УДК 66.067 + 628.33 + 532.546 + 51-74

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВИБРАЦИОННОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРА

© 2012 В. А. Девисилов, И.А. Мягков, Е. Ю. Шарай

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

Поступила в редакцию 06.10.2012.

Разработана математическая модель течения неньютоновской жидкости в гидродинамическом фильтре при вращающейся фильтровальной перегородке. Численным методом решена система уравнений реодинамики, описывающая течение реологически сложной среды в гидродинамическом фильтре. Рассчитаны поля скоростей и эффективной вязкости неньютоновской жидкости. Исследовано влияние реологических свойств жидкости на гидродинамику течения. Разработан и создан опытный образец фильтра.

Ключевые слова: гидродинамика, фильтрование, фильтр, неньютоновская жидкость, очистка жидкости.

1. ВВЕДЕНИЕ

В химической, нефтехимической, текстильной и пищевой промышленности остро стоит проблема очистки высоковязких жидкостей от механических примесей. Во многих случаях очищаемая жидкая дисперсная среда является неньютоновской жидкостью, эффективная вязкость которой зависит от интенсивности скоростей деформации. Особенностями фильтрования неньютоновской жидкости являются быстрое забивание пор твердыми частицами, зарастание пор вследствие облитерационных процессов, приводящее к снижению пропускной способности и ухудшению эксплуатационных свойств фильтрующего материала, что требует его частой замены. Высокая вязкость дисперсной среды приводит к необходимости создания большого перепада давления на фильтровальной перегородке (ФП). Для решения указанных проблем целесообразно использовать аппараты комбинированного действия, обеспечивающие высокую эффективность сепарационных процессов. Среди них можно выделить гидродинамический вибрационный фильтр (ГДВФ), позволяющий существенно сократить энергозатраты по сравнению с традиционным фильтрованием или аппаратами центробежного действия. ГДВФ отличается относительно простой конструкцией, надежностью и обеспечивает высокую степень очистки жидкости от твердых частиц при повышенном ресурсе работы [1]. Принцип гидродинамического фильтрования заключается в том,

Девисилов Владимир Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: devisil@mail.ru Мягков Игорь Альбертович, ассистент. E-mail: i.myagkov@bk.ru Шарай Елена Юрьевна, аспирант. E-mail: elena.sharai@yandex.ru что жидкость пропускают через вращающуюся и вибрирующую ФП, при этом часть очищаемого потока перепускается вдоль фильтровальной перегородки, тем самым обеспечивается постоянная саморегенерация фильтрующей поверхности и появляется возможность сепарации твердой фазы за счет центробежных сил [2].

В основу принципа гидродинамического вибрационного фильтрования положена теория движения частиц жидкости и загрязнений вблизи вращающейся и вибрирующей проницаемой фильтровальной поверхности. Схема действующих сил при гидродинамическом вибрационном фильтровании показана на рис. 1.

Таким образом, очистка жидкости в аппаратах на основе гидродинамического вибрационного фильтрования осуществляется за счёт сочетания следующих процессов:

• фильтрования через проницаемую структуру;

• центробежной сепарации;

 вибрационного разрушения осадка, образующегося на ФП;

 гидродинамического смыва осадка и удаления загрязнений из ГВФ.

Ко многим многофазным гетерогенным средам в широком диапазоне скоростей сдвига применимо реологическое уравнение состояния неньютоновской жидкости, записанное в виде степенной зависимости Оствальда–де Виля [3]. В работах [4, 5] с использованием компьютерного моделирования в программных комплексах Ansys CFX и Star–CD показано, что гидродинамическое фильтрование неньютоновской жидкости приводит к снижению нагрузки на фильтровальный материал, увеличению времени до регенерации фильтра, снижению перепада давления на ФП при её вибрации. Однако к настоящему времени отсутствует математическое описание гидродинамики процесса, происходя-



Рис. 1. Схема действующих сил при гидродинамическом вибрационном фильтровании

щего в гидродинамическом фильтре. Существует ограниченное количество работ, посвященных описанию отдельных механизмов, реализуемых в гидродинамическом фильтре. Большинство из них касается непосредственно фильтрования без учета влияния всех механизмов очистки или при других схемах движения потока жидкости [6, 7]. Следовательно, разработка аналитического аппарата, описывающего гидродинамические процессы в гидродинамическом фильтре для неньютоновской жидкости, подчиненной зависимости Оствальда-де Виля, является актуальной и практически важной задачей. Математическое описание гидродинамических процессов позволит подбирать основные режимные параметры фильтра для каждой жидкости при известных ее реологических характеристиках и параметрах загрязнений.

Данная работа посвящена созданию математической модели течения неньютоновской жидкости в гидродинамическом фильтре при вращающейся ФП с использованием уравнений Навье–Стокса.

2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассматриваемая схема течения жидкости в гидродинамическом фильтре показана на рис. 2. Аппарат состоит из конического корпуса 2, в котором расположена цилиндрическая ФП 1. В кольцевой зазор сверху подается суспензия. Под действием перепада давления очищаемая жидкость фильтруется через перегородку 1, обладая окружной v_{φ} , радиальной v_{r} и продольной v_{z} составляющими скорости. Часть жидкости перепускается вдоль перегородки и выходит через

нижний кольцевой зазор. Наибольший интерес представляет определение гидродинамических характеристик потока в кольцевом зазоре, поэтому далее рассматривается только эта область.

Математическая модель процесса течения неньютоновской жидкости в конфузорной области фильтра представляет собой совокупность уравнений Навье–Стокса в компонентах тензора напряжений, уравнения неразрывности, реологического уравнения среды, условия равномерности расхода жидкости через ФП, граничных условий, записанных в цилиндрической системе координат.

Полагаем, что: распределение скоростей не зависит от угловой координаты, режим течения



Рис. 2. Схема течения в гидродинамическом фильтре: 1 – фильтровальная перегородка; 2 – корпус фильтра

ламинарный, жидкость несжимаема, ФП представлена эквивалентным гидравлическим сопротивлением.

К многофазным высоковязким средам применимо уравнение состояния неньютоновской жидкости, которое записывают в виде степенной зависимости Оствальда–де Виля:

 $\tau = k\gamma^n$,

или

$$\tau = k |\gamma|^{n-1} \gamma \,. \tag{1}$$

Эффективная вязкость неньютоновской жидкости определяется как

$$\mu = k |\gamma|^{n-1}.$$
 (2)

В случае сложного деформирования степенной закон Оствальда–де Виля (1) представляется в виде:

$$\tau_{ij} = kA^{n-1}\gamma_{ij} \,. \tag{3}$$

В цилиндрической системе координат интенсивность тензора скоростей деформаций *А* записывается в виде

$$A = \sqrt{2\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2 + 2\left(\frac{v_r}{r}\right)^2 + 2\left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)^2}.$$
(4)

Для рассматриваемого течения присутствуют следующие составляющие скорости, являющиеся функциями двух переменных:

$$v_{\varphi} = v_{\varphi}(r, z),$$

$$v_{r} = v_{r}(r, z),$$

$$v_{z} = v_{z}(r, z).$$

Тогда формула (3) примет следующий вид:

$$\tau_{ij} = k \left(\sqrt{2 \left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2 + 2 \left(\frac{v_r}{r}\right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \frac{v_\varphi}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)^2 \right)^{n-1} \gamma_{ij}$$
(5)

Уравнения Навье–Стокса и неразрывности в компонентах тензора деформации для рассматриваемого случая имеют вид:

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_{\varphi}^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\varphi\varphi}}{r} \right),$$
(6)

$$v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{v_{\varphi}^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} \right),$$
(7)

$$v_r \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial r} + \frac{v_r v_{\varphi}}{r} + v_z \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial z} + 2\frac{\tau_{r\varphi}}{r} \right),$$
(8)

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \qquad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \tau_{rr} &= kA^{n-1} \frac{\partial v_r}{\partial r} ,\\ \tau_{\varphi\varphi} &= kA^{n-1} \left(\frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial \varphi} \right),\\ \tau_{zz} &= kA^{n-1} \frac{\partial v_z}{\partial z} , \end{aligned}$$
(10)

$$\tau_{rz} = kA^{n-1} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right),$$

$$\begin{split} \tau_{r\varphi} &= kA^{n-1} \frac{1}{2} \bigg(\frac{\partial v_{\varphi}}{\partial r} - \frac{v_{\varphi}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \varphi} \bigg), \\ \tau_{\varphi z} &= kA^{n-1} \frac{1}{2} \bigg(\frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + \frac{\partial v_{\varphi}}{\partial z} \bigg). \end{split}$$

Подставив в систему уравнений (6)–(9) значения компонентов тензора напряжений au_{ij} , определенных согласно соотношениям (10), получим систему уравнений гидродинамики неньютоновской псевдопластической жидкости. Уравнения в конечном виде не приводятся в силу их громоздкой записи.

Система уравнений (6)–(9) имеет следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} v_z &= 0 & \text{при } r = r_f, \ r = R - z \text{tg}(\alpha); \\ v_r &= 0 & \text{при } r = R - z \text{tg}(\alpha); \\ v_r &= v_f & \text{при } r = r_f; \\ v_\varphi &= 0 & \text{при } r = R - z \text{tg}(\alpha); \\ v_\varphi &= r_f \omega & \text{при } r = r_f; \\ p &= p_R(r) & \text{при } z = 0; \\ p &= p_L(r) & \text{при } z = L. \end{aligned}$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Для нахождения гидродинамических характеристик потока необходимо численно решить систему дифференциальных уравнений в частных производных (6)–(9) при заданных граничных условиях (11) для соответствующей геометрии корпуса фильтра. Решение системы дифференциальных уравнений реализовано на ПК с помощью программного комплекса Maple как последовательная итерационная процедура. Численное решение выполнялось для неньютоновской псевдопластичной жидкости в интервале показателя степени n от 0.6 до 1.0 при угле конусности α =11° и соотношениях геометрических размеров фильтра R/L = 0.45, $r_f/L = 0.20$ (рис. 1). В процессе расчета определялись давление p, окружная v_{φ} , радиальная v_r и продольная v_z скорости потока в расчетной области.

На рис. За, Зб и Зв приведены зависимости безразмерных окружной \overline{v}_{φ} , радиальной \overline{v}_{r} и продольной \overline{v}_{z} составляющих скорости течения неньютоновской жидкости от безразмерной радиальной координаты \overline{r} для различных значений показателя степени n при z/L = 0.75. Соотношения между размерными и безразмерными величинами следующие:

$$\overline{v}_{\varphi} = \frac{v_{\varphi}}{\omega r_f} ; \ \overline{v}_r = \frac{v_r}{v_0} ; \ \overline{v}_z = \frac{v_z}{v_0} ; \ \overline{r} = \frac{r}{r_f} .$$

Установлено, что окружная скорость ν_{φ} практически не зависит от индекса течения *n* (рис. 3а). Радиальная и продольная составляющие скорости уменьшаются с увеличением индекса течения *n* (рис. 36, 3в).

На рис. 4 (кривые 1–3) приведены зависимости безразмерной эффективной вязкости μ неньютоновской жидкости от безразмерной радиальной координаты \bar{r} для различных значений показателя степени при z/L = 0.75. Безразмерная эффективная вязкость определяется как:

$$\mu = \frac{\mu}{\mu_{n=1}}$$

Из анализа полученных расчетных зависимостей рис. 4, следует, что при уменьшении показателя степени *n* неньютоновской псевдопластической жидкости эффективная вязкость уменьшается.

Для определения адекватности полученных результатов проведен расчет в программном



Рис. 4. Зависимости безразмерной эффективной вязкости μ неньютоновской жидкости от радиальной координаты для различных показателей степени *n* (1 – 0.6; 2 – 0.8; 3 – 1.0) при *z/L* = 0.75: линии – расчет по уравнениям; маркеры – расчет в Ansys CFX



Рис. 3. Зависимости безразмерных составляющих скорости течения неньютоновской жидкости от радиальной координаты \overline{r} для различных показателей степени n (1 - 0.6; 2 - 0.8; 3 - 1.0) при z/L = 0.75: a – окружная составляющая \overline{v}_{φ} ; δ – радиальная составляющая \overline{v}_{r} ;

 β – продольная составляющая \overline{v}_z

комплексе Ansys CFX для рассматриваемой модели при аналогичных граничных условиях. На рис. 4 квадратными маркерами показаны значения эффективной вязкости при n = 0.8, определенные в модуле Ansys CFX. Как видно из рисунка, получено хорошее согласование результатов при решении двумя методами.

При решении системы уравнений (6)-(9)





варьировался расход жидкости через фильтр, при этом обобщенное число Рейнольдса Re_n , определенное во входном сечении при z = 0, изменялось от 2.8 до 10.5. На рис. 5 представлены зависимости окружной v_{φ} , радиальной v_r и продольной v_z составляющих скорости течения неньютоновской жидкости от радиальной координаты *r* в безразмерных осях при z/L = 0.75 (кривые 1-3) и z/L = 0.50 (кривые 4-6) для $\text{Re}_n = 2.8$ (кривые 1, 4), $\text{Re}_n = 6.5$ (кривые 2, 5), $\text{Re}_n = 10.5$ (кривые 3, 6).

Установлено, что максимум радиальной (рис. 5б) и продольной (рис. 5в) составляющей скорости смещается в сторону ФП, что объясняется отсосом жидкости через проницаемую перегородку. С увеличением критерия Re_n кривая окружной составляющей скорости (рис. 5а) приобретает более пологий вид.

На рис. 6 показаны графики безразмерной эффективной вязкости для критерия Рейнольдса Re_n = 2.8 (кривые 1, 4), Re_n = 6.5 (кривые 2, 5), Re_n = 10.5 (кривые 3, 6) при z/L = 0.75 (кривые 1– 3) и z/L = 0.50 (кривые 4–6). Из анализа полученных кривых следует, что с увеличением обобщенного числа Рейнольдса эффективная вязкость увеличивается в кольцевой области фильтра, но при этом вблизи ФП для всех кривых ее значение одинаково, что объясняется равенством радиальной скорости для всех рассматриваемых случаев при $\bar{r} = 1$.

Проведен расчет эффективной вязкости неньютоновской жидкости при различных угловых скоростях вращения ω ФП. На рис. 7 представлен график зависимости безразмерной вязкости μ от безразмерной радиальной координаты r для угловых скоростей вращения



Рис. 6. Зависимости безразмерной эффективной вязкости неньютоновской жидкости от радиальной координаты для различных чисел Рейнольдса Re_n при *z/L* = 0.75 (*1* – 8.5; *2* – 22.4; *3* – 30.6) и при *z/L* = 0.50 (*4* – 8.5; *5* – 22.4; *6* – 30.6)





ω ФП 12 рад/с (рис. 6, кривая 1), 24 рад/с (рис. 7, кривая 2) и при неподвижной ФП (рис. 7, кривая 3) для индекса течения *n* = 0.8 и *z/L* = 0.50.

Кривая 3 рис. 7 имеет экстремум (максимум), соответствующий максимальному значению скорости в данном сечении кольцевой области, за счет увеличения эффективной вязкости в зонах с малыми скоростями сдвига.

При проведении многочисленных расчетов установлено, что с увеличением скорости вращения ФП эффективная вязкость неньютоновской псевдопластической жидкости уменьшается. Это объясняется тем, что наличие окружной составляющей скорости потока вызывает разрушение структуры жидкости и, соответственно, снижение ее вязкости. Таким образом, вращение ФП является фактором, улучшающим отделение твердой фазы из высоковязких неньютоновских жидкостей за счет снижения её вязкости.

На основе проведенных расчетов окружной, радиальной и продольной составляющих скоростей жидкости по уравнениям (6)–(9) можно получить линии тока в кольцевом зазоре между корпусом фильтра и фильтровальной перегородкой. На рис. 8 показаны линии тока при обобщенном числе Рейнольдса $\text{Re}_n = 2.8$, определенном во входном сечении фильтра при n = 0.8 и $\omega = 12$ рад/с, для описанной выше геометрии. В программном комплексе Ansys CFX получены траектории твердых частиц при аналогичных граничных условиях. На рис. 7 изображены линия тока (поз. 3), построенные на основе расчета скоростей по уравнениям (6)–(9) и промежуточные положения частиц (поз. 4) диаметром 8 мкм при $\rho/\rho_{\rm q} = 0.4$, полученные в программном комплексе Ansys CFX, которые хорошо накладываются на линии тока, полученные из численного решения уравнений (6)–(9). Анализ многочисленных расчетов показал возможность считать с приемлемой достоверностью, что траектории движения частиц размером до 20 мкм совпадают с линией тока жидкой фазы.

Полученные линии тока можно использовать для определения траекторий твердых частиц и полей концентрации в сужающемся кольцевом канале фильтра в предположении, что частицы движутся по линиям тока жидкой фазы суспензии при следующих допущениях: концентрация частиц мала, что позволяет пренебречь их влиянием на движение жидкой фазы; твердые частицы в процессе движения не взаимодействуют между собой и со стенками корпуса; частицы движутся без проскальзывания; отсутствует дрейф частиц; действие силы тяжести пренебрежимо мало. Данное предположение верно при установившемся течении и для малых диаметров частиц.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментальных исследований создан стенд на базе модельного ГДВФ. Основные конструктивные узлы ЭС, методика измерений, результаты экспериментов детально представлены в [1].





1 — фильтровальная перегородка; 2 — корпус фильтра; 3 — линии тока неньютоновской жидкости при n = 0.8, полученные при численном решении системы уравнений (13)–(15); 4 — траектории частиц, полученные при расчете в Ansys CFX

Пневмогидравлическая схема ЭС представлена на рис. 9. Согласно схеме очищаемая жидкость из исходной емкости 22 шестеренчатым насосом 11 подается в систему ГВФ 8, где очищается от механических примесей. Вращение ФП ГВФ обеспечивается электродвигателем 21 через клиноременную передачу; вибрация ФП – электродвигателем 6 с кулисным механизмом 7. Все электродвигатели снабжены датчиками числа оборотов.

Работа ЭС возможна как по замкнутому контуру, так и по разомкнутому. При работе по замкнутому контуру очищенная в ГВФ 8 жидкость из приемной емкости 28 шестеренчатым насосом 23 подается в исходную емкость 22 для дальнейшей рециркуляции. В результате многократной рециркуляции через ГВФ 8 очищаемой жидкости механические примеси откладываются в емкости 29 с концентратом загрязнений, а в исходной емкости 22 образуется очищенная жидкость. Количество проходов жидкости при рециркуляции через ГВФ определяется требуемой концентрацией механических примесей в очищенной жидкости. Необходимо также отметить, что в системе ЭС установлен волокнистый фильтр 26, который позволяет при необходимости уже сразу после первого прохода удалить механические примеси, которые остались после ГВФ 8. Задание одного из двух вышесказанных способов очистки достигается переключением трехходового клапана 27. При работе по разомкнутому контуру очищенная в ГВФ 8 жидкость выводится из системы через трехходовой клапан 24.

ЭС позволяет проводить исследование процессов фильтрации и фильтрования при различных режимах работы ГВФ: ФП неподвижна; вращается; вибрирует; вращается и вибрирует. Работа модельного ГВФ в указанных режимах обеспечивается модулем управления ЭС, которым предусмотрено варьирование такими параметрами, как расход жидкости, частота вращения ФП, частота и амплитуда вибрации ФП. В эксперименте также могут быть использованы различные суспензии, отличающиеся физико-химическими свойствами жидкости и присутствующих частиц загрязнений.

Результаты экспериментального исследования гидродинамического вибрационного фильтра с хорошей степенью совпадения (15-20 %) подтвердили спрогнозированные теоретическими расчетами и машинным моделированием сепарационные и гидравлические параметры



Рис. 9. Пневмогидравлическая схема экспериментального стенда:

1 – манометр образцовый; 2 – клапан трехходовой; 3 – расходомер индукционный; 4 – клапан обратный; 5 – насос гидроструйный; 6 – генератор вибрации ГДВФ (электродвигатель); 7 – механизм кулисный; 8 – ГДВФ; 9 – манометр образцовый; 10 – электродвигатель шестеренчатого насоса; 11 – насос шестеренчатый; 12 – расходомер турбинный; 13 – клапан балансировочный; 14 – расходомер переменного перепада давления; 15 – клапан балансировочный; 19 – компрессор; 20 – емкость с раствором загрязнений; 21 – привод вращения ГДВФ (электродвигатель); 22 – емкость исходная; 23 – насос шестеренчатый; 24 – клапан трехходовой; 25 – клапан обратный; 26 – фильтр волокнистый; 27 – клапан трехходовой; 28 – емкость приемная; 29 – емкость с концентратом загрязнений

фильтра, что показало его эффективность и перспективность реализации способа гидродинамического вибрационного фильтрования.

Были проведены экспериментальные исследования по определению концентраций частиц на выходе из кольцевой области на модельных неньютоновских средах, представляющих собой водные растворы сополимера акриловой кислоты и аллиловых эфиров пентаэритрита (САКАПа). Отличие расчетных и экспериментальных значений по количеству частиц с медианным диаметром 15 мкм и среднеквадратическим отклонением 0.6 при $\rho/\rho_q = 0.4$, присутствующих на выходе из фильтра в перепускаемом потоке, составляло не более 15 %. Эти исследования подтверждают основные выводы, сделанные в работе.

Некоторые более детальные результаты представлены в работе [8], в расширенном варианте опытные данные будут опубликованы позднее.

5. РАЗРАБОТКА ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ФИЛЬТРА

Результаты теоретических исследований, аналитических расчетов и экспериментов позволили выбрать оптимальную конструкцию фильтра. Информация о методике расчета конструктивных и режимных параметров носит характер "ноу-хау" и может быть предоставлена заинтересованным организациям на договорных основах. На рис. 10, 11 показана конструкция опытного образца ГДВФ с системами привода, подачи жидкости и узлом генерирования вибрации.

Опытный образец фильтра снабжен разработанной авторами компактной системой управления, обеспечивающей изменения подачи жидкости, регулирования частоты вращения и вибрации фильтровальной перегородки. Возможно отключение генератора колебаний и автоматическое переключение (при необхо-



Рис. 10. Опытный образец ГДВФ:

1 – корпус сварной; 2 – перегородка фильтровальная из ПСМ; 3 – штуцер ФП зажимной; 4 – патрубок для отвода концентрата; 5 – штуцер зажимной (толкатель); 6 – кольцо разбрызгивающее с лопатками; 7 – вал торсионный; 8 – стакан корпусной; 9 – крышка корпусная; 10 – винт установочный; 11 – патрубок выходной; 12 – гайка шлицевая регулировочная с лапчатой шайбой; 13 – кольцо вибрационное; 14 – втулка скольжения биметаллическая; 15 – патрубок входной; 16 – втулка скольжения биметаллическая; 17 – крышка корпусная; 18 – винт установочный; 19 – узел генерирования колебаний в ГДВФ; 20 – шпилька регулировочная; 21 – манжета армированная; 22 – гайка корончатая регулировочная со шплинтом; 23 – кольцо опорное; 24 – подшипник шариковый упорный; 25 – гайка шлицевая регулировочная с лапчатой шайбой; 26 – пружина сжатия; 27 – гайка корончатая регулировочная со шплинтом; 28 – шпилька направляющая; 29 – выступ (зуб) толкателя; 30 – выступ дорожки вибрационного кольца





1 – струбцина; 2 – столешница; 3 – электродвигатель ГДВФ; 4 – муфта ГДВФ с крестовым элементом; 5 – рама ГДВФ сварная; 6 – генератор колебаний ГДВФ; 7 – ГДВФ; 8 – патрубок ГДВФ для отвода концентрата загрязнений; 9 – патрубок ГДВФ выходной; 10 – трубопровод соединительный; 11 – патрубок насоса входной; 12 – насос; 13 – патрубок ГДВФ входной; 14 – патрубок насоса выходной; 15 – муфта насоса с крестовым элементом; 16 – рама насоса сварная; 17 – электродвигатель насоса; 18 – столешница; 19 – струбцина; 20 – опоры вибрационные для горизонтального монтажа ГДВФ; 21 – опоры вибрационные для вертикального монтажа ГДВФ; 22 – винт установочный для стыкового крепления блоков

димости) фильтра в режим интенсивной регенерации с повышенным числом оборотов и интенсивностью вибрации без приостановки режима фильтрования. Этот режим, как показали испытания, требуется не всегда, а только при высокой степени загрязнения очищаемой жидкости. Как правило, его продолжительность составляет от нескольких единиц до нескольких десятков секунд, а затем фильтр автоматически переходит в нормальный режим работы. Предполагается использование ГДВФ в передвижных установках восстановления кондиционных свойств нефтепродуктов, в частности моторных и трансформаторных масел. Нами разработаны конструкции всех аппаратов установки (ГДВФ, аппарат для удаления легких фракций, дополнительной очистки и, при необходимости, введения присадок). На рис. 12 представлена компоновка установки на автомобиле.



Рис. 12. Компоновка установки по регенерации отработанных масел в кузове автомобиля

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенного численного моделирования исследовано влияние неньютоновских свойств жидкости на гидродинамические процессы течения в гидродинамическом фильтре.

2. Для псевдопластических жидкостей с увеличением аномалии неньютоновских свойств (уменьшением степени *n*) происходит уменьшение максимального значения составляющих скоростей, что объясняется увеличением эффективной вязкости в зонах с малыми скоростями сдвига.

3. Вращение фильтровальной перегородки является фактором, улучшающим отделение твердой фазы из высоковязких неньютоновских жидкостей за счет снижения эффективной вязкости в кольцевом зазоре.

4. Полученные зависимости окружной, радиальной и продольной составляющих скоростей могут использоваться для определения траекторий частиц и полей концентрации в сужающемся кольцевом канале фильтра.

5. Хорошее совпадение результатов экспериментальных исследований эффективности сепарации твердой фазы в гидродинамическом фильтре с расчетными значениями, полученными с использованием уравнений гидродинамики неньютоновских жидкостей, подтверждает их адекватность реальной картине течения и возможность их использования для практических расчетов гидродинамических и сепарационных процессов в гидродинамическом фильтре.

6. Разработана конструкция опытного образца фильтра, готовая к испытаниям в процессе эксплуатации.

Работа выполнена в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 – 2013 годы.

Обозначения

 $A = \sqrt{2\gamma_{ij}\gamma_{ij}}$ – интенсивность тензора скоростей деформаций, с⁻¹;

k – индекс консистентности, Па сⁿ;

L – длина корпуса фильтра, м;

n – степень нелинейности кривой течения (показатель неньютоновского поведения, *n* < 1;

 $p_{\rm R}(r)$ – функция распределения давления в радиальном сечении при z = 0, Па;

 $p_{\rm L}(r)$ — функция распределения давления в радиальном сечении при z = L, Па;

p – давление, Па;

R – радиус конической части фильтра при z = 0, м;

*R*_{еq} – эквивалентный гидравлический радиус входного сечения фильтра, м;

*r*_f – радиус фильтровальной перегородки, м;

 \dot{r} – радиальная цилиндрическая координата, м;

 v_f – средняя скорость фильтрования, м с⁻¹;

 ${\cal V}_0$ – средняя скорость во входном сечении фильтра, м с²
1;

 v_{ϕ} , v_{r} , v_{z} – окружная, радиальная и продольная составляющие скорости в цилиндрической системе координат, м с⁻¹;

 $v_{_{\phi \text{max}}}$ – максимальная окружная составляющая скорости, соответствующая $\text{Re}_n = 10.5$, определенном в сечении при z/L = 0.75;

 v_{min} — минимальная (в силу отрицательного знака) радиальная составляющая скорости, соответствующая Re_n = 10.5, определенном в сечении при *z*/*L* = 0.75;

 $v_{zmax}^{"}$ – максимальная продольная составляющая скорости, соответствующая $\text{Re}_n = 10.5$, определенном в сечении при z/L = 0.75;

г – безразмерная радиальная координата;

 \overline{v}_{arphi} – безразмерная радиальная составляющая скорости;

 \overline{v}_r – безразмерная радиальная составляющая скорости;

 \overline{v}_z – безразмерная радиальная составляющая скорости;

z – продольная цилиндрическая координата, м;

α– угол конусности корпуса фильтра, град;

 γ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформации, с-1;

 $\mu-$ эффективная вязкость неньютоновской жидкости, Па с;

 $\mu_{n=1}$ – вязкость жидкости при n = 1, Па с;

µ – безразмерная эффективная вязкость неньютоновской жидкости;

 ρ – плотность жидкости, кг м⁻³;

 $ho_{\rm y}$ – плотность частиц, кг м⁻³;

 $au_{_{ii}}$ – компоненты тензора напряжений, Па;

 ω – угловая скорость вращения, рад с⁻¹; Re_n = $\rho R_{eq} \gamma_0^{2-n} / k$ – обобщенное число Рейнольдса.

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Девисилов В.А., Мягков И.А.* Мобильная установка для восстановления отработанных масел // Безопасность в техносфере. 2007. № 5. С. 36.
- 2. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Эффективность сепарации взвешенных примесей вращающимся фильтроэлементом // Вестник НТУ "ХПИ". 2011. № 10. С. 3.
- 3. Романков П.Г. Гидродинамические процессы химической технологии // Теорет. основы хим. технологии. 1972. Т. 6. № 6. С. 855.
- Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Моделирование работы гидродинамического фильтра с использованием программного комплекса // Безопасность в техносфере. 2009. № 5. С. 21.
- 5. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Моделирование течения неньютоновской жидкости вблизи вибрирующей фильтровальной перегородки гидродинамического фильтра // Безопасность в техносфере. 2010. № 5. С. 23.
- 6. *Холпанов Л.П., Ибятов Р.И.* Математическое моделирование гидродинамики на проницаемых поверхностях // Теорет. основы хим. технологии. 2003. Т. 37. № 3. С. 227
- 7. Холпанов Л.П., Ибятов Р.И. Математическое моделирование динамики дисперсной фазы // Теорет. основы хим. технологии. 2005. Т. 39. № 2. С. 190.
- Девисилов В.А., Мягков И.А. Экспериментальное исследование гидродинамического вибрационного фильтра // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. № 8. С. 13 -17.

INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC VIBRATIONAL FILTERING AND DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION OF A FILTER

© 2012 V.A. Devisilov, I.A. Myagkov, E.Yu. Sharay

Moscow State Technical University named after N.E. Bauman

Mathematical model of current of non-newton liquid in hydrodynamic filter during rotation of filtering partition have been developed. Using numerical methods system of equations of reodynamics have been decided. The sample of filter have been created.

Key words: hydrodynamics, filtering, filter, non-newton liquid, purification of liquid

Vladimir Devisilov, Candidate of Technics, Associate Professor. E-mail: devisil@mail.ru Igor Myagkov, Assistant. E-mail: i.myagkov@bk.ru Elena Sharay, Postgraduate. E-mail: elena.sharai@yandex.ru