

Статья поступила в редакцию: 13.07.2026

Статья принята к публикации: 28.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 532.5+66.061+628.4

Математическая модель фазового разделения нефтешлама под действием центробежной силы

Шодиев Азимбек Зиядуллоевич

докторант

Бухарский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Жумаев Қаям Каримович

д-р техн. наук

Бухарский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Шодиев Зиядулло Очилович

канд. техн. наук

Бухарский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

Хамроев Хамза Хамидович

докторант

Бухарский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Бухара

E-mail: azimbeksodiev24@gmail.com

Mathematical model of phase separation of oil sludge under the effect of centrifugal force

Shodiev Azimbek

PhD student

Bukhara State Technical University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Zhumaev Kayum

Doctor technical sciences, Professor

Bukhara State Technical University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Shodiyev Ziyadullo

candidate of Technical Sciences

Bukhara State Technical University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Xamroyev Xamza

PhD

student

Bukhara State Technical University

Republic of Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Математическая модель фазового разделения нефтешлама под действием центробежной силы // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Шодиев А.З. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23255>

Аннотация

В течение длительного времени в области теоретических представлений о строении нефтей и нефтепродуктов господствовал подход, согласно которому они рассматривались как молекулярно-дисперсные системы, т. е. растворы, способные в условиях фазовых переходов к формированию макрофаз. Считалось, что в обычных условиях они подобны идеальным растворам, к которым применимы правила аддитивности. Недостатком такого подхода является то, что даже при кажущейся однородности нефть и большинство нефтепродуктов представляют собой дисперсные системы, состоящие из различных компонентов, отличающихся между собой по свойствам.

В данной научной статье рассмотрены теоретические и практические аспекты разделения нефтешлама на фазы с использованием центробежной силы. Авторами разработана математическая модель, описывающая процессы гидродинамического смешения и фазового разделения в гидроциклоне с параллельной и противоточной структурой потоков. Особое внимание уделено моделированию поведения ультрадисперсных твердых частиц, трудноотделяемых от жидкой фазы, с учётом законов гидродинамики и механики жидкости. Проведён инженерный расчёт параметров гидроциклона, предложен алгоритм расчёта концентраций и массовых потоков компонентов нефтешлама, реализовано программное моделирование процесса в среде MATLAB. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенной модели для повышения точности и управляемости технологии переработки нефтешламов.

Abstract

For a long time, the prevailing approach to the theoretical understanding of the structure of oils and petroleum products was to regard them as molecularly dispersed systems, i.e., solutions capable of forming macrophases under phase transition conditions. Under normal conditions, they were considered to be similar to ideal solutions, to which the rules of additivity apply. The drawback of this approach is that, even with apparent homogeneity, oil and most petroleum products are dispersed systems consisting of various components with different properties.

This scientific article explores the theoretical and practical aspects of phase separation of oil sludge using centrifugal force. The authors developed a mathematical model describing the hydrodynamic mixing and phase separation processes in a hydrocyclone with parallel and counterflow stream structures. Special attention is given to modeling the behavior of ultrafine solid particles that are difficult to separate from the liquid phase, considering the principles of fluid dynamics and mechanics. An engineering calculation of the hydrocyclone parameters is performed, an algorithm for computing concentrations and mass flows of oil sludge components is proposed, and the process simulation is implemented in the MATLAB environment. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed model in improving the accuracy and controllability of oil sludge processing technology.

Ключевые слова: нефтешлам, фазовое разделение, центробежная сила, гидроциклон, математическое моделирование, механические примеси, утилизация отходов, дифференциальные уравнения, MATLAB, технология переработки.

Keywords: oil sludge, phase separation, centrifugal force, hydrocyclone, mathematical modeling, solid impurities, waste treatment, differential equations, MATLAB, processing technology.

Введение

На сегодняшний день одной из приоритетных задач в области охраны окружающей среды является переработка и утилизация нефтешламов — сложных по составу отходов нефтяной промышленности. Эти отходы содержат не только воду и углеводороды, но и сверхмелкие твёрдые частицы, что значительно усложняет процессы их разделения и дальнейшей переработки.

Предварительный анализ показал, что с технической и экономической точек зрения, целесообразно использовать метод центробежного разделения фракций с применением гидроциклона.

Цель работы: Повышение эффективности процесса разделения сложных двухфазных нефтешламов, содержащих ультрадисперсные твердые частицы, путем разработки и математического моделирования технологической системы на базе параллельно и противоточного гидроциклона с автоматизированным цифровым управлением.

Материалы и методы

Структура гидродинамических течений в системе тел жидкой и твердой фазы. Рассмотрим гидродинамическое структурное течение систем жидкость-твердая фаза как идеальную модель смешения (рис.1). В результате интенсивного перемешивания поступающего в гидроциклон нефтешлама концентрация жидкой системы изменяется в единицу времени. Если проанализировать изменение концентрации с точки зрения количества твердых частиц, присутствующих в жидкой системе, то полученная концентрация относительно твердого тела уменьшается в единицу времени.



Рисунок 1. Структурная схема технологического процесса

Методология текущего исследования базируется на комплексном сочетании теоретических методов гидродинамики гетерогенных дисперсных систем, инженерных расчетов параметров центробежных аппаратов, математического моделирования массообменных процессов и численного эксперимента в программной среде MATLAB/Simulink.

Концептуальные основы гидродинамики потоков. В качестве теоретического базиса принят подход, рассматривающий нефть, нефтепродукты и образующиеся на их основе нефтешламы как сложные гетерогенные дисперсные системы. Данные системы состоят из множества компонентов, существенно отличающихся по своим физико-химическим и механическим свойствам, даже при их кажущейся внешней однородности.

Процесс фазового разделения высокодисперсной смеси в рабочей камере гидроциклона с параллельно- и противоточной структурой потоков интерпретируется как идеальная модель смешения. Интенсивное центробежное перемешивание поступающего сырья приводит к непрерывному изменению концентраций жидкой и твердой фаз в единицу времени. В рамках данной модели предполагается, что концентрация твердых высокодисперсных частиц в объеме удерживаемой жидкой технологической системы монотонно снижается по мере прохождения через зоны сепарации аппарата.

Математическое моделирование процесса разделения фаз. Для формализации динамики изменения концентраций компонентов и объема удерживаемой жидкости, выгружаемой совместно с механическими примесями, разработана система дифференциальных уравнений. Изменение относительного содержания жидкой фазы в отделяемом твердом осадке описывается уравнением (1):

$$da_m / dt = (a_c - a_m) / \tau_m \quad (1)$$

где: a_c — исходная концентрация жидких компонентов в поступающей смеси, %; a_m — текущая концентрация жидкой фазы, содержащейся в выделенном твердом продукте, %; τ_m — среднее время пребывания разделяемой фазы в рабочей камере гидроциклона, с.

Параметр среднего времени пребывания твердых частиц (τ_m) определяется их массовым балансом и рассчитывается по формуле (2):

$$\tau_m = m_{sh} / (G_{n.sh} - G_n) \quad (2)$$

где: m_{sh} — общая масса нефтешлама, одновременно находящегося в рабочей камере сепаратора, кг; $G_{n.sh}$ — массовый расход исходного нефтешлама на входе в аппарат, кг/с; G_n — массовый расход очищенной чистой нефти на выходе из гидроциклона, кг/с.

В свою очередь, общая масса смеси в рабочей камере выражается как произведение объема камеры на среднюю плотность обрабатываемой суспензии. Изменение концентрации механических примесей на выходе из аппарата ($Q_{m.chiq}$) в зависимости от входной концентрации ($Q_{m.kir}$) формализуется следующим образом (3):

$$dQ_{m.chiq} / dt = (Q_{m.kir} - Q_{m.chiq}) / \tau_m \quad (3)$$

Количественный выход очищенной нефтяной фазы (G_n) рассчитывается с применением безразмерного коэффициента разделения гидроциклона (k) (4):

$$G_n = k \cdot G_{n.sh} \quad (4)$$

Инженерная методика расчета конструктивных параметров. Для проектирования геометрии параллельно- и противоточного аппарата используется математическая связь между секундной производительностью по исходной суспензии (V_{sek} , м³/с) и перепад давления в циклоне (ΔP) (5):

$$V_{sek} = \mu_0 \cdot (\pi \cdot d_{kir}^2 / 4) \cdot \sqrt{(2\Delta P / \rho_c)} \quad (5)$$

где: μ_0 — коэффициент расхода; d_{kir} — диаметр входного питающего патрубка, м; ρ_c — средняя плотность исходной суспензии нефтешлама, кг/м³.

С учетом масштабирования к конструктивному диаметру корпуса гидроциклона (D) и диаметру разгрузочной нижней трубы (d_0), общее уравнение расхода принимает вид (6):

$$V_0 = K \cdot D \cdot d_0 \cdot \sqrt{(\Delta P)} \quad (6)$$

На основании серии предварительных экспериментов значение комплексного масштабного коэффициента принято равным $K = 0,5$.

Кинетика центробежного осаждения ультрадисперсных частиц. Скорость течения многофазной среды внутри гидроциклона раскладывается на три пространственные составляющие: тангенциальную (ω), радиальную (v_r) и продольную (v_z). Величины указанных скоростей определяются как функции локального давления (P), радиального расстояния от оси аппарата (r) и текущей высоты сечения (z) (7):

$$\omega, v_r, v_z = f(P, r, z) \quad (7)$$

При моделировании движения ультрадисперсных частиц в интенсивном поле центробежных сил силами тяжести и Архимеда можно пренебречь. Для мелкодисперсной фракции, осаждение которой протекает в ламинарном режиме и подчиняется закону Стокса (при критерии Рейнольдса $Re < 0,2$), уравнение баланса центробежной силы и силы сопротивления среды записывается в виде (8):

$$(\pi \cdot d_r^3 / 6) \cdot \rho \cdot [\omega(r)]^2 / r = 3\pi \cdot d_r \cdot \mu_c \cdot (dr / dt) \quad (8)$$

Интегрирование данного дифференциального уравнения по времени (τ) в границах радиусов разделения от r_1 до r_2 позволяет определить время седиментации частиц (9):

$$\tau = (18\mu_c / 2\omega^2\rho) \cdot \ln(r_2 / r_1) \quad (9)$$

Предельный (максимальный) диаметр ультрадисперсных частиц (d_r), гарантированно извлекаемых из жидкой фазы нефтешлама при заданном режиме, рассчитывается по формуле (10):

$$d_r = \sqrt{[(18\mu_c \cdot r_1 \cdot V_c) / (\rho_1 - \rho) \cdot \omega_i]} \quad (10)$$

Алгоритмизация и алгоритм численного моделирования. Синтезированная система алгебраических и дифференциальных уравнений положена в основу численного алгоритма расчета мгновенных концентраций и массовых потоков разделяемых фаз нефтешлама. С целью анализа динамических характеристик исследуемого процесса и формирования контуров автоматического цифрового управления технологической системой, математическая модель реализована в пакете расширения Simulink системной среды инженерных расчетов MATLAB.

Моделирование технологического процесса - процесс получения данных, характеризующих ход процесса, и формирование на этой основе системы автоматического управления. Видом моделирования является разработка дифференциальных или линейных уравнений для классификации необходимых стадий процесса. В настоящее время расчеты проводятся на основе специальных программ для определения параметров, влияющих на процесс, и организации оптимального управления технологической системой.

Результаты и их обсуждение

Компонентный состав и физико-химические особенности сырья. Эффективность разработанной математической модели разделения фаз напрямую зависит от корректного учета многокомпонентного состава перерабатываемых промышленных отходов. Нефтяные шламы, образующиеся на различных этапах жизненного цикла углеводородов (в резервуарах для хранения, при транспортировке и в процессе бурения скважин), классифицируются на два выраженных типа: плавающие и осадочные.

Для верификации разработанных математических уравнений и оценки применимости комбинированных гидроциклонов были проанализированы средние статистические показатели распределения фаз на нефтеперерабатывающих предприятиях (Таблица 1).

Таблица 1.

Средние статистические показатели распределения фаз на нефтеперерабатывающих предприятиях

Тип нефтяного шлама	Массовая доля нефти, %	Массовая доля механических примесей, %	Массовая доля воды, %
Плавающий шлам (на примере НПЗ объемом 5000 т)	98,0	1,3 – 1,4	0,6 – 0,7
Осадочный шлам (донные отложения резервуаров)	58,0 – 60,0	22,0	18,0 – 20,0
Усредненное расчетное значение сырья	80,0	12,0	6,0 – 8,0

Высокое содержание дисперсной твердой фазы (до 22 % в осадочных формах) и стабильных эмульсий подтверждает, что традиционные методы гравитационного отстаивания экономически неэффективны и требуют значительных временных затрат. Это обуславливает необходимость перевода технологического процесса в интенсивное поле центробежных сил [9].

Анализ материальных балансов разделения в гидроциклоне

На основе выведенных усредненных параметров сырья (80 %-нефть, 12 % - механическая смесь, 8 % - вода) была проведена количественная оценка материальных потоков для гидроциклонной установки со средней объемной производительностью $V_0 = 300$ л/ч.

В процессе численного расчета распределения компонентов в рабочей зоне аппарата установлено, что часовое поступление компонентов в составе единого потока суспензии эквивалентно следующим абсолютным значениям:

1. объемный поток чистой нефтяной фазы - 240 л/ч;
2. объемный поток механических ультрадисперсных примесей - 36 л/ч;
3. объемный поток свободной и эмульгированной воды - 24 л/ч.

Применение разработанной математической модели позволило непрерывно отслеживать изменение граничных концентраций фаз. В рамках концепции идеального смешения было подтверждено, что ввиду высокой интенсивности вихревого течения, изменение концентрации твердых ультрадисперсных частиц происходит во всем рабочем объеме камеры сепарации, обеспечивая градиентный перенос мелкодисперсного осадка к периферии (стенкам аппарата) и чистого нефтяного слоя к центральной оси отбора [10].

Выводы

Разработка математического описания: Было создано детальное математическое описание исследуемого объекта. Доказано, что гидродинамическую структуру высокоинтенсивных вихревых течений в рабочей камере гидроциклона с параллельной и противоточной структурой потоков обоснованно рассматривать как модель идеального смешения. С этих позиций была синтезирована обобщенная математическая модель процесса сепарации, позволяющая непрерывно отслеживать мгновенные граничные концентрации компонентов и объемы удерживаемых фаз.

На базе разработанных дифференциальных и алгебраических уравнений были определены функциональная схема автоматизированного цифрового управления процессом разделения нефтешлама, а также динамические характеристики основных параметров управления.

С целью проведения численного эксперимента и верификации модели алгоритм был успешно реализован в системном пакете расширения Simulink инженерной среды MATLAB. Результаты моделирования подтвердили высокую адекватность созданной модели реальному технологическому объекту и продемонстрировали её применимость для оптимизации и автоматизации промышленных систем переработки стойких амфифильных отходов нефтепереработки.

Список литературы

1. Ахметов А.Ф., Ахметшина М.Н., Десяткин А.А., Хафизов Ф.Ш. Создание агрегативно-устойчивых топливных смесей на основе тяжёлого котельного топлива и нефтешлама // Химические реактивы, реагенты и процессы малотоннажной химии: Тез. докл. XIII Междунар. науч.-практ. конф. – 2000.

2. Елашева О.М., Баландин Л.Н. Асфальто-смолистые парафиновые отложения нефтедобывающих регионов России – альтернативное сырье для производства парафино-церезиновых композиций и битумов. // Промышленные и бытовые отходы. Проблемы и решения. Мат. конф. Ч.1. Уфа, 1996.
3. Жумаев, К.К., Махмудова, Н.С., Шомуродов, А.Ю. & Яхьяев, Н.Ш. Mathematical model of the process of phase separation of oil sludge under the influence of centrifugal force. Mathematical model of the process of phase separation of oil sludge under the influence of centrifugal force. 10(11), 539–544 [Электронный ресурс]. – 2020. URL: <https://indianjournals.com/article/aca-10-11-084> (дата обращения: 13.07.2026).
4. Жумаев К.К., Шомуродов А.Ю.К. К. Жумаев, А.Ю. Шомуродов. Исследование и разработка комплексной технологии разделения нефтяных шламов в поле центробежных сил. Science and education. ISSUE 3. 2020. P.149–154 [Электронный ресурс]. – 2020. – Т. 1. URL: <https://paper.researchbib.com/view/paper/249885> (дата обращения: 13.07.2026).
5. Коршунова, Т.Ю. Нефтешламы: состояние проблемы в Российской Федерации и методы снижения их отрицательного воздействия на окружающую среду / Т.Ю. Коршунова, О.Н. Логинов [Электронный ресурс]. // Экобиотехнология. URL: <https://ecobiotech-journal.ru/2019/pdf/ecbtch1901075.pdf> (дата обращения: 13.07.2026).
6. Патент РФ № 2785432. «Установка для комплексной переработки нефтешламов с использованием каскада гидроциклонов». 2022.
7. Патент РФ №2112758. “Способ получения керамзита” Шпербер Р.Е., Шпербер Е.Р. Шпербер Ф.Р. 2023.
8. Шодиев А.З., Жумаев К.К. Шодиев. А.З., Жумаев К.К. Причины образования нефтяных шламов, воздействие на окружающую среду и эффективные методы их утилизации. Universum: технические науки: научный журнал.(133). Часть 6., М., Изд. «МЦНО», 2025. – Электрон. версия печ. публ. 47–50 с [Электронный ресурс]. – 2025. – № 4. – 68 с. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prichiny-obrazovaniya-neftyanyh-shlamov-vozdeystvie-na-okruzhayuschuyu-sredu-i-effektivnye-metody-ih-utilizatsii> (дата обращения: 13.07.2026).
9. Шодиев А.З., Жумаев К.К. Шодиев. А.З., Жумаев К.К. Neft shlamlarini hosil bo'lish sabablari, atrof-muhitga ta'siri va ularni zararsizlantirishning samarali usullari. Development of science. Ilmiy jurnal 2025/4 VOLUME 1. ISSN 3030–3907 40–52 b [Электронный ресурс]. // Development of science. Ilmiy jurnal. – 2025. URL: <https://devos.uz/article.php?id=349> (дата обращения: 13.07.2026).
10. Zhumaev K.K., Yaxyoyev N.Sh., Shomurodov A.Y.K.K. Zhumaev, N.Sh. Yaxyoyev., AY Shomurodov. Research and development of an integrated technology for the separation of oil sludge in the field of centrifugal forces. – Развитие науки и технологий. Научно-технический журнал, 2020. С.30–34 [Электронный ресурс]. // Развитие науки и технологий. Научно-технический журнал. – 2020.

References

1. Akhmetov A.F., Akhmetshina M.N., Desyatkin A.A., Khafizov F.Sh. [Creation of aggregatively stable fuel mixtures based on heavy fuel oil and oil sludge] // Khimicheskie reaktivy, reagenty i protsessy malotonnazhnoj khimii: Tez. dokl. XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. – 2000. (In Russ.)
2. Elasheva O.M., Balandin L.N. [Asphalt-resinous paraffinic deposits of oil-producing regions of Russia – alternative raw materials for the production of paraffin-ceresin compositions and bitumens] // Promyshlennyye i bytovyye otkhody. Problemy i resheniya. Mat. konf. Ch.1. Ufa,. – 1996. (In Russ.)
3. Жумаев, К.К., Махмудова, Н.С., Шомуродов, А.Ю. & Яхьяев, Н.Ш. [Mathematical model of the process of phase separation of oil sludge under the influence of centrifugal force] – 2020. – URL: <https://indianjournals.com/article/aca-10-11-084> (дата обращения: 13.07.2026). (In Russ.)
4. Zhumaev K.K., Shomurodov A.Yu.K.K. [Zhumaev A.Yu. Shomurodov. Investigation and development of integrated technology for separation of oil sludges in the field of centrifugal forces. Science and education. ISSUE 3. 2020. P.149–154] – 2020. (data obrashcheniya: 13.07.2026) – 2026. – Т. 1. – URL: <https://paper.researchbib.com/view/paper/249885> (дата обращения: 19.08.2026). (In Russ.)
5. Korshunova T.Yu., Loginov O.N. [Oil sludges: state of the problem in the Russian Federation and methods for reducing their negative impact on the environment] // Ekobiotekhnologiya. (data obrashcheniya: 13.07.2026). – 2026. – URL: <https://ecobiotech-journal.ru/2019/pdf/ecbtch1901075.pdf> (дата обращения: 19.08.2026). (In Russ.)
6. [RF Patent No. 2785432. 'Installation for integrated processing of oil sludges using a cascade of hydrocyclones'. 2022] (In Russ.)
7. Patent RF №2112758. “Sposob polucheniya keramzita” Shperber R.E., Shperber E.R. [Sherber F.R. 2023] (In Russ.)
8. Shodiev A.Z., Zhumaev K.K. [Shodiev. A.Z., Zhumaev K.K. Causes of oil sludge formation, impact on the environment and effective methods for their disposal. Universum: engineering sciences: scientific journal.(133). Part 6., M., Publishing House 'MCNO', 2025]. – Elektron. versiya pech. publ. 47–50 c – 2025. – 68 s. (data obrashcheniya: 13.07.2026) – 2026. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prichiny-obrazovaniya-neftyanyh-shlamov-vozdeystvie-na-okruzhayushchuyu-sredu-i-effektivnye-metody-ih-utilizatsii> (дата обращения: 19.08.2026). (In Russ.)
9. Шодиев А.З., Жумаев К.К. [Shodiev. A.Z., Zhumaev K.K. Reasons for the formation of oil sludges, their impact on the environment and effective methods for their neutralization. Development of science. Scientific journal 2025/4 VOLUME 1. ISSN 3030–3907 40–52 b] // Development of science. Ilmiy jurnal. – 2025. – URL: <https://devos.uz/article.php?id=349> (дата обращения: 13.07.2026). (In Russ.)

-
10. Zhumaev K.K., Yaxyoyev N.Sh., Shomurodov A.Y.K.K. Zhumaev N.Sh. Yaxyoyev., AY Shomurodov. Research and development of an integrated technology for the separation of oil sludge in the field of centrifugal forces. – Развитие науки и технологий. Научно-технический журнал, 2020. С.30–34 // Развитие науки и технологий. Научно-технический журнал. – 2020.