

Технология подготовки и очистки нефтяных шламов и аппаратурное оформление процесса

Г. И. Келбалиев • Г. С. Алиев • Э. Ф. Алиев • Х. Ш. Гаджихмедзаде • Х. М. Аббаслы

В статье приведены результаты по подготовке и очистке нефтяных шламов в загрязненных участках Апшеронского полуострова, таких как Сураханы, Рамана, Бибигейбат и Балаханы. Для этого была проведена первичная территориальная оценка территорий и детально проанализированы особенности формирования иловых отложений в местах отбора проб. Предложены уравнения для определения толщины слоя нефтяных шламов и выяснено, что они зависят от коэффициента диффузии частиц и от концентрации асфальтенов в объёме отложений. Большие значения числа Пекле (Pe), являющиеся следствием малых величин коэффициента диффузии частиц в жидкости, определяют преобладание конвективного переноса вещества над диффузионным. Дальнейшее уплотнение адсорбционного слоя под действием внешних возмущений и химических превращений приводит к увеличению плотности слоя и «старению» эмульсий, характерным для нефтяных шламов. Как следует из предложенных уравнений, число Шервуда (Sh), или коэффициент массоотдачи при n , близкий к 1, зависит от свойств псевдопластичного шлама и от числа Пекле в степени $1/2$, т. е. с увеличением скорости стекания растёт эффективность массопереноса за счёт обновления поверхности слоя. Увеличение коэффициента массоотдачи, соответствующее увеличению скорости испарения, приводит к росту вязкости стекающего нефтяного шлама. В нефтяных шламах со слабо выраженными неньютоновскими свойствами зависимость эффективной вязкости от напряжения сдвига отсутствует, и по этой причине нелинейность вязкости сказывается лишь на кинетике стекания. Следовательно, стекание нефтешламов можно отнести к случаю растекания жидкости со слабо выраженными неньютоновскими характеристиками или слабой нелинейностью реологических свойств. Как следует из этих уравнений, скорость стекания слоя обратно пропорциональна его вязкости или консистенции, т. е. чем больше жидкость проявляет вязкопластичные свойства, тем меньше скорость ее стекания. На основе теоретических и экспериментальных исследований предложены технологическая схема подготовки очистки нефтяных шламов и аппаратурное оформление процесса. Предложенные в данном исследовании результаты позволяют создать технологию разделения и очистки нефтяных шламов от капель воды твёрдых примесей с механическим разрушением адсорбционного слоя, т. е. решить важную проблему переработки и утилизации нефтяных шламов

Нефтяные шламы; массоотдача; реологические свойства нефтяных шламов; число Шервуда; число Пекле.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие нефтегазовой промышленности привело к возникновению серьёзных экологических проблем. Нефтяные шламы, особенно в регионах, где длительное время ведётся интенсивная добыча нефти, а также в районах деятельности нефтеперерабатывающих заводов и других промышленных предприятий, представляют собой источник серьёзной экологической опасности. Эти шламы имеют сложный состав и являются одним из факторов, негативно влияющих на здоровье населения, загрязняя почвенный покров, подземные и поверхностные водные источники. Согласно современным статистическим данным, в нефтяной промышленности ежегодно образуются миллионы тонн нефтешламов, а трудности в их управлении, помимо экономических потерь, представляют серьёзную угрозу устойчивому развитию окружающей среды.

История нефтяной промышленности Азербайджана напрямую связана с Апшеронским полуостровом, где на протяжении многих лет в процессах добычи, переработки и транспортировки нефти образуются большие объёмы нефтяных шламов. Большая часть этих шламов

Келбалиев Г.И., Алиев Г.С., Алиев Э.Ф., Гаджихмедзаде Х.Ш., Аббаслы Х.М. Технология подготовки и очистки нефтяных шламов и аппаратурное оформление процесса // СИИТ. 2025. Т. 7, № 5(24). С. 146-156. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no5-p146. EDN: ELVRIT.

Kelbaliyev G. I., Aliyev G. S., Aliyev E. F., Gadjiakhmedzade Kh. Sh., Abbasli Kh. M. "Technology of preparation and purification of oil sludge and equipment design of the process" // SIIT. 2025. Vol. 7, no. 5(24), pp. 146-156. DOI: 10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no5-p146. EDN: ELVRIT (In Russian).

хранилась на различных открытых свалках, что приводило к серьёзному загрязнению почвы и ухудшению экологической обстановки. В настоящее время существующие традиционные подходы к утилизации этих отходов на Апшеронском полуострове не позволяют в полной мере реализовать экологические стандарты, достичь экономической эффективности и безопасного повторного использования шламов. Поэтому разработка экологически безопасных, экономически эффективных и технологически современных инновационных методов эффективного управления нефтешламами считается актуальной и необходимой [Ali21–Ali25b, Али22, Ras25, Ras25b].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В мировой практике для утилизации нефтешламов применяются различные физические, химические и биологические методы. Однако каждый метод имеет определённые недостатки при применении в отдельности. При применении физических методов возможна лишь частичная очистка шламов, химические методы могут создавать дополнительную опасность для окружающей среды, а биологические методы, требуя длительного времени, неэффективны для утилизации всех видов шламов. В связи с этим большое значение имеют комплексное применение существующих методов и определение их оптимальных режимов. Для повышения и оптимизации эффективности комбинированных методов необходимо использовать современные научные подходы, прежде всего методы математического моделирования и оптимизации.

Применение математического моделирования позволяет определять эффективные режимы комбинированных технологий, оптимизировать технологические параметры и точно прогнозировать результаты. Таким образом, моделирование процессов утилизации нефтешламов может обеспечить как минимизацию негативного воздействия на окружающую среду, так и поиск более экономически выгодных технологических решений.

Предварительная подготовка и очистка нефтяных шламов от капель воды и различных твёрдых примесей для дальнейшей их переработки – актуальная экологическая и экономическая проблема. В наиболее упрощённом виде нефтешламы представляют собой многокомпонентные агрегативно устойчивые физико-химические системы. Наличие в составе диспергированной воды и различных твёрдых примесей позволяет отнести нефтешламы к неньютоновским псевдопластичным жидкостям со слабо выраженными реологическими свойствами. При длительном хранении нефтяных эмульсий происходит расслоение и осаждение капель воды и твёрдых частиц под действием гравитации. В результате придонный слой для различных видов нефти представляет собой фазу, включающую до 45 % органики, 52 % твёрдых механических примесей и воды до 25 %.

При опорожнении ёмкостей в пристеночной области резервуаров за счёт адгезии и прилипания на стенке остаётся слой нефтепродукта определённой толщины, который стекает с поверхности под действием гравитации и внутренних напряжений сдвига, что способствует дополнительному сбору нефтяного шлама на дне аппарата. Кроме этого, при определённых температурах возможно испарение лёгких фракций нефти, что качественно меняет физико-химические свойства стекающего слоя нефтяного шлама (вязкость, плотность), тем самым ещё более усиливая неньютоновские свойства.

Теоретически и экспериментально исследованы механизмы образования, стабилизации и разрушения нефтяных эмульсий как гетерогенных сред, но многие проблемы, связанные с явлениями, протекающими на границе раздела нефть-вода, разрушением адсорбционного слоя на поверхности капель, коалесценцией (слиянием) и дроблением капель воды, их расслоением и осаждением пока, не нашли своего корректного решения. Структурно-механическая устойчивость эмульсионных систем связана с образованием на границе раздела нефть-вода адсорбционных слоёв, состоящих из асфальтенов, смол, парафинов, минеральных солей и твёрдых частиц.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Установлено, что металлопарафиновые комплексы приводят к образованию самой оболочки, а твёрдые частицы (песок, глина, известняк и др.) способствуют повышению прочности оболочек [Sjo90, Поз82, Hir84, Лев62]. Анализ этих оболочек на поверхности капель воды сырой нефти различных месторождений показывает, что основными стабилизаторами являются асфальтены и смолы, в состав которых входят высокоплавкие парафины и неорганические механические примеси. Образование и формирование адсорбционного слоя на поверхности капель воды с упругими и вязкостными свойствами способствуют структурной стабилизации нефтяных шламов. Механизм образования на поверхности адсорбционных плёнок представляется следующими стадиями:

- диффузионный перенос массы вещества (асфальтенов) из объёма нефти к поверхности капель воды. Поток массы на поверхность движущейся капли за единицу времени можно определить как [Kel22]

$$I = \sqrt{\frac{4\pi}{3}} \left[\frac{D}{a_r} \frac{\eta_c}{\eta_c + \mu_d} \right]^{1/2} a_r^2 \Delta C \sqrt{U}, \quad (1)$$

где η_c, η_d – вязкость среды и капли, D – коэффициент молекулярной диффузии, $\Delta C = C_0 - C_s$, C_0, C_s – содержание асфальтенов и смол в объёме и на поверхности, U – скорость движения капли, a_r – средний размер капель. Принимая изменение массы капли в результате образования адсорбционного слоя как

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho_a \Delta^3 \text{ и } m = \frac{4}{3} \pi \rho_a \Delta^3,$$

толщина слоя определяется уравнением [Sjo90, Поз82]

$$\frac{\Delta}{a_r} = 0,78 \left[\frac{1}{\text{Re}} \frac{\gamma_0}{1 + \gamma_0} \right]^{1/6} \left(\frac{\Delta C}{\rho_a} \text{St} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

где Δ – толщина адсорбционного слоя; $\gamma_0 = \eta_c / \eta_d$ – отношение вязкости капли воды к вязкости нефти, характеризующая подвижность поверхности капли; $\text{Re} = U a_r / D$ – число Пекле; $\text{St} = U t / a_r$ – число Струхала; ρ_a – плотность адсорбированного слоя.

Из уравнения (2) следует, что толщина адсорбционного слоя зависит от коэффициента диффузии частиц и асфальтенов к поверхности капли, размера и подвижности поверхности капель и от концентрации асфальтенов в объёме потока. Большие значения числа Re , являющиеся следствием малых величин коэффициента диффузии частиц в жидкости, определяют преобладание конвективного переноса вещества над диффузионным. Дальнейшее уплотнение адсорбционного слоя под действием внешних возмущений и химических превращений приводит к увеличению плотности слоя и «старению» эмульсий, характерным для нефтяных шламов. В частности, если $\text{Re} \approx 10^4$, $\Delta / a_r \approx 0,1$, $\text{St} \approx 10^3$, $\Delta C / \rho_a \approx 10^{-4}$, то уравнением (2) определяется $\Delta / a_r \approx 0,1$. Несмотря на незначительную толщину адсорбционного слоя по сравнению с размером капли, его прочность на поверхности капель для различных видов нефти колеблется в пределах 0,5–1,1 Н/м². Адсорбция вещества на поверхности капель, а также десорбция и разрушение адсорбционного слоя с участием поверхностно-активных веществ или механическими методами является важной стадией, поскольку от разрушения адсорбционного слоя зависят дальнейшее расслоение и разделение нефтяного шлама. Если скорости адсорбции и десорбции малы по сравнению со скоростью подачи вещества к поверхности капли, то процесс образования адсорбционного слоя лимитируется процессами адсорбции и десорбции. Предположим, что концентрация адсорбированного вещества в объёме – C_0 , а на поверхности – Γ . По аналогии с выводам уравнения Лангмюра, если принять скорость

адсорбции вещества на поверхности капли равной $W_A = \beta C_0 (1 - \Gamma / \Gamma_\infty)$ и скорость десорбции, равной $W_D = \alpha \Gamma$, то в равновесном состоянии ($W_A = W_D$)

$$K_0 = \beta / \alpha \Gamma_\infty, \quad (3)$$

где α, β – некоторые постоянные, зависящие от температуры: $K = \beta / \alpha$, $K_0 = \beta / \alpha \Gamma_\infty$; Γ_∞ – максимальное насыщение поверхности капли. Уравнение (3) хорошо согласуется со многими экспериментальными данными для нефти различного месторождения. На рис. 1 представлены изотерма десорбции ($T = 40^\circ \text{C}$) асфальтенов на поверхности капель воды для северокавказских видов нефти [Кел22] и расчётные значения уравнения (3), в котором $K = 55$, $K_0 = 0.5$. Нефтяные шламы относятся к более устойчивым эмульсиям, поэтому здесь следует использовать методы механического разрушения адсорбционных оболочек.

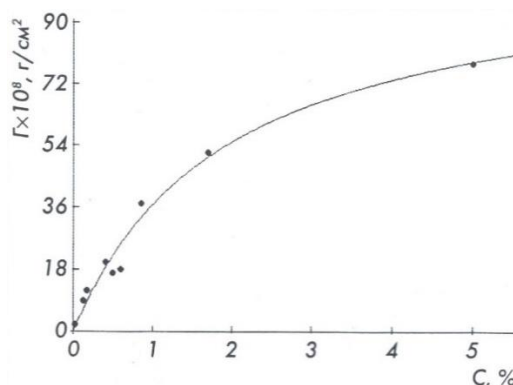


Рис. 1 Изотерма адсорбции асфальтенов на поверхности капли

Стекание слоя нефтепродуктов с вертикальной поверхности. Важные параметры при стекании нефтяных шламов с вертикальной поверхности резервуаров – толщина слоя во времени, скорость растекания в зависимости от свойств нефти и среды, которые требуют определения. Нелинейность реологических свойств и их изменение во времени приводят к определённым трудностям в решении данной проблемы. Для вязких жидкостей с нелинейными реологическими характеристиками возможность замедления стекания обычно связана с выделением новой фазы в объеме жидкости в результате физико-химических превращений (объёмное испарение или химическое превращение) и, как следствие, увеличением плотности и эффективной вязкости [Кел22, Али23б, Кел11, Кел12, Мол09, Урь10]. В нефтяных шламах со слабо выраженными неньютоновскими свойствами зависимость эффективной вязкости от напряжения сдвига τ_0 отсутствует, и по этой причине нелинейность вязкости сказывается лишь на кинетике стекания. Следовательно, стекание нефтешламов можно отнести к случаю растекания жидкости со слабо выраженными неньютоновскими характеристиками или слабой нелинейностью реологических свойств.

Поскольку течение слоя считается достаточно медленным, то конвективными явлениями можно пренебречь по сравнению с капиллярными, с силами вязкого трения и силами тяжести. Тогда уравнение гидродинамики ламинарного течения вязкой плёнки нефтешламов по вертикальной поверхности малой кривизны (диаметр нефтяных резервуаров достаточно велик) с учётом капиллярных сил и сил гравитации записывается в виде [Кел22].

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\sigma}{\rho_s} \frac{d^3 \delta}{dx^3} + v_s \frac{\partial^2 v_x}{dy^2} + g, \quad \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

с краевыми условиями

$$y = \delta, \eta_s \frac{\partial V_x}{\partial y} = 0, \quad y = 0, V_x = 0, \quad t = 0, \quad \delta = \delta_0, \quad (5)$$

где V_x, V_y – составляющие скорости течения слоя; ρ_s, σ – плотность поверхностного натяжения слоя, δ – текущая толщина слоя; ν_s, η_s – кинематическая и динамическая эффективная вязкость слоя. Первое условие в уравнении (5) означает сдвиговое напряжение на свободной поверхности слоя, равное нулю, а второе условие – прилипание жидкости к поверхности. При стекании с поверхности жидкости на поверхности остаётся слой минимальной толщины δ_{\min} , обусловленной прилипанием за счёт сил адгезии, зависящих от свойств жидкости, поверхности и характера смачивания.

При условии, что для псевдопластичных жидкостей вязкость не зависит от времени, то решением уравнения (4),

$$V_x = - \left(\frac{\rho_s g}{\eta_s} + \frac{\sigma}{\eta_s} \frac{d^3 \delta}{dx^3} \right) \left(\frac{y^2}{2} - \delta y \right), \quad V_y = - \frac{\partial}{\partial x} \int_0^\delta V_x dy, \quad V_y = \frac{d\delta}{dt} \quad (6)$$

получим уравнение для изменения толщины стекающего слоя в следующем виде:

$$\begin{aligned} -\frac{d\delta}{dt} &= \frac{\delta^2 \rho_s g}{\mu_s} \frac{\partial \delta}{\partial x} + \frac{\sigma \delta^2}{\eta_s} \frac{d\delta^3}{dx^3} \frac{\partial \delta}{\partial x} + \frac{\sigma \delta^2}{3\eta_s} \frac{\partial^4 \delta}{\partial x^4}, \\ k \left[\frac{Hc^n}{m^2} \right], \quad \gamma &= \frac{\partial V_x}{\partial y}, \quad k = 0,03 - \frac{0,3 Hc^n}{m^2}, \quad n = 0,7-1,0, \\ -\frac{d\delta}{dt} + \left(\frac{\delta}{\delta_0} \right)^{\frac{n+1}{n}} V_0 \frac{\partial \delta}{\partial x} &= 0, \quad V_0 = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho_s g}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \delta_0^{\frac{n+1}{n}}, \\ \delta(x, t)|_{t=0} &= \delta_0, \quad \delta(x, t)|_{x=0} = \delta(t), \end{aligned} \quad (7)$$

представляющее собой уравнение волнового стекания жидкости с вертикальной поверхности под действием гравитационных и капиллярных сил. Для степенных жидкостей Освальда де Вилля профиль скорости выражается формулой [Кел11]

$$V_x = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho_s g}{k} \right)^{1/n} y^{\frac{n+1}{n}},$$

где $k \left[Hc^n / m^2 \right]$ – индекс консистенции жидкости, $\gamma = \partial V_x / \partial y$.

Нефтешламы с содержанием воды и твёрдых примесей проявляют слабо выраженные неньютоновские свойства $k = 0,03 - 0,3 Hc^n / m^2$, $n = 0,7-1,0$. Усиление вязкопластических свойств нефтепродукта подавляет волнообразование в стекающем слое, и волновой режим переходит в безволновой, что позволяет пренебречь вторым и третьим членами в уравнении (7):

$$\begin{aligned} -\frac{d\delta}{dt} + \left(\frac{\delta}{\delta_0} \right)^{\frac{n+1}{n}} V_0 \frac{\partial \delta}{\partial x} &= 0, \quad V_0 = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho_s g}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \delta_0^{\frac{n+1}{n}}, \\ \delta(x, t)|_{t=0} &= \delta_0, \quad \delta(x, t)|_{x=0} = \delta(t), \end{aligned} \quad (8)$$

где V_0 – скорость стекания псевдопластичной жидкости; δ_0 – начальная толщина слоя; h – высота слоя.

Как следует из этих уравнений, скорость стекания слоя обратно пропорциональна его вязкости или консистенции, т. е. чем больше жидкость проявляет вязкопластичные свойства, тем меньше скорость его стекания. Частное решение можно представить в виде

$$\delta(x, t) = \delta_0 \left(\frac{x}{V_0 t} \right)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (9)$$

однако общее решение может несколько отличаться. Поскольку объём стекающего слоя является постоянной величиной, то условие нормирования, вытекающее из постоянства объёма слоя, записывается как

$$\int_0^h \frac{\delta(x,t)}{\delta_0} d\left(\frac{x}{h}\right) = 1. \quad (10)$$

С учетом частного решения (9) условие нормирования (10) принимает вид

$$\frac{2}{3} \left(\frac{h}{V_0 t}\right)^{\frac{n}{n+1}} = 1.$$

Тогда при этом условии общее решение можно записать в виде

$$\delta(x,t) = \left(\frac{h-x}{V_0 t}\right)^{\frac{n}{n+1}} \exp\left[-\frac{2}{3} \left(\frac{h}{V_0 t}\right)^{\frac{n}{n+1}} \frac{x}{h}\right] + \delta_0(t). \quad (11)$$

В уравнении (11) текущую начальную толщину можно выразить как

$$\delta_0(t) = \left(\delta(\delta_0|t=0 - \delta_{\min}|0) \exp\left(-\frac{V_0}{h} t\right)\right)_{\min}.$$

Количество стекающего нефтяного слоя определяется решением следующего выражения:

$$Q = \int_0^{\delta_0} V_x dy = \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} \left(\frac{\rho_s g}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \delta_0^{\frac{2n+1}{n}}. \quad (12)$$

На рис. 2 показаны характерные кривые изменения толщины стекающего слоя для различных моментов времени ($n \rightarrow 1$), скорости стекания и высоты слоя.

Таким образом, выражения (11) и (12) позволяют определить толщину стекающего слоя и количество нефтяных псевдопластичных шламов во времени.

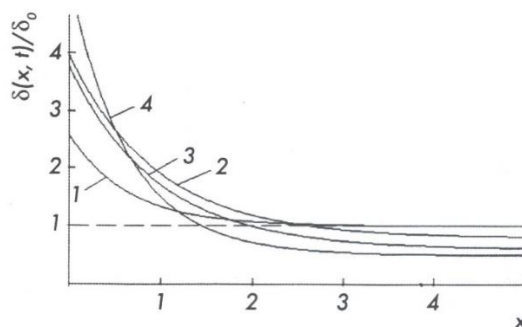


Рис. 2. Изменение толщины стекающего слоя по вертикальной поверхности:

$$\begin{aligned} 1 - \delta_0(x,t)/\delta_0 = 1, t = 0; \quad 2 - \delta_0(x,t)/\delta_0 = 0,8, t > 0; \\ 3 - \delta_0(x,t)/\delta_0 = 0,6, t > 0; \quad 4 - \delta_0(x,t)/\delta_0 = 0,5, t > 0 \end{aligned}$$

Массообмен при испарении с поверхности плёнки. В объёме стекающего с вертикальной поверхности слоя нефтешламов со временем при определённой температуре возможно испарение лёгких фракций, частичное окисление нефтепродуктов с образованием смолообразных соединений и асфальтенов, приводящих к увеличению эффективной вязкости и плотности жидкости и соответственно, к торможению скорости разделения капель воды и твёрдых примесей из нефтяного шлама. Для больших чисел $Re = V_0 h/D$, когда диффузией вдоль плёнки можно пренебречь в приближении пограничного слоя, распределение концентрации внутри плёнки для стационарного испарения описывается уравнением

$$V_0 \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}, \quad x = 0, c = 0, y = \delta, c = c_s, \quad (13)$$

где c — концентрация испаряющего вещества; c_s — концентрация испаряющего вещества на поверхности слоя; D — коэффициент диффузии; h — высота слоя. В уравнении (13), ограничиваясь главным членом разложения скорости жидкости вблизи свободной поверхности, V_0 можно

рассматривать как максимальную скорость течения плёнки. Решение с заданными условиями запишется в виде

$$c(x, y) = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\delta_0 - y}{2} \left(\frac{n \rho_s g}{(n+1) k D x} \delta_0^{\frac{n+1}{n}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right]. \quad (14)$$

Поток пара через единицу поверхности слоя определится как

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial y} |_{y = \delta} = c_s \left(\frac{V_0 D}{\pi x} \right)^{\frac{1}{2}},$$

а общий поток пара через единицу времени как

$$I = 2\pi(R - \delta_0) \int_0^h j dx = 4\pi^{\frac{1}{2}}(R - \delta_0)c_s(V_0 D h)^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

где R, h – радиус резервуара и высота слоя.

Используя (15), число Шервуда Sh определяется выражением

$$Sh = \frac{\beta \delta_0}{D} 4\pi^{\frac{1}{2}} \left(\frac{R - \delta_0}{h} \right) Pe_s^{\frac{1}{2}} \approx 7,08 Pe_s^{\frac{1}{2}} \left(\frac{R - \delta_0}{h} \right), \quad (16)$$

где $Pe_s = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\rho_s g}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \delta_0^{\frac{n+1}{n}} \frac{h}{D}$ – число Пекле для псевдопластичной жидкости; β – коэффициент массоотдачи.

В работе [Урь10] число Sh для массообмена пузырей и капель в псевдопластичной жидкости $0,6 \leq n \leq 1,0$ выражается полуэмпирической формулой вида

$$Sh = [(0,497 - 0,284)Pe]^{\frac{1}{2}}.$$

Как следует из этих уравнений, число Шервуда, или коэффициент массоотдачи при n , близкий к 1, зависит от свойств псевдопластичной жидкости и от числа Пекле в степени $\frac{1}{2}$, т. е. с увеличением скорости стекания растёт эффективность массопереноса за счёт обновления поверхности слоя. Увеличение коэффициента массоотдачи, соответствующее увеличению скорости испарения, приводит к росту вязкости стекающего нефтяного шлама.

ТЕХНОЛОГИЯ РАЗДЕЛЕНИЯ И ОЧИСТКИ

Сложность разделения и очистки от воды определяется длительным временем хранения шламов в резервуарах, в результате, адсорбированная пленка асфальтенов, смол и других примесей окончательно структурно формируется на поверхности капель, приобретая определённую прочность. В связи с этим для эффективной коалесценции, слияния капель и дальнейшего их осаждения из объема нефти требуется механическое разрушение адсорбционной плёнки. Механизм разрушения адсорбционных плёнок заключается в создании интенсивной турбулентности, приводящей к деформации формы, последствия чего проявляются в одновременном растяжении и сжатии плёнки, способствующим образованию дефектов и трещин в её структуре и снижению прочностных свойств. Использование перемешивающих устройств с большой скоростью вращения обеспечивает создание интенсивной турбулентности, а также ударного механизма разрушения адсорбционных плёнок. Такая ситуация требует определённых условий при разработке технологии очистки и аппаратного оформления.

На основе теоретических и экспериментальных исследований авторами предложены технологическая схема подготовки очистки нефтяных шламов и аппаратное оформление процесса (рис. 3).

Нефтяной шлам, нагретый в теплообменнике 1, из сборника подаётся в перемешивающее устройство 2 с помощью насоса. Для улучшения вязкостных свойств и разбавления нефтяного шлама из колонны К-1 частично отбирается фракция с $T_{\text{кип}} = 240\text{--}290^\circ \text{C}$, которая нагревает

поступающий в теплообменники поток и смешивается с поступающий в перемешивающее устройство нефтяным шламом.

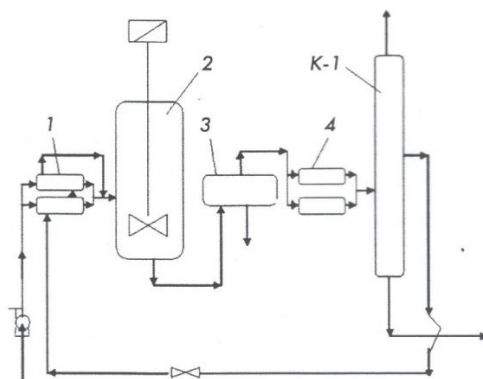


Рис. 3 Технологическая схема подготовки и очистки нефтяных шламов:

1, 4 – теплообменники; 2 – перемешивающее устройство; 3 – отстойник; К-1 – колонна

Таким образом, снижение вязкости нефтяного шлама происходит за счёт повышения температуры общего потока и разбавления нефтяного шлама более лёгкой фракцией. В ёмкости 3 осуществляются разделение и расслоение фаз, структура потоков подразделяется на три зоны: верхний слой – нефть с незначительным содержанием воды; промежуточный слой – в основном мельчайшие капли воды ($>10\text{--}50$ мкм); нижний слой – в основном сточная вода и механические примеси, а также незначительные количества нефти, которые выводятся с низа ёмкости. Структура пульсирующего промежуточного слоя с фильтрующей особенностью зависит от концентрации и размера капель, подчиняющихся условиям динамического равновесия и обеспечивающих седиментационную устойчивость эмульсии, а также скорость основного потока. По своей структуре промежуточный слой в отстойных аппаратах является некоторым аналогом «кипящего слоя», обладает такими свойствами, как сжатие и расширение, расслоение капель по размерам и высоте, стеснённое движение. С верха отстойника очищенная нефть поступает в ректификационную колонну К-1 для отделения газов и бензиновых фракций. С низа колонны выходит тяжёлая фракция, которая подвергается дальнейшему термическому разложению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены подготовка и очистка нефтяных шламов в загрязнённых участках Апшеронского полуострова, таких как Сураханы, Рамана, Бибигейбат и Балаханы, а также первичная территориальная оценка территорий и детально проанализированы особенности формирования иловых отложений в местах отбора проб.

Предложены уравнения для определения толщины слоя нефтяных шламов, и выяснен, что они зависят от коэффициента диффузии частиц и от концентрации асфальтенов в объёме отложений. Выяснен, что большие значения числа Пекле (Pe), являющиеся следствием малых величин коэффициента диффузии частиц в жидкости, определяют преобладание конвективного переноса вещества над диффузионным. Дальнейшее уплотнение адсорбционного слоя под действием внешних возмущений и химических превращений приводит к увеличению плотности слоя и «старению» эмульсий, характерным для нефтяных шламов.

Из предложенных уравнений следует, что число Sh, или коэффициент массоотдачи при n , близкий к 1, зависит от свойств псевдопластичного шлама и от числа Pe в степени $\frac{1}{2}$, то есть с увеличением скорости стекания растёт эффективность массопереноса за счёт обновления поверхности слоя. Увеличение коэффициента массоотдачи, соответствующее увеличению скорости испарения, приводит к росту вязкости стекающего нефтяного шлама.

Рассмотренные уравнения позволяют сделать вывод о том, что скорость стекания слоя обратно пропорциональна его вязкости или консистенции, то есть чем больше жидкость проявляет вязкопластичные свойства, тем меньше скорость ее стекания.

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложены технологическая схема подготовки очистки нефтяных шламов и аппаратное оформление процесса. Предложенные в данном исследовании результаты позволяют создать технологию разделения и очистки нефтяных шламов от капель воды твёрдых примесей с механическим разрушением адсорбционного слоя, то есть решить важную проблему переработки и утилизации нефтяных шламов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

- [Ali21] Aliyev E. F., Asadov M. M. The modification of technological scheme of wastewater cleaning from petrochemicals // Azerbaijan Oil Industry. 2021. № 1. Pp. 37–43. DOI: [10.37474/0365-8554/2021-1-37-43](https://doi.org/10.37474/0365-8554/2021-1-37-43). EDN: [MMTHED](#).
- [Ali23] Aliyev G. S., Hajiyeva R. J., Ahmadova E. N., Imanova T. R., Rahimov M. G. Analysis of Physico-Chemical Methods for Investigation of Oil Sludge // Journal of Survey in Fisheries Sciences. 2023;10(2S); 826–830.
- [Ali23b] Aliyev G. S., Rustamli Kh. M., Hajiahmedzade Kh. Sh. Calculation of Kinetic and Diffusion Coefficients of the Process of Surfactant Adsorption in Oil-Bearing Porous Rocks // Math. Models Comput. Simul. 2023. 15. 476–484. DOI: [10.1134/S207004822303002X](https://doi.org/10.1134/S207004822303002X). EDN: [EJZLAA](#).
- [Ali24] Aliyev E. F., Aliyev G. S., Hajiahmedzade Kh. Sh., Ahmadova I. V., Guliyeva G. A., Ibrahimova L. A., Bagirova E. T. Analysis of methods for utilization oil sludge from the Absheron peninsula // World Science Priorities: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference. Vienna, Austria, February 08–09, 2024. No. 1. Pp. 41–48. DOI: [10.5281/zenodo.10668605](https://doi.org/10.5281/zenodo.10668605).
- [Ali25] Aliyev G., Aliyev E. Comprehensive Analysis of Oil Sludge from the Absheron Peninsula to Solve Environmental Problems // BIO Web Conf. 2025. 151: 01014 1–9. DOI: [10.1051/bioconf/202515101014](https://doi.org/10.1051/bioconf/202515101014).
- [Ali25b] Aliyev E. F., Aliyev G. S. Innovative mathematical modeling for optimizing the efficient utilization of oil sludge in Absheron peninsula // Young Researcher Journal. 2025. No. 2. Pp. 115–120. DOI: [10.59849/2409-4838.2025.2.115](https://doi.org/10.59849/2409-4838.2025.2.115). EDN: [TRYPZI](#).
- [Asa24] Asadov M. M., Aliev E. F., Aliev E. N., Aliev G. S. Analysis of compositions and comparison of field data of oil sludge samples from the Absheron field // Azerbaijan Oil Industry. 2024. No. 9. Pp. 55–61. DOI: [10.37474/0365-8554/2024-09-55-61](https://doi.org/10.37474/0365-8554/2024-09-55-61). EDN: [WIYGGZ](#).
- [Hir84] Hirschberg A., DeJong N. L., Schipper B. A., Meijer J. G. Influence of Temperature and Pressure on Asphaltene flocculation // Society of Petroleum Engineers. 1984. V. 24, № 3. Pp. 283–293.
- [Kel12] Kelbaliyev G. I., Safarov F. F. Analysis and Modeling of the Physical Phenomena of Drops Coalescence in Processes of Separation of Oil Emulsions // Energy Sources. Part A. 2012. V. 34. Pp. 1–11.
- [Kel22] Kelbaliyev G. I., Rasulov S. R., Tagiyev D. B. Applied problems of Rheology of structured non-Newtonian oil // In Book: Advanced Rheology and its Applications. London: IntechOpen Publisher, 2022.
- [Mol09] Molla M. M. Non-Newtonian natural convection along a vertical plate with uniform surface heat fluxes // J. Thermophysics and Heat Transfer. 2009. V. 23, No. 4. Pp. 176–185. DOI: [10.2514/1.37566](https://doi.org/10.2514/1.37566). EDN: [XDQCOR](#).
- [Ras25] Rasulov S. R., Kelbaliyev G. I., Karimli V. I., Abdullayeva N. A. Model of the Dependence of the Settling Velocity of Water Droplets on the Turbulent Diffusion Coefficient in Oil // SIIT. 2025. Vol. 7, no. 3 (22). Pp. 117–122. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no3-p117](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no3-p117). EDN: [RXZXBT](#).
- [Ras25b] Rasulov S. R., Kelbaliyev G. I., Karimli V. I., Abdullayeva N. A. Formation of structures in media containing oil // SIIT. 2025. Vol. 7, no. 2 (21). Pp. 103–108. DOI: [10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p103](https://doi.org/10.54708/2658-5014-SIIT-2025-no2-p103). EDN: [UFZDNC](#).
- [Sjo90] Sjoblrm J., Urdahl O., Hoiland H., Christy A. A., Johansen E. J. Water-in-crude oil emulsions formation, characterization and destabilization // Progress in Colloid and Polymer Science. 1990. V. 82. Pp. 131–139. DOI: [10.1007/BFb0118251](https://doi.org/10.1007/BFb0118251).
- [Али22] Алиев Э. Ф., Алиев Г. С. Физико-химические методы исследования нефтяного шлама // Евразийский Союз Ученых. Серия: Медицинские, биологические и химические науки. 2022. № 4. С. 6–10. DOI: [10.31618/ESU.2413-9335.2022.4.97.1648](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2022.4.97.1648). EDN: [DGYOBJ](#).
- [Кел11] Келбалиев Г. И., Сафаров Ф. Ф. Исследование утончения межфазной плёнки в процессах разделения нефтяных эмульсий // ХТТМ. 2011. № 4. С. 18–24. EDN: [OQTJNX](#).
- [Кел22] Келбалиев Г. И., Расулов С. Р., Тагиев Д. Б. Моделирование процессов гидравлической диффузии и фильтрации нефти в пористом пласте // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95, № 2. С. 508. EDN: [HXUYXC](#).
- [Лев62] Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1962.
- [Поз82] Позднышев Г. Н. Стабилизация и разрушение нефтяных эмульсий. М.: Недра, 1982. 221 с.
- [Урь10] Урьев Н. Б. Физико-химическая динамика структурированных нано-дисперсных композиционных материалов. Ч. 2 // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2010. № 3. С. 227–241. EDN: [MAXKMR](#).

ОБ АВТОРАХ | ABOUT THE AUTHORS

КЕЛБАЛИЕВ Гудрат Исфандияр оглы

Институт катализа и неорганической химии имени Муртузы Нагиева, Азербайджан.

kudret.kelbaliyev@mail.ru

Зав. отделом, доктор технических наук, профессор.

АЛИЕВ Гошгар Сейфулла оглы

Институт катализа и неорганической химии имени Муртузы Нагиева, Азербайджан.

chemproblem@mail.ru ORCID 0000-0002-2237-3444.

Доктор философии в технических науках, доцент.

АЛИЕВ Эмин Фарид оглы

Институт катализа и неорганической химии имени Муртузы Нагиева, Азербайджан.

emin@sem-az.net ORCID 0009-0003-4658-2691.

Докторант, старший научный сотрудник.

ГАДЖИАХМЕДЗАДЕ Хураман Шамил кызы

Институт катализа и неорганической химии имени Муртузы Нагиева, Азербайджан.

heyat_mm@mail.ru ORCID 0009-0008-2495-6783.

Доктор философии в технических науках, ст. науч. сотр.

АББАСЛЫ Хадиджа Мубариз кызы.

Институт катализа и неорганической химии имени Муртузы Нагиева, Азербайджан.

rustemlixedice94@gmail.com ORCID 0009-0008-3684-6987.

Докторант, старший научный сотрудник.

KELBALIYEV Gudrat Isfandiyyar oglu

Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry named after Mur-tuza Nagiyev, Azerbaijan.

kudret.kelbaliyev@mail.ru

Head of the department, Dr. of Technical Sciences, Professor.

ALIYEV Goshgar Seyfulla oglu

Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry named after Mur-tuza Nagiyev, Azerbaijan.

chemproblem@mail.ru ORCID 0000-0002-2237-3444.

Doctor of Philosophy in Engineering, Associate Professor.

ALIYEV Emin Farid oglu

Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry named after Mur-tuza Nagiyev, Azerbaijan.

emin@sem-az.net ORCID 0009-0003-4658-2691.

Doctoral student, senior researcher.

HAJIAHMADZADE Khuraman Şamil gizi

Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry named after Mur-tuza Nagiyev, Azerbaijan.

heyat_mm@mail.ru ORCID 0009-0008-2495-6783.

Doctor of Philosophy in Engineering, senior researcher.

ABBASLI Kh. M.

Institute of Catalysis and Inorganic Chemistry named after Mur-tuza Nagiyev, Azerbaijan.

rustemlixedice94@gmail.com ORCID 0009-0008-3684-6987.

Doctoral student, junior research fellow.

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Технология подготовки и очистки нефтяных шламов и аппаратурное оформление процесса.

Авторы: Келбалиев Г.И., Алиев Г.С., Алиев Э.Ф., Гаджихмедзаде Х.Ш., Аббаслы Х.М.

Аннотация: В статье приведены результаты по подготовке и очистке нефтяных шламов в загрязненных участках Апшеронского полуострова, таких как Сураханы, Рамана, Бибигейбат и Балаханы. Для этого была проведена первичная территориальная оценка территорий и детально проанализированы особенности формирования иловых отложений в местах отбора проб. Предложены уравнения для определения толщины слоя нефтяных шламов и выяснено, что они зависят от коэффициента диффузии частиц и от концентрации асфальтенов в объеме отложений. Большие значения числа Пекле (Pe), являющиеся следствием малых величин коэффициента диффузии частиц в жидкости, определяют преобладание конвективного переноса вещества над диффузионным. Дальнейшее уплотнение адсорбционного слоя под действием внешних возмущений и химических превращений приводит к увеличению плотности слоя и «старению» эмульсий, характерным для нефтяных шламов. Как следует из предложенных уравнений, число Шервуда (Sh), или коэффициент массоотдачи при n , близкий к 1, зависит от свойств псевдопластичного шлама и от числа Пекле в степени $1/2$, т. е. с увеличением скорости стекания растёт эффективность массопереноса за счёт обновления поверхности слоя. Увеличение коэффициента массоотдачи, соответствующее увеличению скорости испарения, приводит к росту вязкости стекающего нефтяного шлама. В нефтяных шламах со слабо выраженными неньютоновскими свойствами зависимость эффективной вязкости от напряжения сдвига отсутствует, и по этой причине нелинейность вязкости сказывается лишь на кинетике стекания. Следовательно, стекание нефтешламов можно отнести к случаю растекания жидкости со слабо выраженными неньютоновскими характеристиками или слабой нелинейностью реологических свойств. Как следует из этих

Title: Technology of preparation and purification of oil sludge and equipment design of the process.

Authors: Kelbaliyev G. I., Aliyev G. S., Aliyev E. F., Gadjiakhmedzade Kh. Sh., Abbasli Kh. M.

Abstract: This article presents the results of oil sludge treatment and purification in contaminated areas of the Absheron Peninsula, including Surakhany, Ramana, Bibigeybat, and Balakhany. A preliminary territorial assessment was conducted, and the characteristics of sludge deposit formation at sample collection sites were analyzed in detail. Equations for determining the thickness of the oil sludge layer are proposed, revealing that they depend on the particle diffusion coefficient and the asphaltene concentration within the sediment. High Peclet numbers (Pe), resulting from low particle diffusion coefficients in liquids, determine the prevalence of convective transport over diffusion. Further compaction of the adsorption layer under the influence of external disturbances and chemical reactions leads to an increase in layer density and the "aging" of emulsions characteristic of oil sludge. As follows from the proposed equations, the Sherwood number (Sh), or the mass transfer coefficient at n close to 1, depends on the properties of the pseudoplastic sludge and on the Peclet number raised to the power of $1/2$, i.e., with increasing flow velocity, the efficiency of mass transfer increases due to the renewal of the layer surface. An increase in the mass transfer coefficient, corresponding to an increase in the evaporation rate, leads to an increase in the viscosity of the flowing oil sludge. In oil sludges with weakly expressed non-Newtonian properties, the dependence of the effective viscosity on the shear stress is absent, and for this reason, the nonlinearity of viscosity affects only the flow kinetics. Consequently, the flow of oil sludge can be classified as a case of liquid spreading with weakly expressed non-Newtonian characteristics or weak nonlinearity of rheological properties. As follows from these equations, the flow rate of the layer is inversely proportional to its viscosity or consistency, i.e., the more the liquid exhibits viscoplastic properties, the slower its

уравнений, скорость стекания слоя обратно пропорциональна его вязкости или консистенции, т. е. чем больше жидкость проявляет вязкопластичные свойства, тем меньше скорость ее стекания. На основе теоретических и экспериментальных исследований предложены технологическая схема подготовки очистки нефтяных шламов и аппаратное оформление процесса. Предложенные в данном исследовании результаты позволяют создать технологию разделения и очистки нефтяных шламов от капель воды твердых примесей с механическим разрушением адсорбционного слоя, т. е. решить важную проблему переработки и утилизации нефтяных шламов.

Ключевые слова: Нефтяные шламы; массоотдача; реологические свойства нефтяных шламов; число Шервуда; число Пекле.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 31 августа 2025 г.

flow rate. Based on theoretical and experimental research, a process flow diagram for preparing and purifying oil sludge and the process's instrumentation are proposed. The results presented in this study make it possible to develop a technology for separating and purifying oil sludge from water droplets and solid impurities using mechanical destruction of the adsorption layer, thereby solving the important problem of processing and recycling oil sludge.

Key words: Oil sludge, mass transfer, rheological properties of oil sludge, Sherwood number, Peclet number.

Language: Russian.

The article was received by the editors on 31 August 2025.