



Инновационные подходы к минимизации рисков, связанных с накоплением бурового шлама. Обзор

Р. А. Исмаилова¹✉, Э. Н. Алиев¹, С. А. Герайбейли,² Ф. С. Гахраманова¹

¹Научно-исследовательский институт «Геотехнологические проблемы нефти, газа и Химия» Баку, Азербайджан, e-mail: ruqiyya.ismailova@mail.ru

²Азербайджанский Государственный университет Нефти и Промышленности. Баку, Азербайджан

Поступила в редакцию: 23.03.2026 г.; после доработки: 11.05.2026 г.; принята в печать: 29.05.2026 г.

Аннотация – На всех этапах жизненного цикла бурового шлама, начиная с добычи нефти и заканчивая его транспортировкой и утилизацией, происходит воздействие на окружающую среду, которое имеет значительные экологические последствия. Это воздействие включает в себя влияние на климатическую систему через выбросы, связанные с разложением бурового шлама, а также недостатки в технологиях его обработки и утилизации. Вопросы минимизации воздействия на окружающую среду требуют создания эффективного управления для снижения рисков, связанных с катастрофическим накоплением бурового шлама. В статье представлены инновационные системы, демонстрирующие возможность управления процессом бурения нефтяных скважин, и как это ни парадоксально, с привлечением бурового шлама. Рассмотрены примеры новых технологий, альтернативных традиционным способам обработки бурового шлама, позволяющих осуществить выбор эффективных направлений его утилизации: флюидной экстракции в сверхкритических и критических состояниях экстрагента, плазменной обработки, фильтрации бурового раствора.

Ключевые слова: буровой раствор, буровой шлам, риски накопления, управление отходами бурения, обработка, инновации.

Technologies for elimination of chemical hazards

Innovations in Mitigating the Risks from Drill Cuttings Accumulation. A Review

Rugiya A. Ismailova¹✉, Elshan N. Aliyev¹, Samira A. Garaybeyli², and Fidan S. Gahramanova¹

¹Scientific Research Institute of Geotechnological Problems of Oil, Gas and Chemistry, Baku, Republic of Azerbaijan, e-mail: ruqiyya.ismailova@mail.ru

²Azerbaijan State University of Oil and Industry. Baku, Azerbaijan

Received: March 23, 2026 Received: May 11, 2026; Accepted May 29, 2026

Abstract – The life cycle of drill cuttings across all stages – from oil production and transportation to disposal – leaves an ecological footprint that causes serious harm to society. This includes impacts on

climate change due to environmental emissions associated with decomposition, as well as inefficient treatment and disposal technologies. Minimizing environmental impact requires the establishment of effective management strategies to mitigate risks associated with the catastrophic accumulation of drill cuttings. This article presents innovative systems demonstrating the feasibility of managing the oil well drilling process by, paradoxically, utilizing the drill cuttings themselves. The study examines examples of new technologies that serve as alternatives to traditional processing methods, enabling the selection of efficient disposal pathways: supercritical and critical fluid extraction, plasma treatment, and drilling mud filtration.

Keywords: drilling fluid, drill cuttings, accumulation risks, separation, drilling-waste management, processing.

ВВЕДЕНИЕ

В современном обществе нефть занимает центральное место в производстве различных потребительских товаров. Однако каждый этап жизненного цикла нефти, от бурения до переработки и транспортировки, сопровождается экологическими последствиями, которые могут нанести вред окружающей среде и негативно сказаться на условиях существования человека, флоры и фауны.

Основными отходами нефтегазодобывающей промышленности по массе являются отходы, образующиеся в результате бурения, содержащие от 5% до 20% сырой нефти.

На первом этапе жизненного цикла нефти, когда создаются скважины, буровые растворы (БР) играют важную роль в эффективности процесса бурения. Они необходимы для смазывания бурового долота, поддержания гидростатического давления в скважине, контроля пластового давления и извлечения бурового раствора, содержащего обломки породы, на поверхность. В результате этого процесса отделяется твердая фаза – буровой шлам. С другой стороны использование БР в процессе бурения сопровождается образованием таких отходов как отработанный буровой раствор, буровой шлам и буровые сточные воды. Эти отходы возникают в результате промывки бурового оборудования и буровой площадки [1–3].

Буровые шламы представляют собой многокомпонентную смесь, содержащую те же химические элементы, частицы и глинистые минералы, что и буровые растворы. В составе шлама присутствуют тяжёлые металлы (Pb, Cd, Hg, Cr, Ni, Zn), остатки полимерных добавок, углеводороды, водорастворимые ионы (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}), проникающие из пластовых вод и буровых растворов. В зависимости от расположения скважины, используемого бурового раствора и технологии бурения состав бурового шлама в среднем может варьироваться до значений: нефтепродукты 7%, соединения тяжёлых металлов 6%, минеральные соли 16,8% [4, 5]. Многие ученые указывают на негативное воздействие полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), содержащихся в буровом шламе, на природу. Эти вещества опасны из-за своих канцерогенных и мутагенных свойств [6, 7, 8].

БР, содержащие углеводороды нефти, эффективны при глубоком бурении и в сложных геологических условиях. Однако отработанные буровые растворы,

включая ароматические углеводороды, парафины, олефины и нафтены, соли и тяжелые металлы, выносимые на поверхность вместе с буровым шламом, становятся токсичными загрязнителями. Летучие органические соединения углеводородов нефти, такие как бензол, этилбензол, толуол, и ксилол из-за испарения в атмосферу загрязняют воздух вблизи места бурения и представляют опасность для здоровья человека [9]. Контакт БР с почвой, грунтовыми водами и растениями может вызвать серьезные изменения в экосистемах и представлять опасность для живых организмов, как в наземной, так и в морской среде [10].

Увеличение спроса на нефть требует увеличения количества скважин, что приводит к росту буровых отходов. Это, в свою очередь, усиливает парниковый эффект, вызывает кислотные дожди и представляет угрозу для биоразнообразия из-за ухудшения качества и загрязнения водных ресурсов, включая грунтовые воды.

Высокое содержание общих углеводородов, даже в буровом растворе на водной основе, достигающее в некоторых образцах более 7 г/кг, а также превышение установленных норм содержания ПАУ способны нанести вред здоровью людей [11].

Присутствие в буровых отходах малого количества загрязнений может привести к ошибочному заключению об отсутствии вреда. Тем не менее, важно учесть, что присутствующие вредные включения, даже в малом количестве, могут проявить синергетический эффект, взаимодействуя друг с другом и нанести вред здоровью человека [12].

Отходы бурения, состоящие из бурового раствора и шлама, занимают второе место по объему среди отходов в нефтедобывающей отрасли. Например, норвежская нефтегазовая промышленность в 2016 году произвела 530000 тонн отходов, из которых 260000 тонн составляли буровые отходы, в основном шлам, загрязненный буровым раствором [13].

Отчеты Международной ассоциации производителей нефти и газа (IOGP) свидетельствуют об увеличении объема выбросов бурового шлама, загрязненного буровым раствором на углеводородной основе в море в различных регионах, включая Европу, Азию, Северную и Южную Америку, а также Океанию в период с 2019 по 2023 год. В этот период общий объем выброса увеличился более чем вдвое, с $6491 \cdot 10^3$ до $14493 \cdot 10^3$ тонн [14]. Большой объем выбросов буровых отходов представляет серьезную экологическую проблему.

Важность вопроса снижения экологической опасности, связанной с накоплением буровых отходов, вызывает повышенный интерес к публикациям по теме «буровые отходы». Результат поиска в базе данных Web of Science в период с 2010–2021 гг. показал, что ежегодно по этой теме публикуется в среднем 10 исследований [15]. Публикации рассматривают широкий круг вопросов, направленных на снижение экологических рисков. Они затрагивают множество проблем, связанных с геологическими условиями, технологиями бурения, составами буровых растворов, многокомпонентностью бурового шлама, методами его обработки и утилизации, а также со многими другими факторами.

Количество публикаций по странам за указанный период представлено на рисунке 1.

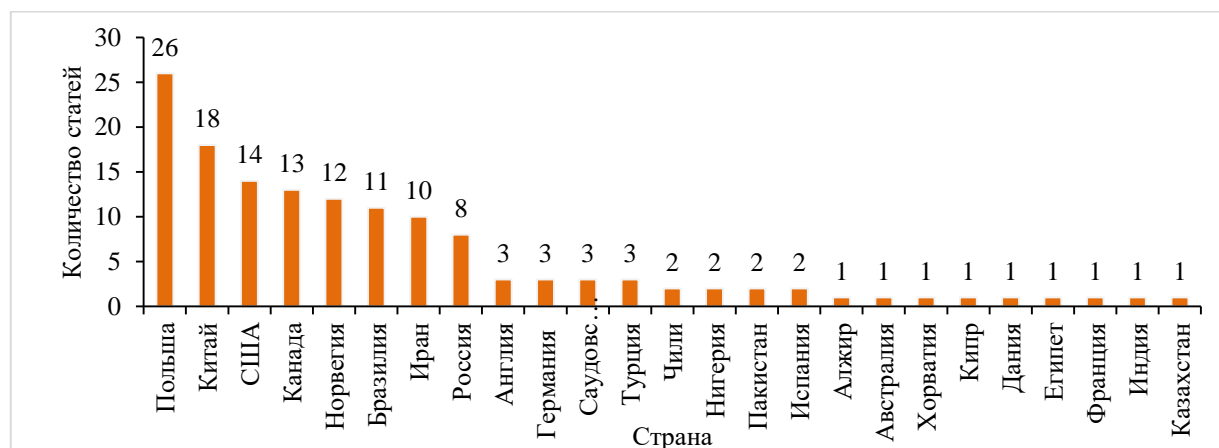


Рис. 1. Количество статей, опубликованных странами по темам «буровые отходы» или «отходы бурового раствора» в период 2010–2021 гг.

Fig. 1. Number of articles published by countries on the topics of 'drilling waste or drilling mud waste in the period 2010–2021.

Анализ жизненного цикла буровых отходов позволяет выбрать наиболее важные направления по управлению отходами. Приоритетным направлением является минимизация их воздействия в таких категориях как «Токсичность для человека», «Изменение климата», «Истощение ископаемого топлива» [16].

В связи с этим управление отходами, образующимися в процессе добычи нефти, следует рассматривать как ключевой аспект для снижения потенциальных экологических рисков. Это необходимо для обеспечения устойчивого и ответственного функционирования нефтегазовых проектов, а также для гарантии их надежной эксплуатации. Правильно выбранный вариант управления отходами на всех этапах нефтедобычи, с учетом современных технологий и оборудования, позволит смягчить антропогенное воздействие на окружающую среду [17].

В данном контексте целью настоящей статьи является ознакомление научного сообщества с актуальными направлениями инновационных технологий, касающихся использования бурового шлама в процессе бурения и оптимизации существующих методов его обработки.

РОЛЬ БУРОВОГО ШЛАМА В УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССОМ БУРЕНИЯ

Управление отходами нефтедобычи включает в себя все действия, которые обеспечивают момент выхода породы и бурового раствора на поверхность и последующую утилизацию, включающую превращение в безопасный продукт или захоронение. Буровой шлам, являющийся побочным продуктом бурения, представляет собой значительный объем отходов, требующий тщательного подхода к его утилизации. Для решения этой проблемы необходимо совершенствование существующих технологий или разработка инновационных методов, направленных на минимизацию

экологического ущерба. В то же время, буровой шлам играет важную роль в управлении процессами нефтедобычи, особенно на этапе бурения.

ОЦЕНКА УДЕРЖИВАЕМОГО КОЛИЧЕСТВА НЕФТИ В БУРОВОМ ШЛАМЕ

В связи с тем, что создание любых проектов начинается с прогнозирования, а процесс бурения является восходящим этапом разработки скважин, представляется интересным в первую очередь обратить внимание на прогнозирование при выборе нефтегазовых месторождений в сочетании с бурением.

Прогнозирование выбора нефтегазовых месторождений для разработки основано на оценке породы нефтяного бассейна, отправной точкой которой является определение содержания органического углерода. Глубина залегания и порой сложные условия бурения ограничивают отбор керна исследуемого нефтяного бассейна (материнского). Новый подход к обоснованию выбора месторождения для разработки основан на изучении бурового шлама, выносимого на поверхность, на содержание общего органического углерода.

Учитывая, что в процессе бурения используемый буровой раствор на нефтяной основе содержит дизельное топливо, окисленный асфальт и другие соединения органического углерода, результаты исследования могут привести к серьезным отклонениям от истинных значений запаса нефти. С учетом этого факта предлагаемое изобретение [18] включает следующие последовательные действия:

- определение содержания органического углерода в пробе бурового шлама из стандартной скважины и исследуемой скважины, загрязненной буровым раствором;
- обработка полученных данных для построения идентификационной диаграммы, оценивающей достоверность результата;
- получение на основе идентификационной диаграммы корректирующей формулы для контроля достоверности результата обработки;
- корректировка с помощью полученной формулы количества общего углерода в буровом шламе исследуемой скважины.

Пример идентификационной диаграммы представлен на рисунке 2.

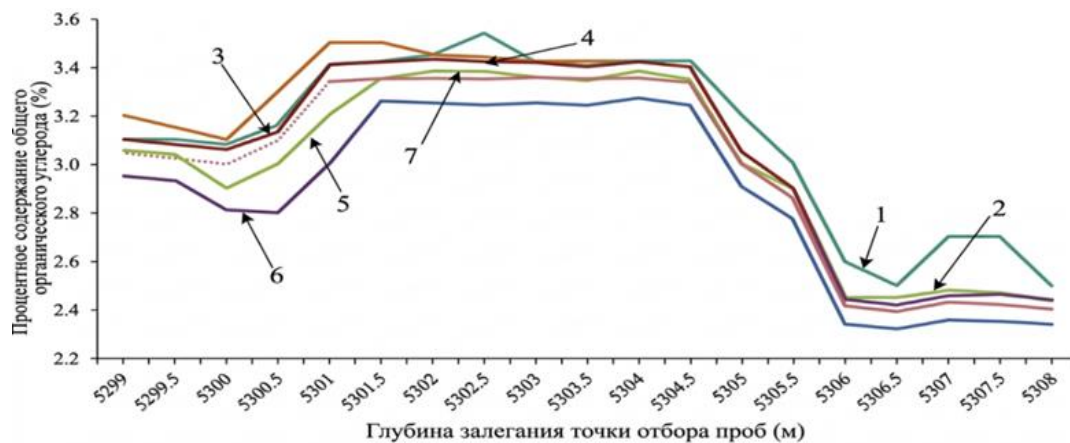


Рис.2. Диаграмма определения содержания общего органического углерода.

Fig. 2. Total organic carbon content identification diagram.

Диаграмма представляет собой двухмерный линейный график общего содержания органического углерода, основанный на данных измеренных и преобразованных блоком сбора данных, в образцах керна материнской скважины и бурового шлама, обработанных разными способами:

- 1 – промытые дистиллированной водой распылением под давлением;
- 2 – промытые горячей дистиллированной водой под давлением;
- 3 – замоченные и промытые дистиллированной водой;
- 4 – многократно замоченные и промытые дистиллированной водой;
- 5 – замоченные в техническом спирте (метанол) на 30 мин и промытые дистиллированной водой;
- 6 – замоченные в техническом спирте (метанол) в течении 5 часов и промытые дистиллированной водой;
- 7 – образцы керна материнской скважины.

Метод позволяет точно определять общее содержание органического углерода в породах даже в сложных геологических условиях и сверхглубоких скважинах.

Контроль содержания нефти также необходим непосредственно в самом процессе бурения. На данном этапе была разработана система визуализации для обнаружения нефти в буровом шламе, включающая источник ультрафиолетового излучения, адаптированный для облучения объема пробы, который взаимодействует с сырой нефтью, содержащейся в буровом шламе, и способен генерировать флуоресцентное фотонное излучение в видимой области электромагнитного спектра [19]. Флуоресценция сырой нефти обусловлена наличием ароматических соединений и сопряженных полиенов с π -электронами. На рисунке 3 представлена схема системы визуализации бурового раствора.



Рис. 3. Диаграмма системы визуализации бурового раствора.

Fig. 3. Diagram of the drilling visualization system.

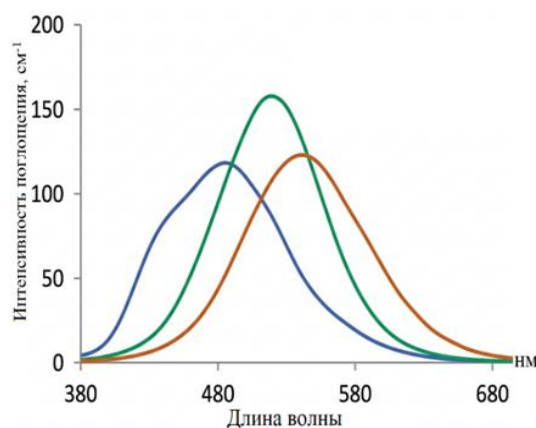


Рис. 4. Электромагнитные спектры функциональных групп сырой нефти.

Fig. 4. Electromagnetic spectra of crude fluid oil functional groups.

Система содержит источник УФ-излучения, состоящий из УФ-светодиода и оптического полосового фильтра, который фильтрует УФ-излучения,

пропуская излучения заданного диапазона в объем образца, расположенного на подложке. Система камер включает датчик изображения и объектив для захвата изображения исследуемого образца. Между системой камер и местом расположения образца может быть расположен оптический фильтр. Система визуализации также включает источник белого света, показания которого используют для корреляции при обработке изображений для определения количества нефти в исследуемом образце бурового шлама.

Под воздействием ультрафиолетового излучения зарегистрированные электромагнитные спектры в диапазоне 380–680 нм, отражающие возбужденные электроны функциональных групп, связанных с сырой нефтью в шлеме, показаны на рисунке 4.

В спектре широкополосное излучение в видимой области обусловлено перекрывающимся излучением от различных флуорофоров, присутствующих в образце. При включенном УФ-светодиоде (и выключенном источнике белого света) система камер может быть настроена на захват изображения видимых фотонов, испускаемых при флуоресценции образца. При исследовании образцов разных пород цвет отображенных электромагнитных спектров меняется.

Выносимый на поверхность буровой шлам подлежит обработке разными приемами для последующей утилизации. Количество нефти, которое может содержаться в шлеме после обработки должно соответствовать существующим нормативным стандартам. Измерение количества удерживаемой нефти лабораторным способом требует большой затраты времени и не обеспечивает точность измерения.

Установлены нормативные стандарты максимального количества нефти, которое может удерживаться в буровом шлеме после его утилизации. В настоящее время количество удерживаемой нефти измеряется вручную путем нагревания или сжигания образца бурового шлама в реторте на буровой площадке или в лаборатории. Повысить эффективность оценки количества удерживаемой нефти в буровом шлеме предлагается устройством, позволяющим провести измерение непосредственно при бурении скважины [20]. На рисунке 5 представлена система, позволяющая оценить количество нефти, удерживаемое в шлаке.

Бурение скважины 1 осуществляют с помощью установки 2, включающей бурильную трубу 3 с долотом 4 на конце бурильной трубы. Поток бурового раствора 6, после отработки с уносящимся шламом 7 через блок 5 по трубе 3 направляют по линии отвода 8 в систему обработки шлама 10. Клапан 9 регулирует подачу бурового раствора. Отделенный шлам по винтовому конвейеру 11 направляют в контейнер 12 для сбора шлама. Отделенную жидкость 12 транспортируют через ЯМР-прибор 13 с радиочастотной антенной 14, для измерения количества нефти. Электронная схема ЯМР 15 управляет ЯМР-прибором 13, включает подачу электрического тока на катушку 16, передачу радиочастотного импульса через антенну 14, прием ЯМР-сигнала в ответ на переданный радиочастотный сигнал, обработку ЯМР-сигнала для определения постоянной времени продольной релаксации/или постоянной

времени поперечной релаксации T_2 , а также вывод сигнала удержания нефти 17, который коррелируется с количеством нефти, удерживаемого буровыми отходами 11, на основе ЯМР-сигнала.

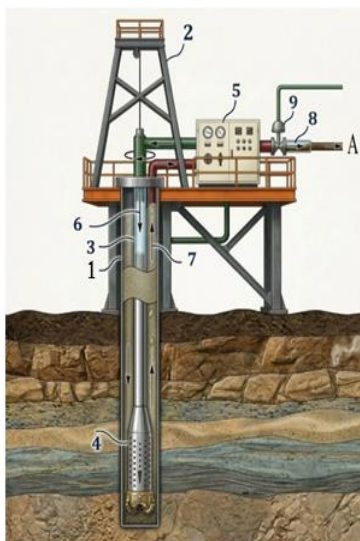


Рис. 5. Схема оценки количества нефти в буровом шламе.

Fig. 5. Scheme for estimating the amount of oil in drilling mud.

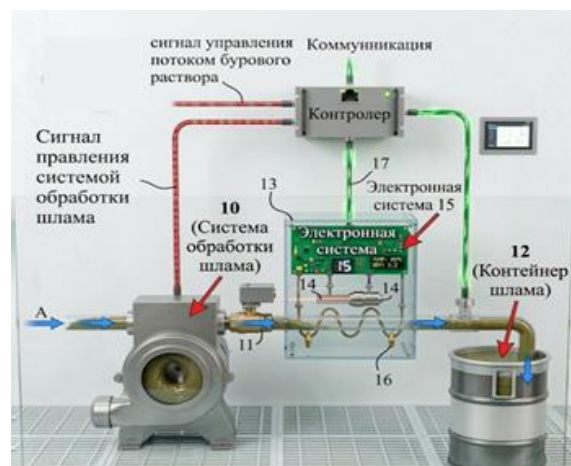


Рис. 5а. Сигнал управления.

Fig. 5a. Control signal.

Корреляция ЯМР-сигнала с количеством удерживаемой нефти может быть определена путем анализа, опыта и/или испытаний с использованием эталонных стандартов, имеющих известные характеристики. Если измеренное значение превышает пороговое значение удерживаемой нефти, автоматически меняют параметры обработки шлама перед утилизацией.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ СКВАЖИНЫ

Обычно определение глубины скважины связано с гидравликой бурового раствора в скважине, точного времени задержки обратного потока раствора в затрубное пространство, гравитационным накоплением обломков и прочего. Качество традиционных методов определения глубины как правило низкое. Предложенная система определения глубины скважины [21] по идентификации шлама из бурового раствора, выносимого на поверхность, позволяет улучшить интерпретацию зон пласта.

Система предусматривает наличие маркирующего узла для подачи возвратного (отработанного) бурового раствора, выбуренной породы и идентифицирующих наночастиц с уникальными флуоресцентными спектрами, способных прикрепиться к обломкам буровой породы. Например, с помощью адапторных процессоров по определению времени поступления отработанного раствора с «мечеными» наночастицами и их идентификации можно судить о глубине пластов. Пример образования наночастиц в процессе полимеризации стирола с участием «меченных» флуоресцентных изотианатов (FITC), показан на рисунке 6.

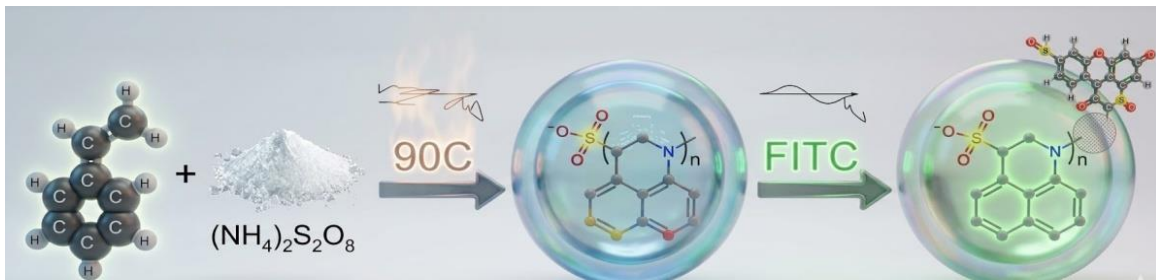


Рис. 6. Метод идентификации выбуренной породы.

Fig. 6. Method for determining cuttings.

Реализация системы определения глубины скважины представлена на рисунке 7.

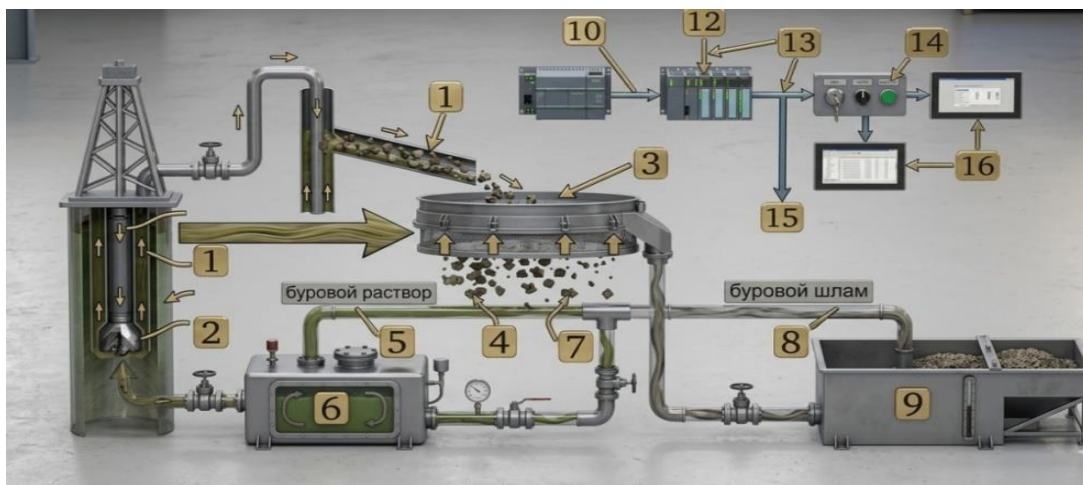


Рис.7. Система определения глубины скважины.

Fig. 7. Well depth determination system.

Возвратный буровой раствор 1 из скважины 2 направляют в систему вибрационного фильтрования 3. Отделенная жидкая фаза 4 по жидкостному каналу 5 поступает в резервуар для бурового раствора 6, используемого для циркуляционной подачи во внутреннюю трубу 7 скважины 2, а буровой шлам по каналу 8 направляют в яму 9 на утилизацию. Над системой вибрационного грохота 3 расположено устройство 10 для фиксации изображения шлама с наночастицами. Изображение через канал связи 11 подается в систему управления 12, включающую контролер искусственного интеллекта с двумя различными нейронными сетями. Первая сеть определяет флуоресцентные спектры наночастиц и передает их по каналу 13 в систему бурового раствора 14, а вторая система через канал 15 связана с системой высвобождения наночастиц 16, содержащей несколько контейнеров с выпускными клапанами для различных партий шлама, отличающимися уникальными флуоресцентными спектрами. При получении сигнала с системы управления 12 клапаны контейнеров открываются для сбора отделенных наночастиц в системе бурового раствора 14 для повторной подачи раствора во внутреннюю трубу 7 скважины 1.

КОНТРОЛЬ СОДЕРЖАНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Для безопасного и эффективного бурения важен контроль содержания ультрадисперсных частиц в циркулирующем буровом растворе. Наращивание их в процессе бурения может отрицательно повлиять на такие важные параметры бурового раствора как химический состав, гранулометрический состав, плотность жидкости и реологию, влияющие на эксплуатационные характеристики: увеличение крутящего момента долота, снижение скорости проходки, потеря бурового раствора, застревание труб и нанесение ущерба окружающей среде.

Контролируемое воздействие относительно ПАВ и добавок, входящих в состав буровых отходов, оказывает система [22], основанная на их термической деградации и разложении при повышении температуры и давления жидкой фазы. Разработанная система и графики давления и глубины на примере подаваемой суспензии, плотность которой составляет 1,47 кг/л, показана на рисунке 8.

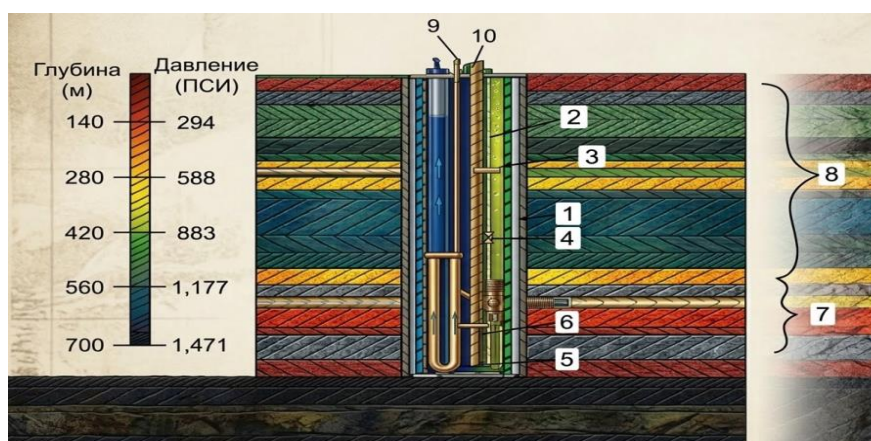


Рис.8. Система термической деградации отработанного бурового раствора.

Fig. 8. Thermal degradation system for waste drilling mud.

Внутри обсадной колонны 1 расположены наружная труба 2 и внутренняя труба 3, в которую подается отработанный буровой раствор. Отработанный раствор возвращается через затрубное пространство 4. На дне скважины в зоне гидротермальной дестабилизации 7 суспензия нагревается с помощью нагревательного элемента 5 с электрическим кабелем 6 до требуемой температуры для разделения отработанного раствора на масляную и водную фазы. Поток разделенных продуктов поступает в зону коалесценции 8, в которой происходит передача тепла между нагретым потоком и буровым раствором 9, поступающим из верхней части скважины 11. В зоне коалесценции содержащиеся в потоке продуктов разделения ультрадисперсные частицы за счет сил межмолекулярного притяжения при соприкосновении агрегируют, что приводит к устранению дисперсности. Поток продуктов 10 выводится на поверхность по межтрубному пространству. Система обеспечивает эффективное разделение отработанного раствора на нефть, воду и твердые вещества.

Использование предложенной системы позволит тщательно контролировать содержание буровых твердых частиц в циркулирующем буровом растворе, уменьшить процесс флокуляции и расслоение твердых частиц, присутствующих в буровом растворе. Буровые растворы на углеводородной и синтетической основе демонстрируют замечательную стабильность и устойчивость к флокуляции и расслоению, повышая тем самым эффективность буровых работ.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO₂

Обеспечение работы двигателя бурового долота связано со сжиганием топлива генераторами CO₂ в окружающую среду. Поскольку количество выделенного CO₂ пропорционально количеству потребляемого топлива, оптимизация различных параметров бурения, направлена на снижение его расхода, способствуя уменьшению загрязнения атмосферы.

Оптимизацию параметров бурения, снижающих выброс CO₂, предлагается осуществлять по схеме [23]:

- измерение серии механических параметров бурения и характеристика бурового раствора;
- определение индекса очистки скважины на основе концентрации бурового раствора в кольцевом зазоре (ССА) и индекса несущей способности;
- оценка гидравлического давления в скважине и в буровом долоте на основе измеренных параметров;
- расчет выбросов CO₂ в процессе бурения, исходя из удельной энергии бурения;
- определение параметров бурения, сводя к минимуму удельную энергию бурения и расчетные выбросы CO₂.

Один из вариантов мониторинга и оценки для снижения выброса CO₂ включает определение индекса очистки скважины (X), зависящий от концентрации бурового шлама в затрубном пространстве (ССА) и индексе несущей способности (CCI) по формулам:

$$x = \frac{CCI + CCA}{CCI - CCI \cdot CCA} \quad (1)$$

$$CCA = 0.0014 \frac{ROP \cdot OH^2}{GPM} \quad (2)$$

$$CCI = \frac{EMW \cdot K \cdot V_{ann-c}}{5871} \quad (3)$$

где: ROP – механическая скорость проходки долота;

EMW – эффективная плотность бурового раствора;

K – индекс консистенции потока в сантипуазах (сР), а V_{ann-c} – средняя скорость движения бурового раствора в затрубном пространстве.

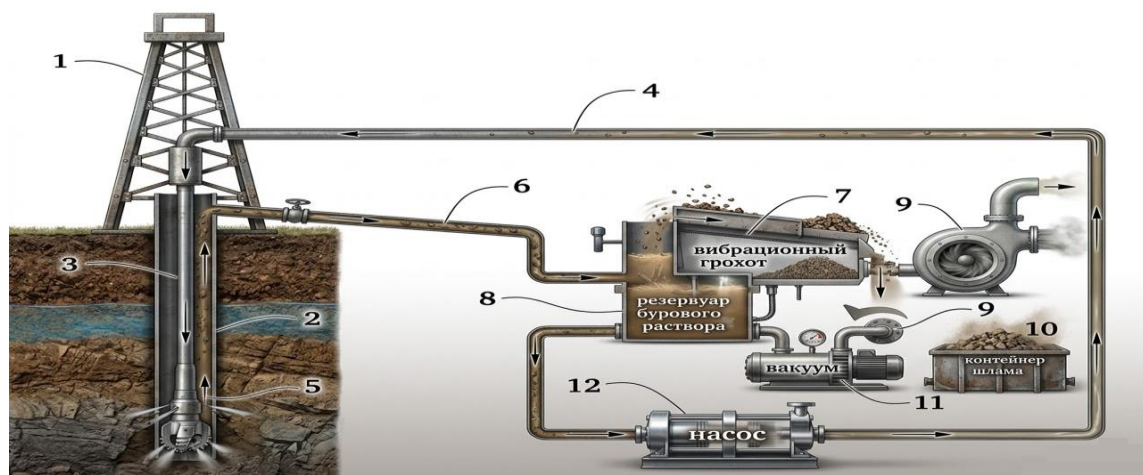


Рис. 9. Система оценки выбросов углекислого газа.

Fig. 9. Carbon dioxide emissions assessment system.

Буровая вышка 1 над скважиной 2, внутри которой, от поверхности земли до желаемой глубины, установлена рабочая колонна 3, к которой подсоединен трубопровод 4 для циркуляции бурового раствора. К кольцевому пространству 5, образованному между внешней поверхностью трубчатой рабочей колонны 3 и внутренней поверхностью скважины 2, подсоединен трубопровод 6 для транспортировки отработанного раствора.

В процессе поступления смеси бурового раствора и бурового шлама на вибрационные грохота 7 большая часть «свободного» жидкого раствора, пройдя через сита вибрационных грохотов 7, направляется в буровой резервуар 8. Отделившийся буровой шлам, содержащий примеси и проскочившие капли раствора, направляют в дополнительное разделительное устройство 9, откуда шлам сбрасывают в накопительный контейнер 10, а выделенный буровой раствор вакуумным насосом 11 возвращают в резервуар 8 для последующей циркуляции с помощью насоса 12.

ОБРАБОТКА БУРОВОГО ШЛАМА

Флюидная экстракция

Важную роль для снижения опасного воздействия на окружающую среду, связанного с накоплением буровых отходов, играет использование передовых технологий и лучших практик для их обработки и утилизации экологически безопасными и экономически эффективными способами.

Удаление общего органического углерода (ООУ) – в частности, общих углеводородов нефти (УВН) – из бурового шлама методом экстракции снижает количество опасных отходов и позволяет извлекать нефть для повторного использования. Для исследования возможности удаления ООУ методом экстракции выбраны три варианта: сверхкритическим диоксидом углерода, перегретым паром и сверхкритической водой [24].

Для экстракции перегретым паром образец бурового шлама загружают в лодочку экстракционной емкости и нагревают до 175–225°C. Проточную воду насосом при различном давлении от 0,6 до 5,5 МПа подают со скоростью 2–8

мл/минут в экстракционную емкость. После контакта перегретого пара с образцом, на дне емкости накапливается жидкая вода, а после охлаждения выгружается шлак [25].

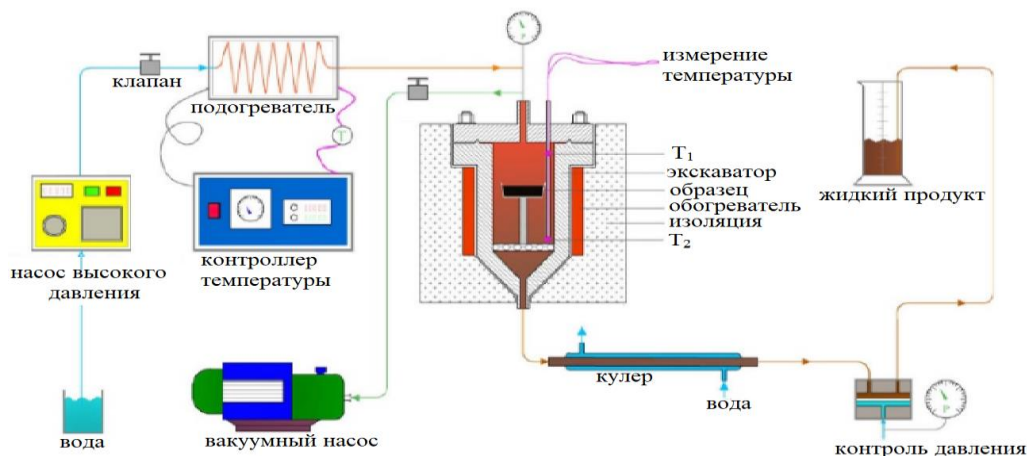


Рис. 10. Экспериментальная схема экстракции перегретым паром.

Fig. 10. Experimental scheme of extraction with superheated steam.

При температуре 175°C содержание ООУ в образце составило 73 мг/г, а с повышением температуры постепенно снижалось до 59 мг/г. Показано, что давление и скорость потока воды также влияют на содержание бурового шлака в образце. При рентгенодифракционном анализе и сканирующей электронной микроскопии не обнаружено значимых изменений микрокристаллической структуры образца. Использование воды позволяет считать процесс экологически чистым при условии анализа и очистки накопившейся жидкости перед сбросом. Возможность переработки бурового шлама, содержащего 80% воды и более, является главным преимуществом данной разновидности экстракции.

При экстракции сверхкритическим CO₂ буровые отходы помещают в экстракционный сосуд, закачивают CO₂ с температурой 318К бустерным насосом при давлении 18 МПа и выдерживают от 10 до 240 мин. Экстрагированное масло медленно подают в сепаратор для отделения CO₂.

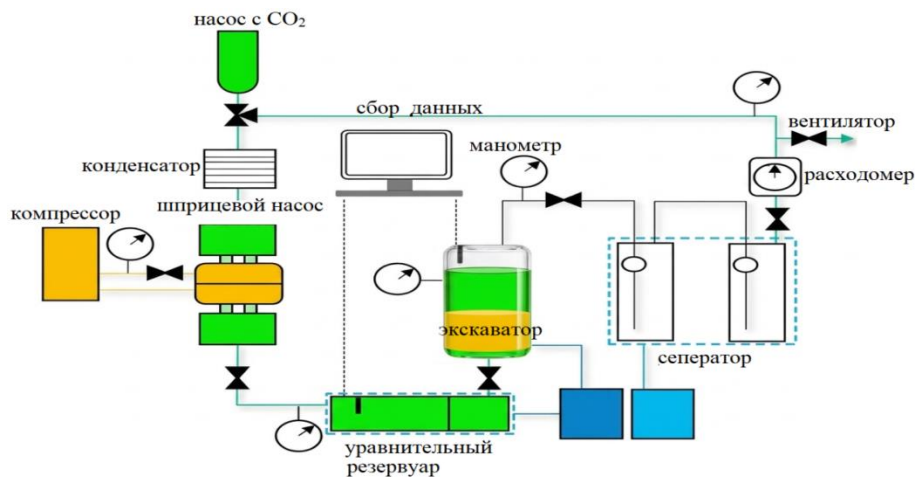


Рис. 11. Экспериментальная схема экстракции сверхкритическим диоксидом углерода.

Fig. 11. Supercritical carbon dioxide extraction experimental diagram.

При повышении температуры с 313К до 333К концентрация удаленных веществ, загрязняющих шлам увеличивается с 0,18 г/л до 0,22 г/л [26].

Эффективность экстракции зависит также от температуры, времени и массы сверхкритического CO_2 . Процесс обеспечивает высокое извлечение легких компонентов и n-алканов, которые могут быть повторно использованы. Измеренное содержание масла в образце до и после процесса с помощью ультрафиолетового спектрофотометра, показало снижение содержания ООУ. В структуре исследуемого образца не обнаружено изменений, свидетельствующих об экологической опасности технологии [26].

Значимые результаты показал метод окисления в сверхкритической воде. Процесс осуществлен в реакторе периодического действия при температуре до 500°C , времени реакции порядка 10 минут [27]. Большое влияние на степень извлечение ООУ оказал коэффициент окисления при его оптимальном значении равном 3,5. Осуществление процесса в течение 10 минут привело к увеличению степени извлечения углерода с 71,68% до 99,53%. Процесс осуществляется по схеме, отраженной на рисунке 12.

Несмотря на эффективность удаления органических загрязнителей из бурового шлама и отсутствие влияния на микроструктуру, а также состав неорганического компонента, отмечается присутствие технических проблем, которые проявляются в виде коррозии, отложения солей, наличия взвешенных твердых частиц.

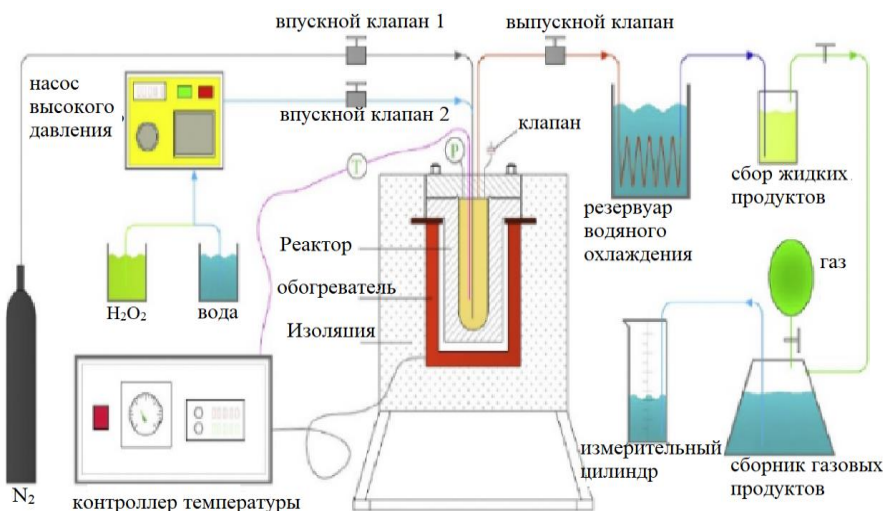


Рис. 12. Схема окисления буровых отходов в сверхкритической воде.

Fig. 12. Supercritical water oxidation of oil based cuttings experimental diagram.

Обработка плазмой

Содержащиеся в буровом шламе углеводороды с трудом поддаются разложению, и их масштабное накопление может привести к значительному воздействию на окружающую среду. Поэтому перед сбросом шлам необходимо обрабатывать. Используемый для этой цели пиролиз может сопровождаться такими промышленными рисками как накопление внутри оборудования легковоспламеняющихся газов, способных привести к авариям с выбросом токсичных веществ.

Альтернативой этому традиционному методу может стать инновационная технология плазменной газификации бурового шлама на нефтяной основе, возможность осуществления которой позволяет устройство, изображенное на рисунке 13 [28].

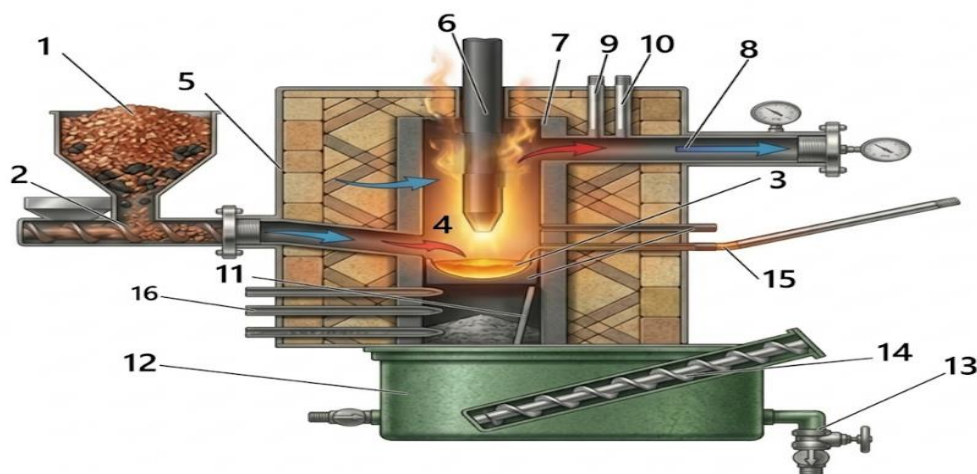


Рис. 13. Принципиальная схема плазменной газификации.

Fig. 13. Schematic diagram of plasma gasification.

Буровой шлам с помощью дозатора 1 через трубу 2 подают в тигель 3, установленный в камере газификации 4 печи 5. Высокотемпературный факел 6 обеспечивает температуру в печи 5, равную 1000–1850°C. Образующийся синтез-газ выводится через выходное отверстие 7 трубы 8. В верхней части печи 4 установлены датчики измерения температуры 9 и давления 10. В тигле 3 шлам при высокой температуре плавится и по полукруглому каналу 11 сливается в закалочную ванну 12. Подаваемая циркуляционная вода насосом 13 по конвейерной ленте 14 охлаждает расплавленный шлак, который затвердевает, образуя стекловидное тело, обладающее высокой прочностью, используемое в качестве строительного материала. Газифицирующий агент подают через отверстие 15. Для устранения градиента температуры в печи устройство снабжено защитным плазменным факелом 16.

Высокотемпературная плазменная газификация позволит избежать образования диоксидов, а также «запечатать» твердые вредные вещества в стекловидную оболочку и предотвратить вторичное загрязнение окружающей среды.

Известно устройство для реализации плазменной витрификации, предназначенной для обработки бурового шлама [29]. Устройство содержит печь 1 с герметичным корпусом, внутри которого горизонтально расположен распределитель подачи материала, представляющий цепной конвейер 2, бункер для подачи бурового шлама 3, отверстие для вывода расплавленного шлама 4, вывод дымовых газов 5. Над устройством подачи материала вдоль него размещены многочисленные плазменные генераторы 6. Внутри бункера подачи бурового шлама расположены две направляющие пластины 7 для предотвращения попадания пламени в бункер. Снаружи корпуса печи

установлен двигатель с регулировкой скорости, приводящий в движение устройство подачи материала. Устройство представлено на рисунке 14.



Рис. 14. Устройство плазменной витрификации бурового шлама.

Fig. 14. Device for plasma vitrification of drill cuttings.

Буровой шлам предварительно измельчают и подают в печь для пиролиза. Полученная зола через загрузочное отверстие непрерывно поступает в систему подачи материала. Плазменные генераторы работают поочередно при температурах, превышающих 3000°C . Полученное из расплавленной золы стекловидное тело, выводится через выходное отверстие. Непрерывный и высокоэффективный процесс двойной переработки бурового шлама обеспечивает получение стекловидного материала, который после дополнительной обработки находит применение в дорожном строительстве.

Еще одним примером использования плазмы для обработки бурового шлама может быть нетепловая плазма диэлектрического барьерного разряда (ДБР). Процесс изучен в реакторе типа «плоскость-сетка» при атмосферном давлении [30] (рис. 15).

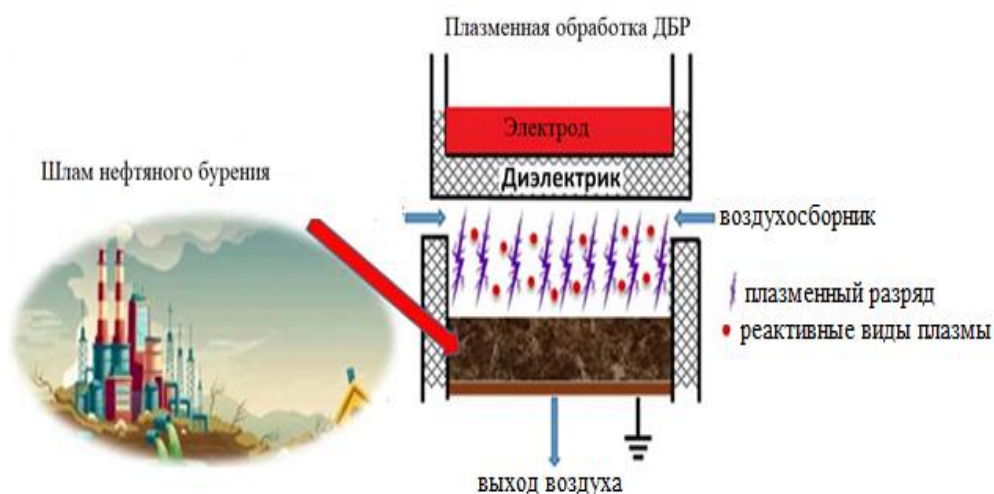


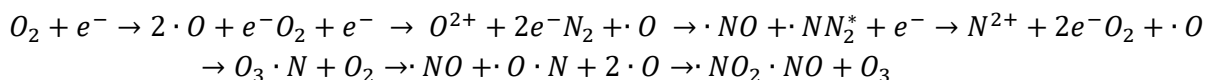
Рис. 15. Плазменная обработка бурового шлама.

Fig. 15. Plasma treatment of drill cuttings.

Обработка плазмой в течение 10 минут позволила достигнуть высокой степени удаления ООУ и общих углеводородов нефти (ОУН) (~90% и ~99% соответственно), тогда как разложение полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) достигло примерно 50% в течение 2 минут обработки.

Деградация бурового шлама

Реактивные формы кислорода (ROS) и азота (RNS), образующиеся в зоне плазменного разряда, являются основными факторами, способствующими деградации бурового шлама. В частности, при генерации электрического разряда в воздухе образуются озон (O₃) и оксиды азота (NO, NO₂, N₂O₅). В результате различных реакций могут образовываться дополнительные соединения:



Степень извлечения ООУ из сырой нефти, присутствующей в буровом шламе, зависит от времени обработки, мощности ДБР и скорости потока воздуха. Около 85% органических веществ, присутствующих в буровом шламе удалось трансформировать в CO₂ и CO в сверхкритических и критических состояниях.

ФИЛЬТРАЦИЯ БУРОВОГО ШЛАМА

Одно из направлений переработки буровых отходов связано с технологиями обработки скважинного осадка. Эти технологии позволят очищать воду от бурового шлама и использовать ее повторно во время бурения. При этом будут соблюдаться экологические нормы, и вода не будет сбрасываться на полигоны.

Примером использования такой технологии является устройство, осуществляющее эффективную фильтрацию бурового шлама (рис.16, 17) [31].

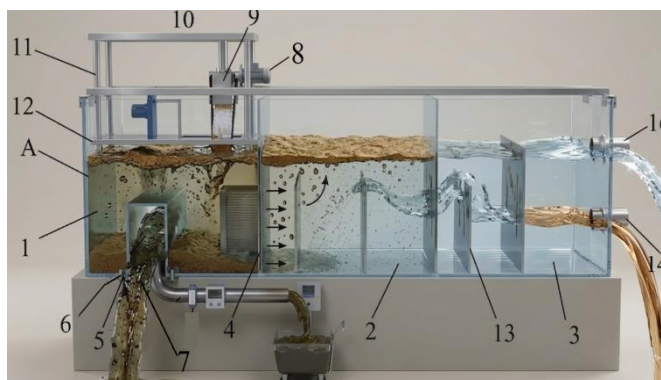


Рис. 16. Устройство для фильтрации воды из бурового шлама.

Fig. 16. Device for filtering water from drill cuttings.

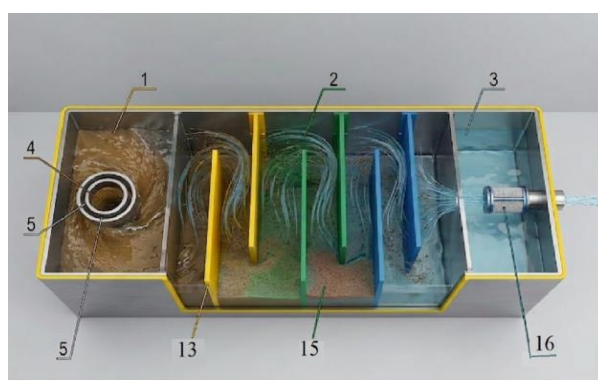


Рис. 17. Вид сверху устройства для фильтрации воды из бурового шлама.

Fig. 17. Top view of a device for filtering water from drill cuttings. Top view of mechanism for drill cuttings filtration water.

Предлагаемое устройство содержит три разделенных резервуара для воды слева направо 1, 2 и 3. Каждый из них выполняет свою функцию. Резервуары для воды 1 и 2 разделены фильтрующей пластиной 4. Дно резервуара для воды 1 снабжено втулкой 5 для соединения к буровому долоту. Уплотнительное кольцо 6 прилегает к внешней стороне втулки 5. Поток воды с мелкими частицами бурового шлама из зоны бурения поступает в резервуар 1 через отверстие 7 в нижней части. На крышке резервуара для воды 1 установлено фильтрующее устройство 8, включающее цилиндр 9. Поршень цилиндра 9 посредством пластины 10 и штока 11 связан с прижимной пластиной 12 и обеспечивает оседание вязкого осадка шлама из шламодержащей воды на дне резервуара 1, а отделенная вода проходит через фильтрующую пластину 4 в резервуар 2. Второй резервуар снабжен перегородками 13, обеспечивающими протекание осадочной воды по S-образному пути, увеличивая длину пути для полного осаждения перед ее поступлением в резервуар 3 для сброса через сливную трубу 14. На внутренней стенке резервуара 2 жестко установлены вставные блоки 15 для возможности замены перегородок 13. Водопроводная труба 16 обеспечивает подачу воды в резервуар 3 для поддержания уровня воды выше уровня обсадной трубы скважины. Очищенная вода может использоваться для рециркуляции в процессе бурения. На рисунке 17 показан вид сверху предложенного устройства.

Предложенный способ рециркуляции шламовой воды из скважин осуществим простой системой, не требующей дорогостоящего оборудования для комплектации. В результате рециркуляции снизится потребность воды для бурения и количество шламовых остатков в скважине.

Таким образом, в обзоре рассмотрены инновационные технологии для решения проблемы удаления трудно разлагаемых углеводородов из бурового шлама, образующегося при нефтедобыче.

Обработка буровых растворов поможет осуществить их утилизацию, что позволит снизить масштабность их накопления и уменьшить экологическое воздействие на окружающую среду.

ВЫВОДЫ

На сегодняшний день проблема обработки бурового шлама для последующей утилизации является одной из самых сложных в нефтяной отрасли. Объемы накопления бурового шлама и его неоднородность не позволяют решить вопрос минимизации наносимого вреда экосистеме стандартными методами и требуют создания высокотехнологичных процессов обработки.

В новых технологиях жидкостную экстракцию с использованием растворителей потеснила флюидная экстракция в сверхкритических и критических состояниях, в которых экстрагентом выступили сверхкритическая вода, сверхкритический CO_2 и перегретый пар. Каждая технология имеет свои преимущества, но с позиции влияния на экологию предпочтение следует отдать использованию сверхкритического CO_2 , исключая термическую

деградацию реагентов и выбросов в атмосферу CO₂ за счет рециклизации в системе.

Касаясь метода термической деструкции бурового шлама, следует отметить, что предлагаемые исследователями новые конструктивные решения систем плазменной обработки составят достойную конкуренцию традиционному пиролизу. Обработка бурового шлама плазмой обеспечивает полный распад сложных полимеров и тяжелых углеводородов и не требует его повторной обработки. Большие затраты энергии – это, возможно, единственный недостаток использования плазмы.

В дальнейшем целесообразно рассмотреть возможность интеграции анализируемых методик с целью компенсации недостатков одного подхода за счет преимуществ другого, а также оптимизации экономической эффективности процесса обработки.

Важным моментом являются выявленные инновации, демонстрирующие возможность использования бурового шлама как источника геологической и технологической информации для эффективного управления процессом бурения.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests

Список литературы / References:

1. Costa, C., Carvalho, C. F., Soares, A. S. F., Souza A. C. P., Bastos, F. T., Guimarães E. C. B. T., Santos, J. C., Carvalho, T., Calderari, V. H., L. S. Marinho, L. S., & Marques, M. R. C., (2023). Physical and Chemical characterization of drill cuttings: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342>.
2. Darajah, M. H., Karundeng, I., Setiati, R., & Wastu, A. R. (2021). Drilling waste management using zero discharge technology with Drill Cutting Re-injection (DCRI) method forenvironmental preservation. International Conference on Research Collaboration of Environmental Science IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 802, 012046 IO. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/802/1/012046>.
3. Antia, M., Ezejiofor, A. N., Obasi C. N., & Orisakwe O. E. (2022) Environmental and public health effects of spent drilling fluid: An updated systematic review. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 7, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100120>.
4. Kazamias G., & Zorpas A. A. (2021). Drill cuttings waste management from oil & gas exploitation industries through end-of-waste criteria in the framework of circular economy strategy. *Journal of Cleaner Production*. 322(4), 129098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129098>
5. Gaevaya, E., Tarasova, S., & Bytsko, A. (2019). The Environmental Impact of Drilling Sludge and Ways of Their Utilization. *Journal of Ecological Engineering*. 20(7), 26–30. <https://doi.org/10.12911/22998993/109764>.
6. Cui, Z., Wang, Y., Du, L., & Yu, Y. (2022). Contamination level, sources, and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in suburban vegetable field soils of Changchun, Northeast China. *Scientific Reports* 12, 11301. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15285-5>.

7. Zhang, R., Wang, Y., Zhang, Y., & Bai., Y. (2023). Distribution, Sources, and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil of Helan, China. *Sustainability*. 15(24), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su152416667>.
8. Loss, L., Cavali, M., Freitas, A. A., & Kubeneck, S., Leme, G. C. O., Calvo, A., Soares, S. R. Castilhos Junior, A. B. (2026). Environmental aspects of drill cuttings from oil operations: characterization, risk assessment, valorization, and treatment innovations. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 23(307), 2–32. <https://doi.org/10.1007/s13762-026-07078-4>.
9. Deng, Y., Yin, H., Chen, Z., Chen, Y., He, D., Gong, H., Jiao, Z., Yao, S., & Tu, P. (2022). Research Progress and Prospects on the Treating and Disposal for Waste Oil- Based Drilling Cuttings from Shale Gas Wells. *Geofluids*. <https://doi.org/10.1155/2022/8208912>.
10. Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Emran, T. B., Nainu, F., Khusro, A., Idris, A. M., Khandaker, M. U., Osman, H., Alhumaydhi, F. A., & Simal-Gandara, J. (2022). Impact of Heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University Science*, 34(3)101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>.
11. Siddique, S., Kwoffie, L., Addae-Afoakwa, K., Yates, K. & Njuguna, J. (2017). Oil Based Drilling Fluid Waste: An Overview on Environmentally Persistent Pollutants. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 195(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/195/1/012008>.
12. Allagoa, M. (2024). *Managing Drill Cuttings Waste in Our Age. In: Perspectives and Insights on Soil Contamination and Effective Remediation Techniques*.16. 1006868. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1006868>.
13. Daae H.L, Heldal K.K, Madsen A.M, Olsen R, Skaugset N.P, & Graff P. (2019). Occupational exposure during treatment of offshore drilling waste and characterization of microbiological diversity. *Science of The Total Environment*. 1(681), 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.131>.
14. Loss, L., Cavali, M., Freitas, A.A., Kubeneck, S., Leme, G.C.O., Calvo, A., Soares, S.R., Castilhos & Junior, A. B. (2026). Environmental aspects of drill cuttings from oiloperations: characterization, risk assessment, valorization, and treatment innovations. *International Journal of Environmental Science and Technology* 23(307), 2–32. <https://doi.org/10.1007/s13762-026-07078-4>.
15. Pereira, L. B., Sad, C. M. S., Castro, E. V. R., Filgueiras, P. R., & Lacerda, V. (2022). Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: a critical review. *Fuel*. 310 (1), 122301. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122301>.
16. Njuguna, J., Siddique, S., Kwroffie, L. B., Piromrat, S., Afoakwa, K. A., Adegbotolu, U. E. Oluyemi, G., Yates, K., Mishra, & A. K., Moller, L. (2022). The fate of waste drilling fluids from oil and gas industry activities in the exploration and production. *Waste management*, 15(139), 362–380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>.
17. Lebedev, A., & Cherepovitsyn, A. (2024). Waste Management during the Production. Drilling Stage in the Oil and Gas Sector: A Feasibility Study. *Resources*. 13(2), 26. <https://doi.org/10.3390/resources13020026>.
18. Pat. 118505024, CN, 2024.
19. Pat. 119487285, CN, 2025.
20. Pat.20250155601, US, 2025.
21. Pat. CA3215416, CA, 2022.
22. WO 2025151283, 2025.
23. Pat. 20240254873, US, 2024.
24. Sharafaddin O., & Onuțu, I. (2021) An Overview Of Oil Based Drill Cuttings Waste Environmental Effect And Disposal Treatments. *Romanian Journal of Petroleum & Gas Technology. II (LXXIII)* (1), 39–47. <https://doi.org/10.51865/JPGT.2021.01.04>.

25. Chen Z., Zhou J., Chen Z., Chen H., Chen Q., He C., Liu X., & Yuanjian X. (2018). A laboratory evaluation of superheated steam extraction process for decontamination of oil-based drill cuttings. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(5), 6691–6699. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2018.10.040>.
26. Khanpour R., Sheikhi-Kouhsar M. R, Esmailzadeh F. & Mowla D. (2014). Removal contaminants from polluted drilling mud using supercritical carbon dioxide extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*, 88, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2014.01.004>.
27. Chen Z., Chen Z., Yin F., Wang G., Chen H., He C., & Xu Y. (2017). Supercritical Water oxidation of oil-based drill cuttings. *Journal of hazardous materials*. 332, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.03.001>.
28. Pat.116221735, CN, 2023.
29. Pat 111794701, CN, 2020.
30. Aggelopoulos C. A., Kavouri S., Dourou M., & Tsakiroglou C. D. (2024). Insights on dielectric barrier discharge plasma treatment of oil drilling cuttings. *I82*, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.11.060>.
31. Pat.119466619, CN, 2025.