

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕГАЗАЦИИ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ГИДРОЦИКЛОНЕ*

© В. О. Яблонский

Волгоградский государственный технический университет,
400005, г. Волгоград, пр. им. В. И. Ленина, д. 28
E-mail: everest58@mail.ru

Поступила в Редакцию 29 августа 2020 г.
После доработки 1 марта 2022 г.
Принята к публикации 13 марта 2022 г.

Разработана математическая модель дегазации вязкопластических жидкостей в цилиндрическом гидроциклоне, учитывающая действие сил инерции, сил 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, которые могут быть использованы при разработке оборудования для очистки буровых растворов и дегазации нефти при подготовке к транспортировке.

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

DOI: 10.31857/S0044461822020050, EDN: DEETWB

Бурение скважин в нефтедобывающей промышленности сопровождается обогащением промывочной 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 промывочных жидкостей является важным условием обеспечения нормального процесса бурения.

Основной показатель, на значения которого следует ориентироваться при выборе сепаратора для промывочных жидкостей, — остаточный объем газа:

чем меньше содержится газа в жидкости, тем лучше справляется сепаратор со своей задачей.

Применяемые в настоящее время гравитационные сепараторы** 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

* Научное редактирование проведено научным редактором журнала «Нефтехимия» к.х.н. Н. В. Шелеминой.

** Аксенова Н. А., Рожкова О. В. Буровые промывочные жидкости и промывка скважин. Учебное пособие. В 3 т. Т. 3. Тюмень: Изд-во ТИУ, 2016. 120 с.

является актуальной задачей, представляет научный интерес и направлена на решение важной практической проблемы.

В работах [1, 2] 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 [3] 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 представляет значительный теоретический и прикладной интерес, что позволит расширить сферу их внедрения в промышленность.

Как отмечается в [4], наиболее экономичными методами дегазации являются механические. Один из перспективных механических методов — дегазация в центробежном поле, а именно в центрифугах и гидроциклонах.

В статье [5] выполнено численное моделирование гидродинамики цилиндрического гидроциклона 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.

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.

Численное моделирование

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 центростремительной силы Архимеда на поверхность пленки. Очищенная

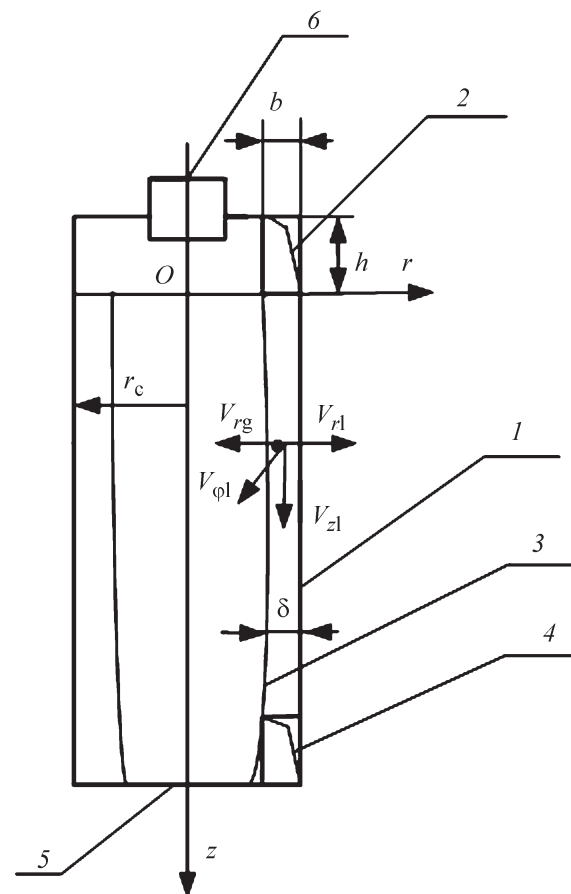


Рис. 1. Схема дегазации жидкости в цилиндрическом гидроциклоне.

1 — корпус гидроциклона, 2 — входной патрубок, 3 — вращающаяся пленка жидкости, 4 — патрубок для отвода жидкой фазы, 5 — днище гидроциклона, 6 — патрубок для отвода газа.

от пузырьков газа жидкость удаляется через нижний слив гидроциклона 4, установленный на днище 5, а газ — через верхний отводящий патрубок 6.

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

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

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

где τ_{ij} — компоненты тензора напряжений (Па); τ_0 — предельное напряжение сдвига (Па); γ_{ij} — компоненты тензора скоростей деформаций (с^{-1}); A — интенсивность скоростей деформаций (с^{-1}); n — показатель нелинейности кривой течения; k — индекс консистентности ($\text{Па} \cdot \text{с}^n$); 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

деформаций, что оказывает влияние на гидродинамику аппаратов.

В работе [6] 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 [7] описываются свойства нелинейно-вязкопластической жидкости.

Реологическое уравнение состояния Гершеля–Балкли для трехмерного течения с учетом условия пластичности фон Мизеса, записанное через компоненты тензора скоростей деформаций в цилиндрической системе координат, имеет вид

эффективной вязкостью, режим течения и режим всплывания пузырьков газа ламинарный [8]; 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 силы инерции, действующие на пузырек газа и присоединенную массу жидкости в радиальном направлении, 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

$$V_{rg} \frac{\partial V_{rg}}{\partial r} + V_{zg} \frac{\partial V_{rg}}{\partial z} = - \frac{2V_{\varphi g}^2}{r} - \frac{3}{2} \frac{K_{fr}(V_{rg} - V_{rl})|V_{rg} - V_{rl}|}{d_g \Phi(c)},$$

$$V_{rg} \frac{\partial V_{\varphi g}}{\partial r} + V_{zg} \frac{\partial V_{\varphi g}}{\partial z} = - \frac{V_{\varphi g} V_{rg}}{r} - \frac{3}{2} \frac{K_{f\varphi}(V_{\varphi g} - V_{\varphi l})|V_{\varphi g} - V_{\varphi l}|}{d_g \Phi(c)}, \quad (2)$$

где $V_{rg}(r, z), V_{zg}(r, z), V_{\varphi g}(r, z)$ — радиальная, осевая и окружная составляющие скорости пузырька газа ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$); $V_{rl}(r, z)$ и $V_{\varphi l}(r, z)$ — радиальная и окружная составляющие скорости жидкости ($\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$); d_g — диаметр пузырька газа (м); $K_{fr}, K_{f\varphi}$ — коэффициенты сопротивления движению пузырька газа в неньюто-

новской жидкости в радиальном и окружном направлениях, определяемые как для твердой сферы [9] при условии полной заторможенности адсорбционным слоем ПАВ поверхности пузырька [10] и всплывании пузырька при малых значениях числа Рейнольдса $Re_{ng} < 1$ по следующим зависимостям:

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

где

$$f_1(n) = 3^{1.5(n-1)} \frac{2 + 29n - 22n^2}{n(n+2)(2n+1)};$$

$$f_2(n) = 10.5n - 3.5; \quad f_3(n) = 0.32n = 0.13;$$

$\text{Re}_{ng} = \frac{\rho_l(d_g)^n(V_{rg} - V_{rl})^{2-n}}{\text{Re}_{ng}}$ — локальное число Рейнольдса, характеризующее режим всплывания пузырька газа; n — показатель нелинейности кривой течения; k — индекс консистентности (Па·с ^{n}); ρ_l — плотность жидкости (кг·м⁻³).

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 газа $K_{f\phi}$ вычисляли по аналогичным зависимостям, но в качестве характерной разности скоростей принимали соответствующую разность скоростей пузырька газа и жидкости в окружном направлении.

Φ — коэффициент, учитывающий стесненность движения пузырьков газа, определяемый по формуле Бреннера [10]:

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

где c_g — объемная доля пузырьков газа (м³·м⁻³).

Для математического моделирования поля концентраций при дегазации вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне использовалось дифференциальное уравнение конвективной диффузии в цилиндрических координатах [11], 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, c_g — объемная доля пузырьков газа (м³·м⁻³).

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) принимает 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 [12] 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:

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

где $G_g(R, Z) = \frac{V_{rg}(r, z)}{U_0}$, $H_g(R, Z) = \frac{V_{zg}(r, z)}{U_0}$, $\Theta_g(R, Z) = \frac{V_{\phi g}(r, z)}{U_0}$ — безразмерные радиальная, осевая и

окружная составляющие скорости пузырьков газа;

$G_l(R, Z) = \frac{V_{rl}(r, z)}{U_0}$, $H_l(R, Z) = \frac{V_{zl}(r, z)}{U_0}$, $\Theta_l(R, Z) = \frac{V_{\phi l}(r, z)}{U_0}$ — 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 гидроциклоне (м·с⁻¹); c_{g0} —

объемная доля пузырьков газа во входном патрубке гидроциклоне (м³·м⁻³); r_c — радиус корпуса гидроциклоне (м).

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (8) решалась в проекциях на оси координат методом Рунге–Кутты с фиксированным шагом по программе, составленной на языке Compaq Visual 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); C_{g0} — безразмерная объемная доля пузырьков газа во входном патрубке гидроциклона.

На основании результатов моделирования полей составляющих скорости и давления при течении нелинейно-вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне [5] 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 [5] числом пластичности Pl , характеризующим 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:

$$Pl = \frac{\tau_0}{\rho U_0^2}, \quad Fr = \frac{U_0^2}{gr_c}, \quad Re_n = \frac{\rho r_c^n U_0^{2-n}}{k}, \quad Q_0 = \frac{hb}{\pi r_c^2},$$

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 центробежной силы Архимеда в нелинейно-вязкопластической дисперсионной среде характеризуется локальным числом Re_{ng} [13], изменяющимся вдоль траектории пузырька.

Показателем эффективности протекания процесса дегазации в гидроциклоне является среднеинтеграль-

ная степень извлечения пузырьков газа S [13], представляющая собой для процесса дегазации среднюю безразмерную объемную долю пузырьков газа, извлеченных из жидкости в данном сечении пленки (при $Z = \text{const}$), вычисляемая по формуле

$$S = 1 - \frac{\int_0^1 C_g H_g(R, Z) R dR}{\int_{1-B}^1 C_{g0} H_{g0}(R, Z) R dR}, \quad (10)$$

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).

Обсуждение результатов

Результаты численного моделирования приведены на рис. 2, 3.

На рис. 2, а, б приведены зависимости степени извлечения S пузырьков газа в цилиндрическом гидроциклоне от безразмерной осевой координаты Z при различных значениях числа Pl для значений $Fr = 20$, $k = 0.3132 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (а) и $Fr = 30$, $k = 0.3836 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$ (б); $Re_n = 4 \cdot 10^3$; $Q_0 = 2.0 \cdot 10^{-2}$; $n = 1.0$ (ньютоновская жидкость при $Pl = 0$ и вязкопластическая среда Шведова–Бингама 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. 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 центробежной силы Архимеда [5]. 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, а, б приведены те же зависимости, что и на рис. 2, для значений $Fr = 20$ и $n = 0.6$ (рис. 3, а) и $Fr = 30$ и $n = 0.6$ (рис. 3, б) (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

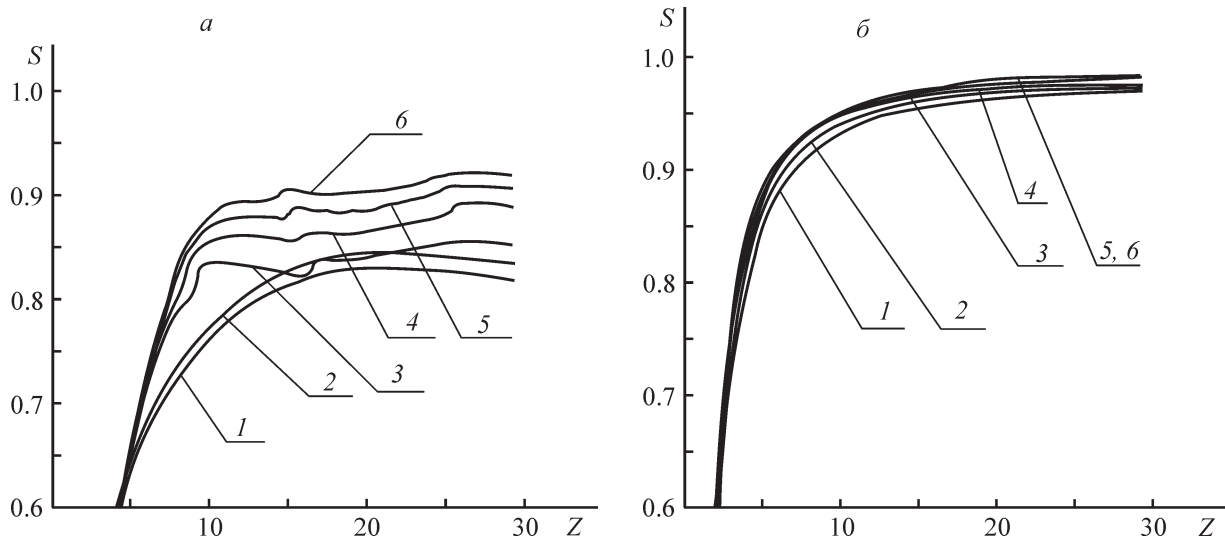


Рис. 2. Зависимости степени извлечения S пузырьков газа в цилиндрическом гидроциклоне от осевой координаты Z при различных значениях числа Pl .

a — $Fr = 20, k = 0.3132 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$; b — $Fr = 30, k = 0.3836 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$; $Re_n = 4 \cdot 10^3$; $Q_0 = 2.0 \cdot 10^{-2}$; $n = 1.0$.
 Pl : 1 — 0, 2 — $2.548 \cdot 10^{-3}$, 3 — $5.097 \cdot 10^{-3}$, 4 — $7.645 \cdot 10^{-3}$, 5 — $1.019 \cdot 10^{-2}$, 6 — $1.274 \cdot 10^{-2}$.

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 (рис. 2), и влияние числа Pl для среды Гершеля–Балкли при меньшей толщине пленки жидкости [5] сильнее. Из сравнения зависимостей на рис. 3, a и рис. 3, b следует, что степень извлечения

пузырьков газа S возрастает с увеличением числа пластичности Pl вследствие уменьшения толщины пленки жидкости [5], 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 окружающей составляющей скорости $V_{\phi l}(r, z)$ [5].

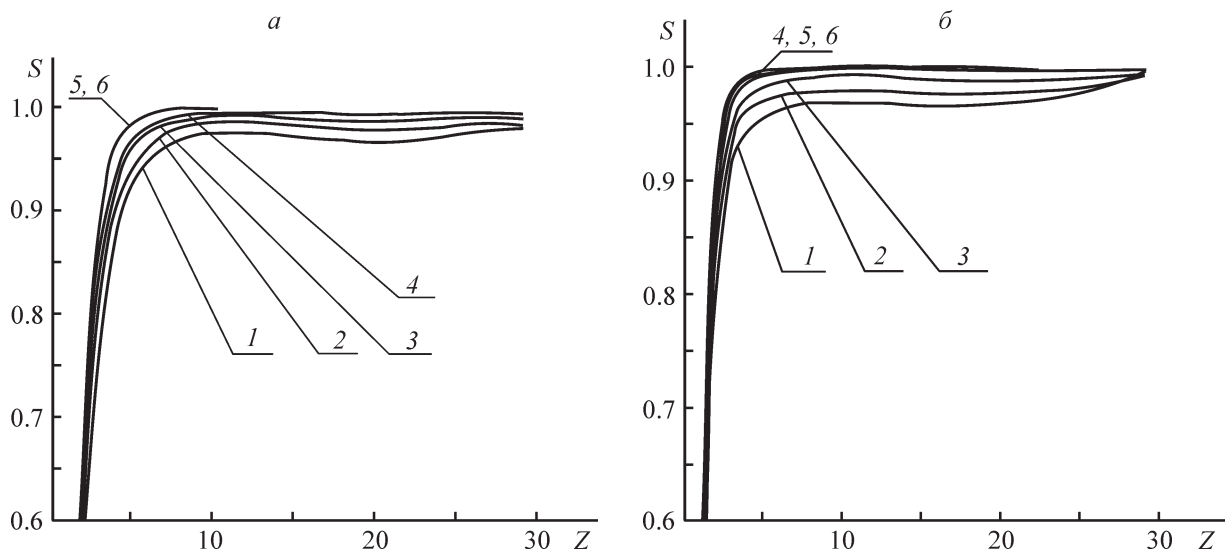


Рис. 3. Зависимости степени извлечения S пузырьков газа в цилиндрическом гидроциклоне от осевой координаты Z при различных значениях числа Pl .

a — $Fr = 20, k = 1.242 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$; b — $Fr = 30, k = 1.650 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$; $Re_n = 4 \cdot 10^3$; $Q_0 = 2.0 \cdot 10^{-2}$, $n = 0.6$.
 Pl : 1 — 0, 2 — $2.548 \cdot 10^{-3}$, 3 — $5.097 \cdot 10^{-3}$, 4 — $7.645 \cdot 10^{-3}$, 5 — $1.019 \cdot 10^{-2}$, 6 — $1.274 \cdot 10^{-2}$.

С ростом числа Fg степень извлечения пузырьков газа также возрастает вследствие увеличения действующей на них центробежной силы Архимеда [5]. Следовательно, при дегазации нелинейно-вязкопластических сред и высоких значениях фактора разделения высота корпуса цилиндрического гидроциклона может быть уменьшена.

Выводы

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 Fg . Эффективность процесса дегазации возрастает с увеличением аномалии неньютоновских свойств среды, что соответствует уменьшению показателя нелинейности кривой течения n . Влияние чисел Pl и Fg 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.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному консультанту профессору Волгоградского государственного технического университета д.т.н. Г. В. Рябчуку за помощь в разработке теоретических аспектов процессов разделения и очистки неоднородных жидких систем в центробежном поле и ценные советы.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация об авторах

Яблонский Владимир Олегович, к.т.н., доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» Волгоградского государственного технического университета,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0893-1187>

Список литературы

- [1] Варавва А. И., Вершинин В. Е., Трапезников Д. В. Численное моделирование процесса дегазации газожидкостной смеси в гидроциклоне // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Т. 5. № 3. С. 213–229. https://elibrary.ru/download/elibrary_41430031_62471749.pdf
- [2] Матвиенко О. В., Агафонцева М. В. Численное исследование процесса дегазации в гидроциклонах // Вестн. Том. гос. ун-та. 2012. № 12. С.107–118. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18396385>
- [3] Щукина А. Г. Математическое моделирование процессов разделения неоднородных систем с неньютоновской дисперсионной средой: Автореф. канд. дис. Волгоград, 1996. 16 с.
- [4] Терновский И. Г., Кутенов А. М. Гидроциклонирование. М.: Наука, 1994. 350 с.
- [5] Яблонский В. О. Гидродинамика нелинейно-вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне // ЖПХ. 2013. Т. 86. № 8. С. 1236–1243. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23200479> [Yablonskii V. O. Hydrodynamics of nonlinear viscoplastic fluid in cylindrical hydrocyclone // Russ. J. Appl. Chem. 2013. V. 86. N 8. P. 1212–1219. <https://doi.org/10.1134/S1070427213080107>].
- [6] Вайнштейн И. А. Об уравнениях кинетики разделения суспензий // Инж.-физ. журн. 1983. Т. 45. № 4. С. 602–608.
- [7] Левич В. Г. // Физико-химическая гидродинамика. М.; Ижевск: Изд-во «ИКИ», 2016. С. 66–69.
- [8] Dyakowski T., Hornung G., Williams R. A. Simulation of non-newtonian flow in a hydrocyclone // Chem. Eng. Res. Des. A. 1994. V. 72. N 4. P. 513–520.
- [9] Acharya A., Mashelkar R. A., Ulbrecht J. Flow of inelastic and viscoelastic fluids past a sphere // Rheol. Acta. 1976. V. 15. N 9. P. 454–463.
- [10] Дерягин Б. В., Духин С. С., Рулев Н. Н. Микрофлотация: Водоочистка, обогащение. М.: Химия, 1986. 112 с.
- [11] Берд Р. Б., Стьюарт В. Е., Лайтфут Е. Н. Явления переноса. М.: Химия, 1974. 687 с. [Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N. Transport Phenomena. Second Rev. Ed. New York; London: J. Wiley, 1965. 920 p.].
- [12] Матвеев Н. М. Дифференциальные уравнения. М.: Просвещение, 1988. 261 с.
- [13] Яблонский В. О. Влияние конструктивных параметров гидроциклона на извлечение твердых частиц суспензии напорной флотацией // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2006. № 3. С. 3–7. URL: http://www.library.ugatu.ac.ru/pdf/magazines/chma06_no3.pdf [Yablonskii V. O. Effect of structural parameters of hydrocyclones on the extraction of solid suspension particles by pressurized flotation // Chem. Petrol. Eng. 2006. V. 42, P. 119–127. <https://doi.org/10.1007/s10556-006-0064-7>].