

УДК 621.928.37
DOI: 10.17223/19988605/57/6

В.О. Яблонский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГАЗА ИЗ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ СРЕД В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ В ГИДРОЦИКЛОНЕ

Математическая модель разделения неоднородных жидких систем в поле центробежных сил адаптирована к процессу дегазации вязкопластических жидкостей в цилиндрическом гидроциклоне. Модель учитывает действие сил инерции, Кориолиса и присоединенную массу жидкости. Система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая процесс дегазации, сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений и решена численным методом. На основе разработанной математической модели проанализировано влияние числа пластичности при различных значениях фактора разделения и показателя нелинейности кривой течения на степень извлечения пузырьков газа. Приведено физическое обоснование полученных результатов. Полученные результаты могут использоваться при разработке оборудования для очистки буровых растворов.

Ключевые слова: вязкопластическая жидкость; предел текучести; дегазация; цилиндрический гидроциклон; число пластичности; фактор разделения; показатель нелинейности; индекс консистентности; степень извлечения.

Бурение скважин в нефтедобывающей промышленности сопровождается обогащением промысловочной жидкости воздухом или газом, что приводит к резкому изменению ее плотности, реологических и структурно-механических свойств. При этом ухудшается работа насосов и уменьшается их подача, поэтому своевременная и эффективная дегазация промысловочных жидкостей является важным условием обеспечения нормального процесса бурения.

Основным показателем, на значения которого следует ориентироваться при выборе сепаратора для промысловочных жидкостей, – это остаточный объем газа: чем меньше газа содержится в жидкости, тем лучше справляется сепаратор со своей задачей.

Применяемые в настоящее время гравитационные сепараторы [1] не обеспечивают высокой степени дегазации из-за низкой скорости движения газа, что в сочетании с высокой металлоемкостью и потребностью в значительных производственных площадях делает их применение во многих случаях нерациональным. Поэтому разработка новых конструкций сепараторов и теоретическое изучение процесса дегазации с целью повышения его эффективности является актуальной задачей, представляет научный интерес и направлено на решение важной практической проблемы.

В работах [2, 3] на основе математической модели численно исследован процесс дегазации в гидроциклоне. Показана возможность применения метода гидроциклонирования для удаления воздушной фазы из жидкости, однако полученные результаты применимы лишь для дегазации турбулентного потока ньютоновской жидкости в цилиндрическом гидроциклоне, имеющем невысокую эффективность в процессах дегазации.

В работе [4] рассмотрен процесс дегазации аэрированной жидкости с неньютоновской дисперсионной средой и отмечается, что наиболее перспективным путем интенсификации процессов дегазации аэрированных жидкостей является соединение двух известных факторов – реализации процесса в тонкой пленке и наложения центробежного поля. Разработка методики моделирования и расчета аппаратов для осуществления таких процессов позволит расширить сферу их внедрения в промышленность и представляет значительный теоретический и прикладной интерес.

Как отмечается в [5], наиболее экономичные методы дегазации – механические. Одним из перспективных механических методов является дегазация в центробежном поле, а именно в центрифугах и гидроциклонах. В статье [6] выполнено численное моделирование гидродинамики цилиндрического гидро-

циклона с вязкопластической разделяемой средой. Полученные результаты показали, что одним из аппаратов, позволяющих интенсифицировать процесс дегазации за счет использования центробежного поля в сочетании с пленочным режимом течения, является цилиндрический гидроциклон, обеспечивающий минимальную толщину пленки жидкости и имеющий сравнительно небольшие габаритные размеры.

В связи с этим актуальной задачей является разработка конструкции гидроциклонного сепаратора, использующего интенсификацию процесса выделения пузырьков газа из жидкости в центробежном поле и обеспечивающего пленочный режим течения. Для эффективного использования цилиндрического гидроциклона в процессе дегазации бурового раствора необходимо определить его конструктивные параметры и оптимальные режимы работы при дегазации среды с различными реологическими свойствами.

В настоящей работе математическая модель разделения неоднородных жидких систем в поле центробежных сил [7] адаптирована к процессу дегазации вязкопластических жидкостей в цилиндрическом гидроциклоне с учетом действия на пузырек газа и присоединенную массу жидкости центроостремительной силы Архимеда. Цель работы – моделирование дегазации вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне и выявление влияния пластических свойств среды на эффективность процесса дегазации при различных значениях числа Фруда (фактора разделения) и различных реологических свойствах разделяемой среды.

1. Математическая модель процесса дегазации вязкопластических жидкостей в цилиндрическом гидроциклоне

Гидроциклон (рис. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1, в который через входной патрубок 2, установленный в его верхней части, тангенциально подается исследуемая жидкость, содержащая выделившиеся из нее пузырьки газа. Поступившая в корпус гидроциклона жидкость стекает, образуя вращающуюся пленку 3 толщиной δ , по его стенкам вниз, обладая радиальной V_r , окружной V_φ и осевой V_z составляющими скорости. Пузырьки газа извлекаются из жидкости под действием центроостремительной силы Архимеда на поверхность пленки. Очищенная от пузырьков газа жидкость удаляется через нижний слив гидроциклона 4, установленный на днище 5, а газ – через верхний отводящий патрубок 6.

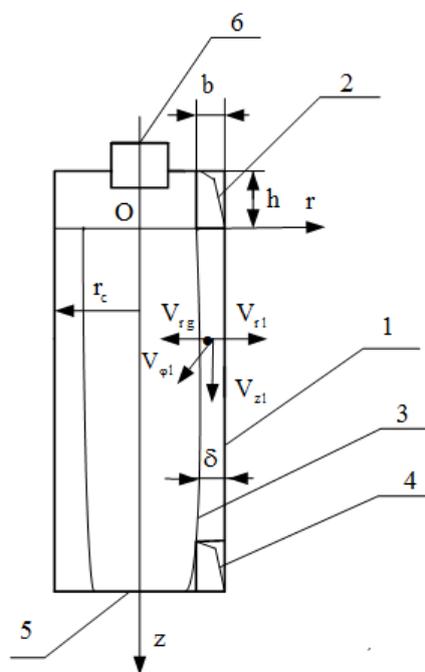


Рис. 1. Схема дегазации жидкости в цилиндрическом гидроциклоне: 1 – корпус гидроциклона; 2 – входной патрубок; 3 – вращающаяся пленка жидкости; 4 – патрубок для отвода жидкой фазы; 5 – днище гидроциклона; 6 – патрубок для отвода газа
 Fig. 1. Scheme of degasation of fluid in cylindrical hydrocyclone: 1 – the case of hydrocyclone; 2 – entering fitting; 3 – rotating film of fluid; 4 – fitting for liquid outlet; 5 – the bottom of hydrocyclone; 6 – fitting for liquid outlet

Эффективность дегазации в гидроциклоне определяется гидродинамическими параметрами предварительно закрученной пленки жидкости, стекающей по стенкам корпуса под действием силы тяжести и давления, создаваемого центробежной силой.

Перерабатываемые в нефтедобывающей промышленности жидкости, в частности буровые растворы, во многих случаях обладают нелинейно-вязкопластическими свойствами. Такие жидкости имеют предел текучести, и их эффективная вязкость уменьшается с увеличением интенсивности скоростей деформаций, что оказывает влияние на гидродинамику аппаратов.

В работе [8] сделано заключение, что к многофазным гетерогенным системам применимо реологическое уравнение состояния неньютоновской жидкости, которое для процессов очистки буровых растворов записывают в виде закона Гершеля–Балкли. Полагаем, что этим законом [9] описываются свойства нелинейно-вязкопластической жидкости:

$$\tau_{ij} = \left(\frac{\tau_0}{A} + kA^{n-1} \right) \gamma_{ij}, \quad (1)$$

где A – интенсивность скоростей деформаций (c^{-1}) – определяется по формуле

$$A = \sqrt{2 \left(\frac{\partial V_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{V_r}{r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_\phi}{\partial r} - \frac{V_\phi}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_\phi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right)^2},$$

τ_{ij} – компоненты тензора напряжений (Па), τ_0 – предельное напряжение сдвига (Па), γ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций (c^{-1}), n – показатель нелинейности кривой течения, k – индекс консистентности (Па·с ^{n}), r, z – радиальная и осевая координаты (м); ϕ – окружная координата (рад).

При $n = 1$ уравнение (1) переходит в уравнение Шведова–Бингама для вязкопластической среды, при $\tau_0 = 0$ – в уравнение Оствальда де Виля для псевдопластической жидкости, при $n = 1$ и $\tau_0 = 0$ – в уравнение Ньютона–Петрова для ньютоновской жидкости.

Математическая постановка задачи производится при следующих допущениях: в корпус гидроциклона подается вязкопластическая жидкость, насыщенная равномерно распределенными в ней пузырьками выделившегося газа, объемная доля которых на входе в гидроциклон равна c_{g0} ; для пленочного течения вязкопластической жидкости, обладающей высокой эффективной вязкостью, режим течения ламинарный и режим всплывания пузырьков газа ламинарный [10], ростом пузырька газа за счет изменения давления в пленке жидкости и массопередачи можно пренебречь. Полагаем, что пузырьки являются монодисперсными, что при моделировании процесса дегазации для пузырьков наиболее мелкой фракции позволит добиться заданной степени их извлечения.

При разработке модели дегазации вязкопластической жидкости в гидроциклоне необходимо учитывать действующие на пузырек газа и присоединенную массу жидкости в радиальном направлении силы инерции, которые являются существенными при высоких значениях числа Фруда. При условии действия на пузырек газа и присоединенную массу жидкости центробежной силы Архимеда, силы сопротивления и Кориолисовой силы с учетом того, что масса газа в объеме пузырька пренебрежимо мала, уравнение движения пузырька газа в проекциях на оси r, ϕ имеет вид:

$$\begin{aligned} V_{rg} \frac{\partial V_{rg}}{\partial r} + V_{zg} \frac{\partial V_{rg}}{\partial z} &= -\frac{2V_{\phi g}^2}{r} - \frac{3}{2} \frac{K_{fr} (V_{rg} - V_{rl}) |V_{rg} - V_{rl}|}{d_g \Phi(c)}, \\ V_{rg} \frac{\partial V_{rg}}{\partial r} + V_{zg} \frac{\partial V_{rg}}{\partial z} &= -\frac{2V_{\phi g}^2}{r} - \frac{3}{2} \frac{K_{f\phi} (V_{rg} - V_{rl}) |V_{rg} - V_{rl}|}{d_g \Phi(c)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $V_{rg}(r, z), V_{zg}(r, z), V_{\phi g}(r, z)$ – радиальная, осевая и окружная составляющие скорости пузырька газа, м/с; $V_{rl}(r, z)$ и $V_{\phi l}(r, z)$ – радиальная и окружная составляющие скорости жидкости, м/с; d_g – диаметр пузырька газа, м; $K_{fr}, K_{f\phi}$ – коэффициенты сопротивления движению пузырька газа в неньютоновской жидкости в радиальном и окружном направлениях, определяемые как для твердой сферы

согласно [11], при условии полной заторможенности адсорбционным слоем ПАВ (поверхностно-активных веществ) поверхности пузырька [12] и всплывании пузырька при малых значениях числа Рейнольдса $Re_{ng} < 1$ по следующим зависимостям:

$$K_{fr} = \frac{24 f_1(n)}{Re_{ng}} + \frac{f_2(n)}{(Re_{ng})^{f_3(n)}}, \quad (3)$$

где $Re_{ng} = \frac{\rho_l (d_g)^n (V_{rg} - V_{rl})^{2-n}}{k}$ – локальное число Рейнольдса, характеризующее режим всплывания

пузырька газа; $f_1(n) = 3^{1,5(n-1)} \frac{2+29n-22n^2}{n(n+2)(2n+1)}$; $f_2(n) = 10,5n - 3,5$; $f_3(n) = 0,32n + 0,13$; n – показатель нелинейности кривой течения; k – индекс консистентности (Па·с ^{n}); ρ_l – плотность жидкости (кг/м³).

Индекс консистентности k рассчитывался как эффективная вязкость псевдопластической жидкости согласно реологическому уравнению (1) с учетом наличия у разделяемой среды предельного напряжения сдвига τ_0 .

Коэффициент сопротивления при окружном движении пузырька газ $K_{f\phi}$ вычислялся по аналогичным зависимостям, но в качестве характерной разности скоростей берется соответствующая разность скоростей пузырька газа и жидкости в окружном направлении.

Коэффициент, учитывающий стесненность движения пузырьков газа ($\Phi(c)$), определяемый по формуле Бреннера [13], имеет вид:

$$\Phi(c) = \frac{3 - \frac{9}{2}c_g^{\frac{1}{3}} + \frac{9}{2}c_g^{\frac{5}{3}} - 3c_g^2}{3 + 2c_g^{\frac{5}{3}}}, \quad (4)$$

где c_g – объемная доля пузырьков газа.

Для математического моделирования поля концентраций при дегазации вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне использовалось дифференциальное уравнение конвективной диффузии в цилиндрических координатах [Там же], которое при отсутствии молекулярной диффузии может быть записано для объемной доли пузырьков газа следующим образом:

$$\text{div}(\bar{V}_g c_g) = 0, \quad (5)$$

где \bar{V}_g – вектор скорости пузырьков газа.

Уравнение (5) может быть преобразовано к виду:

$$\bar{V}_g \text{grad} c_g + c_g \text{div} \bar{V}_g = 0. \quad (6)$$

Поскольку скорость пузырьков газа отлична от скорости неразрывного потока дисперсионной среды:

$$\text{div} \bar{V}_g = \frac{1}{r} \frac{\partial [r(V_{rg} - V_{rl})]}{\partial r},$$

уравнение (6) примет вид:

$$V_{rg} \frac{\partial c_g}{\partial r} + V_{zg} \frac{\partial c_g}{\partial z} = -\frac{c_g}{r} \frac{\partial [r(V_{rg} - V_{rl})]}{\partial r}. \quad (7)$$

Уравнение (7) решалось совместно с уравнениями (2), описывающими движение пузырька газа. Дифференциальные уравнения в частных производных (2) и (7) сводятся в соответствии с методом характеристик [14] к системе обыкновенных дифференциальных уравнений, одно из которых описывает траекторию пузырька газа, а другое – изменение объемной доли пузырьков газа на траектории. В результате была получена система уравнений в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dZ} &= \frac{G_g}{H_g}, \\ \frac{dG_g}{dZ} &= -\frac{2\Theta_g^2}{H_g R} - \frac{3K_{fr}(G_g - G_l)|G_g - G_l|}{2H_g D_g \Phi(c_g)}, \\ \frac{d\Theta_g}{dZ} &= \frac{\Theta_g G_g}{H_g R} - \frac{3K_{f\varphi}(\Theta_g - \Theta_l)|\Theta_g - \Theta_l|}{2H_g D_g \Phi(c_g)}, \\ \frac{dC_g}{dZ} &= -\frac{C_g}{H_g} \left[\frac{d(G_g - G_l)}{dR} + \frac{G_g - G_l}{R} \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где $G_g(R, Z) = \frac{V_{rg}(r, z)}{U_0}$, $H_g(R, Z) = \frac{V_{zg}(r, z)}{U_0}$, $\Theta_g(R, Z) = \frac{V_{\varphi g}(r, z)}{U_0}$ – безразмерные радиальная, осевая и окружная составляющие скорости пузырьков газа; $G_l(R, Z) = \frac{V_{rl}(r, z)}{U_0}$, $H_l(R, Z) = \frac{V_{zl}(r, z)}{U_0}$, $\Theta_l(R, Z) = \frac{V_{\varphi l}(r, z)}{U_0}$ – безразмерные радиальная, осевая и окружная составляющие скорости жидкости; $C_g = \frac{c_g}{c_{g0}}$ – безразмерная объемная доля пузырьков газа; $D_g = \frac{d_g}{r_c}$ – безразмерный диаметр пузырька газа; $R = \frac{r}{r_c}$; $Z = \frac{z}{r_c}$ – безразмерные радиальная и осевая координаты; U_0 – средняя скорость жидкости во входном патрубке гидроциклона (м/с); c_{g0} – объемная доля пузырьков газа во входном патрубке гидроциклона (м³/м³); r_c – радиус корпуса гидроциклона (м).

2. Численное моделирование

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (8) решалась в проекциях на оси координат по методу Рунге–Кутты с фиксированным шагом по программе, составленной на языке CompaqVizual Fortran, применительно к геометрии рабочего пространства цилиндрического гидроциклона при граничном условии

$$Z = 0, \quad R_c - B \leq R \leq R_c, \quad C_g = C_{g0}, \quad (9)$$

где R_c – безразмерный радиус корпуса гидроциклона; $B = \frac{b}{r_c}$ – безразмерная ширина входного патрубка, b – ширина входного патрубка (м).

На основании результатов моделирования полей составляющих скорости и давления при течении нелинейно-вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне [6] и последующей аппроксимации расчетных данных было выполнено моделирование процесса дегазации нелинейно-вязкопластической жидкости в гидроциклоне, которое заключалось в численном решении полученной системы дифференциальных уравнений при граничном условии (9) для различных значений определяющих чисел подобия и реологических констант дисперсионной среды при изменении их в широком диапазоне.

Течение нелинейно-вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне характеризуется [6] числом пластичности Pl , определяющим отношение сил пластичности к силам инерции, центробежным числом Фруда Fr (фактором разделения), модифицированным числом Рейнольдса Re_n и параметром безразмерного расхода Q_0 . Числа подобия определялись следующим образом:

$$Pl = \frac{\tau_0}{\rho U_0^2}, \quad Fr = \frac{U_0^2}{g r_c}, \quad Re_n = \frac{\rho r_c^n U_0^{2-n}}{k}, \quad Q = \frac{hb}{\pi r_c^2},$$

где h – высота входного патрубка гидроциклона (м).

Реологические свойства среды характеризуются предельным напряжением сдвига τ_0 (которое входит в число пластичности Pl), показателем нелинейности кривой течения n и индексом консистентности k . Всплывание пузырька газа в поле центростремительной силы Архимеда в нелинейно-вязкопластической дисперсионной среде характеризуется локальным числом Re_{ng} [15], изменяющимся вдоль траектории пузырька.

Показателем эффективности протекания процесса дегазации в гидроциклоне является среднеинтегральная степень извлечения пузырьков газа S [Там же], представляющая собой для процесса дегазации среднюю безразмерную объемную долю пузырьков газа, извлеченных из жидкости в данном сечении пленки (при $Z = \text{const}$), вычисляемая по следующей формуле:

$$S = 1 - \frac{\int_{1-\Delta(Z)}^1 C_g H_g(R, Z) R dR}{\int_{1-B}^1 C_{g0} H_{g0}(R, Z) R dR}, \quad (10)$$

где C_{g0} – безразмерная объемная доля пузырьков газа во входном патрубке гидроциклона;

$\Delta(Z) = \frac{\delta(z)}{r_c}$ – безразмерная толщина пленки жидкости; $\delta(z)$ – толщина пленки жидкости (м).

Результаты численного моделирования приведены на рис. 2, 3.

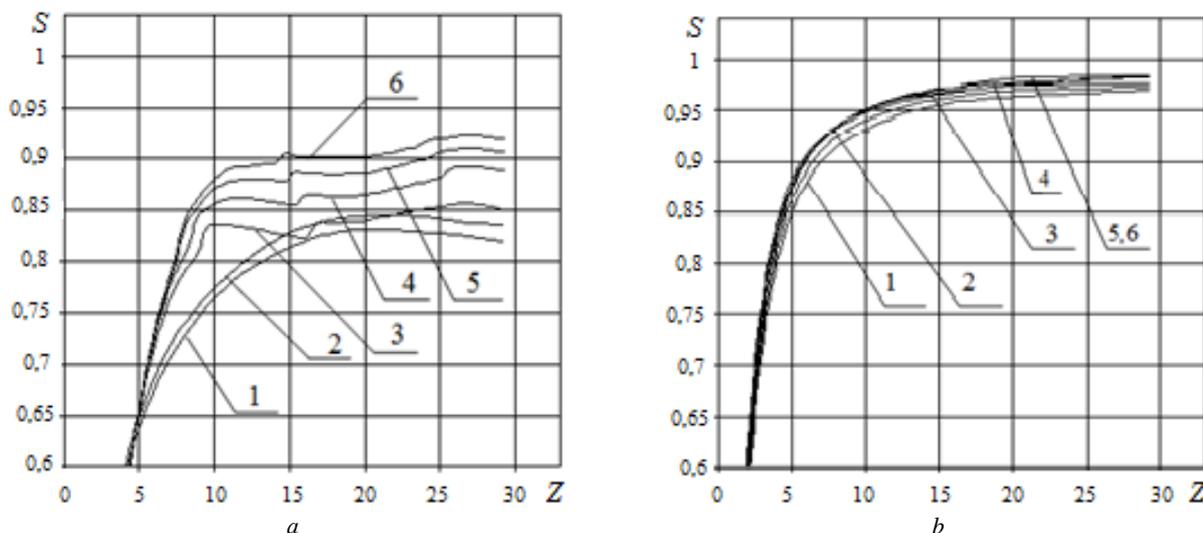


Рис. 2. Зависимости степени извлечения S пузырьков газа в цилиндрическом гидроциклоне от осевой координаты Z при различных значениях числа Pl для значений $Fr = 20, k = 0,3132 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (a); $Fr = 30, k = 0,3836 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (b); $Re_n = 4 \cdot 10^3, Q_0 = 2,0 \cdot 10^{-2}, n = 1,0$; 1 – $Pl = 0$, 2 – $Pl = 2,548 \cdot 10^{-3}$, 3 – $Pl = 5,097 \cdot 10^{-3}$, 4 – $Pl = 7,645 \cdot 10^{-3}$, 5 – $Pl = 1,019 \cdot 10^{-2}$, 6 – $Pl = 1,274 \cdot 10^{-2}$

Fig. 2. Dependences of the degree of extraction of gas bubbles S in a cylindrical hydrocyclone from the axial coordinate Z at different values of the number Pl for the values $Fr = 20, k = 0,3132 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (a); $Fr = 30, k = 0,3836 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (b); $Re_n = 4 \cdot 10^3, Q_0 = 2,0 \cdot 10^{-2}, n = 1,0$; 1 – $Pl = 0$, 2 – $Pl = 2,548 \cdot 10^{-3}$, 3 – $Pl = 5,097 \cdot 10^{-3}$, 4 – $Pl = 7,645 \cdot 10^{-3}$, 5 – $Pl = 1,019 \cdot 10^{-2}$, 6 – $Pl = 1,274 \cdot 10^{-2}$

На рис. 2 приведены зависимости степени извлечения S пузырьков газа в цилиндрическом гидроциклоне от безразмерной осевой координаты Z при различных числах Pl для значений $Fr = 20, k = 0,3132 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (a) и $Fr = 30, k = 0,3836 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (b); $Re_n = 4 \cdot 10^3, Q_0 = 2,0 \cdot 10^{-2}, n = 1,0$ (ньютоновская жидкость при $Pl = 0$ и бингамовская вязкопластическая среда при $Pl > 0$). Из представленных зависимостей следует, что степень извлечения пузырьков газа возрастает с увеличением осевой координаты Z , что обусловлено выходом пузырьков газа на поверхность пленки жидкости.

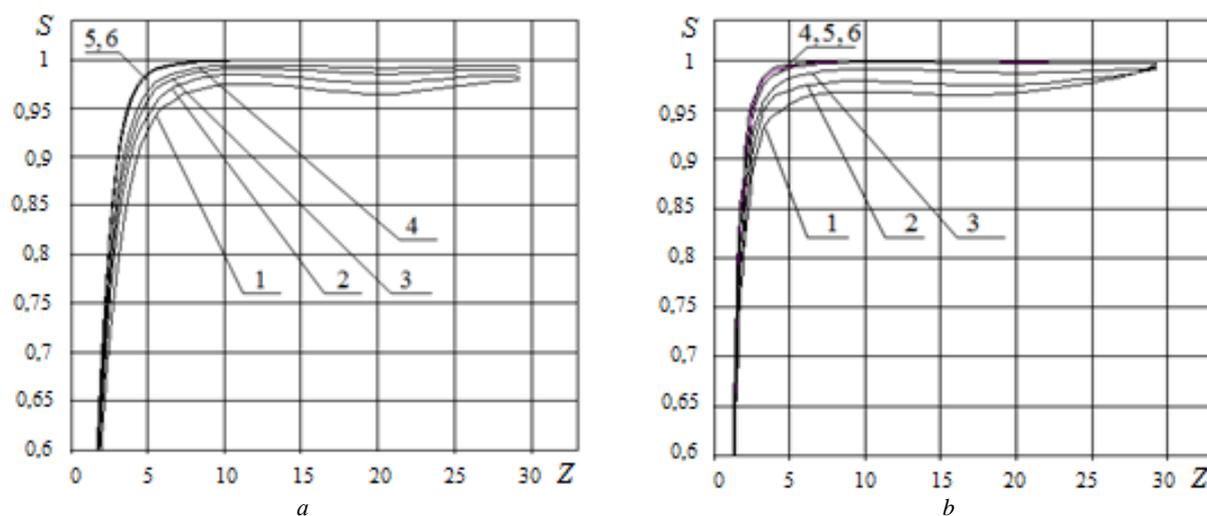


Рис. 3. Зависимости степени извлечения S пузырьков газа в цилиндрическом гидроциклоне от осевой координаты Z при различных значениях числа Pl для значений $Fr = 20$, $k = 1,242 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (а); $Fr = 30$, $k = 1,650 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (б); $Re_n = 4 \cdot 10^3$, $Q_0 = 2,0 \cdot 10^{-2}$, $n = 0,6$; 1 – $Pl = 0$, 2 – $Pl = 2,548 \cdot 10^{-3}$, 3 – $Pl = 5,097 \cdot 10^{-3}$, 4 – $Pl = 7,645 \cdot 10^{-3}$, 5 – $Pl = 1,019 \cdot 10^{-2}$, 6 – $Pl = 1,274 \cdot 10^{-2}$

Fig. 3. Dependences of the degree of extraction of gas bubbles S in a cylindrical hydrocyclone from the axial coordinate Z for different values of the number Pl for the values $Fr = 20$, $k = 1,242 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (а); $Fr = 30$, $k = 1,650 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (б); $Re_n = 4 \cdot 10^3$, $Q_0 = 2,0 \cdot 10^{-2}$, $n = 0,6$; 1 – $Pl = 0$, 2 – $Pl = 2,548 \cdot 10^{-3}$, 3 – $Pl = 5,097 \cdot 10^{-3}$, 4 – $Pl = 7,645 \cdot 10^{-3}$, 5 – $Pl = 1,019 \cdot 10^{-2}$, 6 – $Pl = 1,274 \cdot 10^{-2}$

С увеличением числа Pl (что соответствует повышению предельного напряжения сдвига τ_0) степень извлечения пузырьков газа существенно увеличивается. Это объясняется уменьшением толщины пленки жидкости, увеличением окружной составляющей скорости пузырьков газа и, как следствие, возрастанием действующей на них центростремительной силы Архимеда [6]. Сравнивая рис. 2, а и рис. 2, б, можно установить, что увеличение числа Fr также сопровождается ростом степени извлечения пузырьков газа S вследствие роста их окружной составляющей скорости. Таким образом, наибольшая эффективность процесса дегазации наблюдается для высоких значений чисел Pl и Fr .

На рис. 3 приведены те же зависимости, что и на рис. 2, для значений $Fr = 20$ и $n = 0,6$; $Fr = 30$ и $n = 0,6$ (нелинейно-вязкопластическая среда Гершеля–Балкли) для тех же значений определяющих параметров. Из представленных зависимостей следует, что степень извлечения пузырьков газа S возрастает с увеличением осевой координаты Z при $n = 0,6$ более интенсивно, чем при $n = 1,0$, особенно при высоких значениях числа Pl , когда толщина пленки жидкости минимальна [5]. С ростом числа Pl степень извлечения пузырьков газа возрастает до более высоких значений, чем для жидкости Шведова–Бингама (см. рис. 2), и влияние числа Pl для среды Гершеля–Балкли при меньшей толщине пленки жидкости [6] сильнее. Из сравнения зависимостей на рис. 3, а и рис. 3, б следует, что степень извлечения пузырьков газа S возрастает с увеличением числа пластичности Pl вследствие уменьшения толщины пленки жидкости [Там же], особенно при высоких значениях числа Fr . Это является следствием возрастания степени выраженности аномалии неньютоновских свойств разделяемой среды с увеличением числа пластичности Pl , уменьшения толщины пленки жидкости и повышения степени наполненности радиального распределения окружной составляющей скорости $V_\phi(r, z)$ [5].

С ростом числа Fr степень извлечения пузырьков газа также возрастает вследствие увеличения действующей на них центростремительной силы Архимеда [Там же]. Следовательно, при дегазации нелинейно-вязкопластических сред и высоких значениях фактора разделения высота корпуса цилиндрического гидроциклона может быть уменьшена.

Заключение

1. С использованием разработанной математической модели дегазации вязкопластических жидкостей в цилиндрическом гидроциклоне установлено влияние числа пластичности, фактора разделения и реологических свойств среды на процесс дегазации.

2. Показано, что наибольшая эффективность процесса дегазации наблюдается для нелинейно-вязкопластических жидкостей при высоких значениях чисел Pl и Fr . Эффективность процесса дегазации возрастает с увеличением аномалии неньютоновских свойств среды, что соответствует уменьшению показателя нелинейности кривой течения n . Влияние чисел Pl и Fr с увеличением аномалии неньютоновских свойств среды усиливается.

3. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики инженерного расчета гидроциклонов для дегазации вязкопластических сред, в частности при разработке оборудования для дегазации буровых растворов в нефтедобывающей промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксенова Н.А., Рожкова О.В. Буровые промывочные жидкости и промывка скважин : в 3 т. Тюмень : Издательство ТИУ, 2016. Т. 3. 120 с.
2. Варавва А.И., Вершинин В.Е., Трапезников Д.В. Численное моделирование процесса дегазации газожидкостной смеси в гидроциклоне // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Т. 5, № 3. С. 213–229.
3. Матвиенко О.В., Агафонцева М.В. Численное исследование процесса дегазации в гидроциклонах // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2012. № 4 (20). С.107–118.
4. Щукина А.Г. Математическое моделирование процессов разделения неоднородных систем с неньютоновской дисперсионной средой : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 1996. 16 с.
5. Терновский И.Г., Кутепов А.М. Гидроциклонирование. М. : Наука, 1994. 350 с.
6. Яблонский В.О. Гидродинамика нелинейно-вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне // Журнал прикладной химии. 2013. Т. 86, вып. 8. С. 1236–1243.
7. Яблонский В.О. Моделирование сепарации частиц твердой фазы из вязкопластической среды в гидроциклоне // Энергоресурсосбережение, промышленность и транспорт. 2020. № 3. С. 6–11.
8. Вайнштейн И.А. Об уравнениях кинетики разделения суспензий // Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 45, № 4. С. 602–608.
9. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. 3-е изд., доп. и перераб. М. ; Ижевск : Ин-т компьютерных исслед., 2016. 687 с.
10. Dyakowski T., Hornung G., Williams R.A. Simulation of non-newtonian flow in a hydrocyclone // Chem. Eng. Res. a. Des. A. 1994. V. 72, № 4. P. 513–520.
11. Acharya A., Mashelkar R.A., Ulbrecht J. Flow of inelastic and viscoelastic fluids past a sphere // Rheol. Acta. 1976. V. 15, № 9. P. 454–463.
12. Дерягин Б.В., Духин С.С., Рулев Н.Н. Микрофлотация: водоочистка, обогащение. М. : Химия, 1986. 112 с.
13. Берд Р.Б., Стьюарт В.Е., Лайтфут Е.Н. Явления переноса. М. : Химия, 1974. 687 с.
14. Матвеев Н.М. Дифференциальные уравнения. М. : Просвещение, 1988. 261 с.
15. Яблонский В.О. Влияние конструктивных параметров гидроциклона на извлечение твердых частиц суспензии напорной флотацией // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. № 3. С. 3–7.

Поступила в редакцию 12 июня 2021 г.

Yablonskii V.O. (2021) MODELING OF GAS EXTRACTION FROM RHEOLOGICALLY COMPLEX MEDIA IN THE FIELD OF CENTRIFUGAL FORCES IN A HYDROCYCLONE. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 57. pp. 53–61

DOI: 10.17223/19988605/57/6

Liquids processed in the oil industry, in particular drilling fluids, in many cases have nonlinear viscoplastic properties. Such liquids have a yield strength, and their effective viscosity decreases with an increase in the intensity of the deformation rates, which affects the hydrodynamics of the devices.

In the published works, it is concluded that the rheological equation of state of a non-Newtonian fluid is applicable to multiphase heterogeneous systems, which is written in the form of the Herschel-Bulkley law for drilling mud purification processes. We believe that this law describes the properties of a nonlinear viscoplastic fluid.

The mathematical model of separation of inhomogeneous liquid systems in the field of centrifugal forces is adapted to the process of degassing of viscoplastic liquids in a cylindrical hydrocyclone. The model takes into account the action of inertia, Coriolis forces and the attached mass of the liquid. The system of partial differential equations describing the degassing process is reduced to a system of ordinary differential equations and solved numerically. The system of ordinary differential equations was solved in projections on the coordinate axis using the Runge-Kutta method with a fixed step according to a program compiled in the Compaq Vizual Fortran language, applied to the geometry of the working space of a cylindrical hydrocyclone.

Based on the results of modeling the fields of velocity and pressure components during the flow of a nonlinear viscoplastic fluid in a cylindrical hydrocyclone and subsequent approximation of the calculated data, a simulation of the degassing process of a nonlinear viscoplastic fluid in a hydrocyclone was performed, which consisted in the numerical solution of the obtained system of differential equations for various values of the determining similarity numbers and rheological constants of the dispersion medium when they change in a wide range.

Based on the results of numerical modeling, the influence of the plasticity number at different values of the separation factor and the nonlinearity index of the flow curve on the degree of extraction of gas bubbles is analyzed. The physical justification of the obtained results is given. The obtained results can be used in the development of equipment for cleaning drilling fluids.

Keywords: viscoplastic fluid; yield strength; degassing; cylindrical hydrocyclone; plasticity number; separation factor; nonlinearity index; consistency index; degree of extraction.

YABLONSKII Vladimir Olegovich (Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Processes and Devices of Chemical Production, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation).

E-mail: V.yablonsky@mail.ru

REFERENCES

1. Aksenova, N.A. & Rozhkova, O.V. (2016) *Burovye promyvochnye zhidkosti i promyvka skvazhin : v 3 t.* [Drilling flushing fluids and well flushing: in 3 vols]. Vol. 3. Tyumen: TIU.
2. Varavva, A.I., Vershinin, V.E. & Trapeznikov D.V. (2019) Numerical modeling of the degassing process of a gas-liquid mixture in hydrocyclone. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika – Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy.* 5(3). pp. 213–229.
3. Matvienko, O.V. & Agafontseva, M.V. (2012) Numerical simulation of the degassing process in hydrocyclones. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics.* 4(20). pp. 107–118.
4. Shchukina, A.G. (1996) *Matematicheskoe modelirovanie protsessov razdeleniya neodnorodnykh sistem s nen'yutonovskoy disperсионной средой* [Mathematical modeling of separation processes of inhomogeneous systems with a non-Newtonian dispersion medium]. Abstract of Technical Sciences Cand. Diss. Volgograd.
5. Ternovsky, I.G. & Kutepov, A.M. (1994) *Gidrotsiklonirovanie* [Hydrocycloning]. Moscow: Nauka.
6. Yablonskii, V.O. (2013) Hydrodynamics of nonlinear viscoplastic fluid in cylindrical hydrocyclone. *Zhurnal prikladnoy khimii – Russian Journal of Applied Chemistry.* 86(8). pp. 1212–1219. DOI: 10.1134/S1070427213080107
7. Yablonskii, V.O. (2020) Modelling of separation of hard phase particles from viscoplastic media in hydrocyclone. *Energoresursosberezhenie, promyshlennost' i transport – Energy and Resource Saving: Industry and Transport.* 3. pp. 6–11.
8. Weinstein, I.A. (1983) Ob uravneniyakh kinetiki razdeleniya suspenziy [On the equations of the kinetics of separation of suspensions]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal.* 45(4). pp. 602–608.
9. Levich, V.G. (2016) *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physico-chemical hydrodynamics]. 3rd ed. Moscow; Izhevsk: IKI. pp. 66–69.
10. Dyakowski, T., Hornung, G. & Williams, R.A. (1994). Simulation of non-newtonian flow in a hydrocyclone. *Chemical Engineering Research and Design.* A. 72(4). pp. 513–520.
11. Acharya, A., Mashelkar, R.A. & Ulbrecht, J. (1976) Flow of inelastic and viscoelastic fluids past a sphere. *Rheologica Acta.* 15(9). pp. 454–463.
12. Deryagin, B.V., Dukhin, S.S. & Rulev, N.N. (1986) *Mikroflotatsiya: vodoочистка, obogashchenie* [Microflotation: Water Treatment, Enrichment]. Moscow: Khimiya.
13. Bird, R.B., Stewart, W.E. & Lightfoot, E.N. (1965) *Yavleniya perenosa* [Transport Phenomena]. 2nd ed. New York; London: J. Wiley.
14. Matveev, N.M. (1988) *Differentsial'nye uravneniya* [Differential Equations]. Moscow: Prosveshchenie.
15. Yablonskii, V.O. (2006) Vliyaniye konstruktivnykh parametrov gidrotsyklona na izvlechenie tverdykh chastits suspenzii napornoy flotatsiyey [Effect of structural parameters of hydrocyclones on the extraction of solid suspension particles by pressurized flotation]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie – Chemical and Petroleum Engineering.* 42. pp. 119–127.