \text{для воды.}$$

$$\text{Re}_{\text{масл}} = 8,835 \cdot 10^{-4} - \text{для масла.}$$

Таким образом, имеет место ламинарный режим течения.

Коэффициент α для воды:

$$\alpha = 3,073 \cdot 10^8 \text{ кг/м}^4.$$

Коэффициент α для масла:

$$\alpha = 1,555 \cdot 10^{12} \text{ кг/м}^4.$$

Рассчитанные значения коэффициентов α , β и пористость ε подставляются в соответствующее окно программы.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

В гидродинамическом вибрационном фильтре реализуются три механизма очистки жидкости – фильтрование через пористый материал,

Таблица 2. Характеристики очищаемой среды

Параметр	Вода	Масло минеральное
Плотность, кг/м ³	998,9	900,0
Вязкость динамическая, Па·с	1,01·10 ⁻³	1,53·10 ⁻¹

очистка за счет действия центробежных сил и гидродинамического смыва. На данном этапе работы последний механизм не моделировался, но планируется его включение в расчет с помощью написания отдельной подпрограмм, так как непосредственно сама программа “STAR-CD” этот механизм не может учесть. Кроме того, фильтровальная перегородка, заданная как пористая среда с эквивалентным гидравлическим сопротивлением, для частиц не является преградой – все частицы проходят сквозь неё. Кроме того, фильтровальная перегородка, заданная как пористая среда с эквивалентным гидравлическим сопротивлением, для частиц не является преградой. Поэтому расчет показывает, что если частица попадает на фильтровальную перегородку, она проходит сквозь неё. Однако очевидно, если диаметр частицы больше диаметра отверстий в пористом материале, она не пройдет через него, а задержится на его поверхности или в объеме пористой перегородки. На последующих этапах работы над программой предполагается устранение этой неточности, т.е. разработка дополнительных подпрограмм, описывающих структуру пористой перегородки, гидродинамический смыв, а также продольную вибрацию фильтровального элемента, т.е. моделирование действия всех механизмов, имеющих место при работе

фильтра.

На данном этапе моделировались два случая – при неподвижной и вращающейся перегородке.

Оценка эффективности отделения частиц осуществлялась по соотношению:

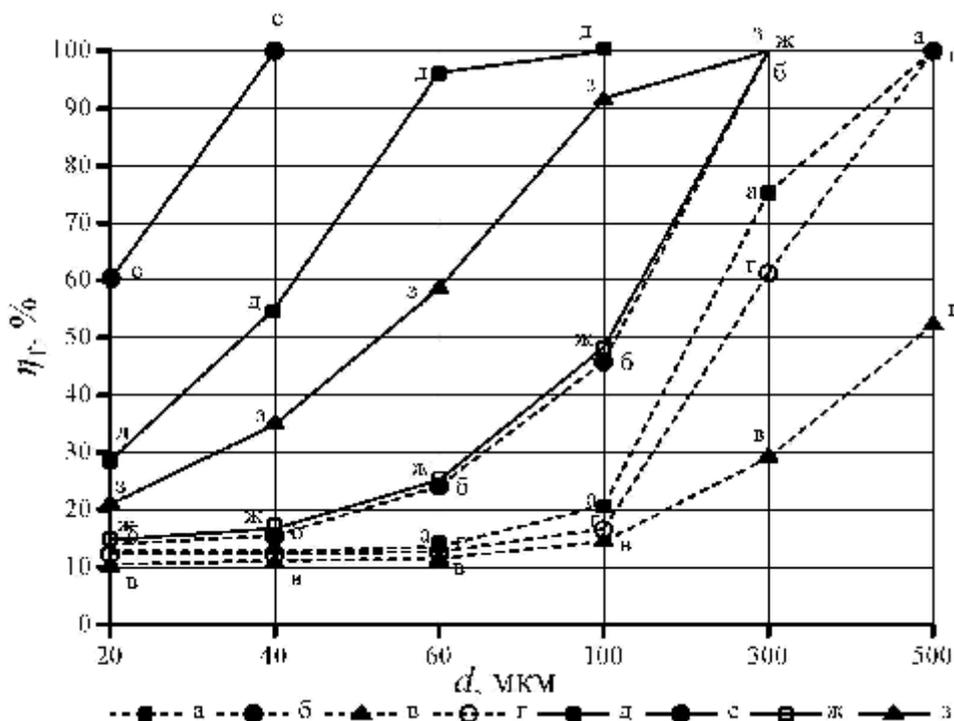
$$\eta_f = \frac{N_f}{N} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где η_f – показывает, сколько частиц вышло из фильтра не попав на фильтровальную перегородку в %; N_f – количество частиц, не попавших на фильтровальную перегородку; N – общее количество частиц, введенных в фильтр.

Результаты предварительных расчетов фильтрации ньютоновских жидкостей

Для каждой из двух сильно отличающихся по вязкости жидкостей варьировались частоты вращения фильтровальной перегородки f , диаметр d и плотности частиц ρ_p . По результатам расчета построен график зависимости величины η_f от диаметра частиц и частоты вращения фильтровальной перегородки (рис. 2).

Как видно из рис. 2, существенное влияние на величину η_f оказывает вязкость жидкости. Так, при частоте вращения $f = 5$ Гц (300 оборотов в минуту) в воде все частицы диаметром



Масло: а – $f = 10$ Гц, $\rho_p = 2500$ кг/м³; б – $f = 10$ Гц, $\rho_p = 7800$ кг/м³; в – $f = 5$ Гц, $\rho_p = 2500$ кг/м³; г – $f = 5$ Гц, $\rho_p = 7800$ кг/м³;

Вода: д – $f = 5$ Гц, $\rho_p = 2500$ кг/м³; е – $f = 5$ Гц, $\rho_p = 7800$ кг/м³; ж – $f = 1,67$ Гц, $\rho_p = 2500$ кг/м³; з – $f = 1,67$ Гц, $\rho_p = 7800$ кг/м³

Рис. 2. Зависимость величины η_f от диаметра частиц d и частоты f вращения фильтровальной перегородки

больше 40 мкм и плотностью $\rho_p = 7800 \text{ кг/м}^3$ отделяются за счет центробежных сил и не попадают на фильтровальную перегородку (зависимость ϵ рис. 2). В масле же при тех же режимных параметрах отделяются только 12,5 % частиц (зависимость γ рис. 2). Кроме того, вид кривых на воде в исследуемом диапазоне размеров частиц имеет практически плавно возрастающий характер. Для масла же в диапазоне 20 – 60 мкм значение исследуемого параметра изменяется незначительно и составляет 10,5 – 13,8 % (зависимости α , β , γ рис. 2).

На рис. 2 не показаны зависимости, полученные для воды при $f = 10 \text{ Гц}$ (600 оборотов в минуту), так как в исследуемом диапазоне диаметров частиц d (от 20 до 500 мкм) значение параметра $\eta_f = 100\%$.

Таким образом, на основе полученных расчетных зависимостей можно прогнозировать оптимальный режим работы фильтра при известных характеристиках очищаемой жидкости, плотности и дисперсно-фракционного состава частиц загрязнения. Для маловязких жидкостей, сравнимых с вязкостью воды, нет необходимости использовать большую частоту вращения фильтровальной перегородки – даже величина $f = 5 \text{ Гц}$ дает хороший результат по очистке частиц размером до 20 мкм, а более мелкие частицы будут задерживаться фильтровальной перегородкой. Для высоковязких жидкостей, таких как

масла, необходимо выбирать режимы с большей частотой вращения, не менее 10 Гц.

На рис. 4 представлен график зависимости тонкости очистки от вязкости очищаемой жидкости. Кривые построены для монодисперсных загрязнений при различных диаметрах частиц, частоте вращения фильтровальной перегородки $f = 5 \text{ Гц}$, плотности частиц $\rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$.

Результаты предварительных расчетов фильтрации неньютоновских жидкостей

Проведен расчет гидродинамических характеристик неньютоновской жидкости для параметров, указанных в табл. 1, при частоте вращения фильтровальной перегородки 5 Гц. Динамическая вязкость жидкости, соответствующая индексу течения $n = 1$, составляет 0,153 Па·с. Плотность жидкости 900 кг/м³. Варьировалась величина индекса течения.

В основу расчета гидравлических характеристик течения неньютоновской жидкости положена степенная зависимость Оствальда де Вилля. Для степенной жидкости эффективная вязкость μ определяется следующим соотношением:

$$\mu = kj^{(n-1)/n}, \quad (10)$$

где μ – эффективная вязкость, Па·с; k – коэффициент консистенции, Па·с^{(2n-1)/n}; j – скорость сдвига, с⁻¹; n – индекс течения, характеризующий

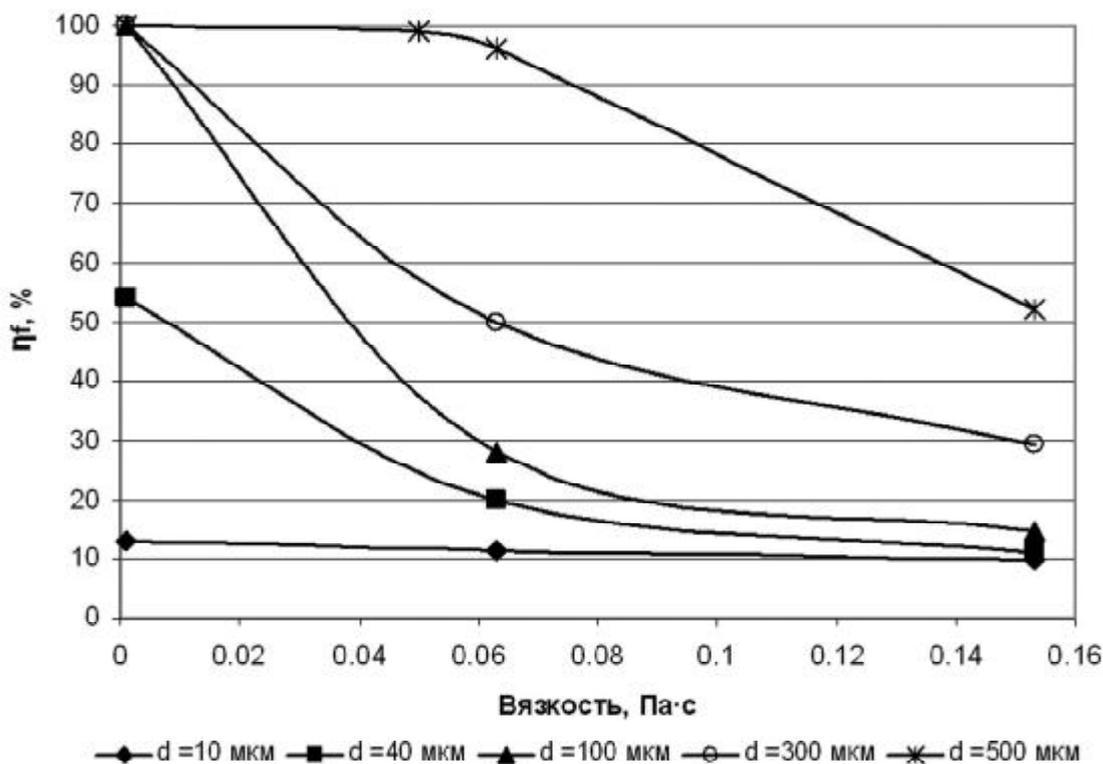


Рис. 3. График зависимости величины η_f от вязкости очищаемой жидкости для разных диаметров частиц d плотностью $\rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$ при $f = 5 \text{ Гц}$

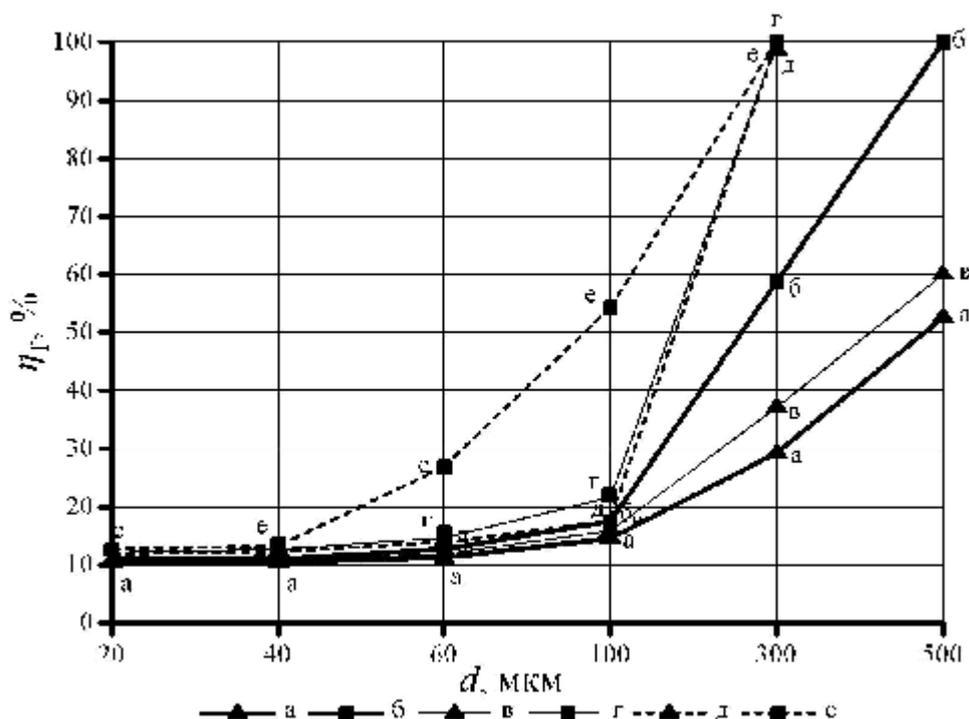


Рис. 4. Зависимость величины η_f от диаметра частиц d и индекса течения n при частоте вращения фильтровальной перегородки 5 Гц
 а – $n = 1, \rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$; б – $n = 1, \rho_p = 7800 \text{ кг/м}^3$; в – $n = 0,8, \rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$;
 г – $n = 0,8, \rho_p = 7800 \text{ кг/м}^3$; д – $n = 0,4, \rho_p = 2500 \text{ кг/м}^3$; е – $n = 0,4, \rho_p = 7800 \text{ кг/м}^3$

темп разрушения структуры и степень отклонения от ньютоновского течения.

Исследование проводилось для псевдопластичной жидкости ($n < 1$) [6].

По результатам расчета построен график зависимости величины η_f от диаметра d и плотности частиц ρ_p , и величины индекса n . Согласно рис. 4, на величину η_f существенное влияние оказывает индекс течения n . При определенном размере частиц загрязнения величина η_f больше при меньшем значении n . Так для частиц плотностью 7800 кг/м^3 и диаметром 60 мкм при $n = 0,4$ сепарируются за счет вращения 27 % всех частиц, а при $n = 1,0$ только 11,5 % всех частиц. Такое поведение кривых объясняется тем, что величина η_f зависит от вязкости жидкости, согласно рис. 3. При меньшем значении индекса течения n происходит более быстрое разрушение структуры жидкости и снижение ее вязкости, что приводит к повышению эффективности сепарации твердой фазы η_f .

Это позволяет сделать вывод о том, что применение гидродинамической фильтрации позволит значительно улучшить и упростить очистку реологически сложных сред, которая связана со значительными проблемами из-за быстрого снижения пропускной способности фильтровальной

перегородки. Можно с очевидностью предположить, что введение вибрации фильтровальной перегородки будет являться дополнительным фактором, улучшающим отделение твердой фазы от высоковязкой неньютоновской жидкости за счет снижения ее вязкости, устранения облитерационных процессов в пористой структуре, разрушения осадка, образующегося на перегородке.

ВЫВОДЫ

Показана возможность математического моделирования с использованием программного комплекса “STAR-CD” при разработке оптимальной с точки зрения гидродинамики и эффективности очистки конструкции гидродинамического вибрационного фильтра, что сокращает затраты на экспериментальную отработку опытного образца.

Предварительные расчеты показали, что одним из основных параметров, влияющим на процесс очистки в гидродинамическом фильтре является вязкость жидкости. Увеличение вязкости жидкости ведет к уменьшению эффективности очистки. Эффективность очистки зависит также, но в меньшей степени, от плотности частиц и частоты вращения фильтровальной перегородки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девисилов В.А., Мягков И.А. Мобильная установка для восстановления отработанных масел // Безопасность в техносфере. 2007. № 5. С. 36-46.
2. Девисилов В.А., Мягков И.А. Гидродинамическое фильтрование в системе очистки и восстановления отработанных моторных масел // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Том.1. 2005. С. 220-226.
3. Девисилов В.А., Мягков И.А. Гидродинамические вибрационные фильтры для регенерации отработанных масел и нефтепродуктов // Экология и промышленность России. 2005. июль. С. 4-7.
4. Девисилов В.А., Мягков И.А. Гидродинамическое вибрационное фильтрование и конструкции фильтров // Безопасность жизнедеятельности. 2004. № 7. С. 37-47.
5. Идельчик Е.И. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
6. Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. М.: Мир, 1964. 216 с.

RESEARCH OF BEHAVIOR OF PARTICLES IN THE HYDRODYNAMIC FILTER ON THE BASIS OF NUMERICAL CALCULATIONS

© 2010 V.A. Devisilov, E.Ju. Sharay

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Moscow

In the article modeling processes of work of the hydrodynamic vibrating filter by means of a program complex for hydromechanics calculations for Newtonian and non-Newtonian media is considered. Preliminary settlement results which have shown perspective of the offered scheme of clearing are presented. The computer simulation allows to define the optimum parameters of regimes and to minimize volume of experimental researches of the filter.

Keywords: clearing of a fluid, filtering, the hydrodynamic filter, computer simulation, a program complex, non-Newtonian fluid.

Vladimir Devisilov, Candidate of Technical Science, Associate Professor of Department "Ecology and Industrial Safety".
E-mail: devisil@mail.ru
Elena Sharay, Postgraduate of Department "Ecology and Industrial Safety". E-mail: elena.sharai@yandex.ru