

УДК 339.54.012

Коровкина Алина Игоревна, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела, Воронежский государственный технический университет,
г. Воронеж

Протасов Никита Евгеньевич, магистрант, 2 курс, факультет инженерных систем и сооружений / кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела,
Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассматриваются современные технологии переработки и утилизации отходов нефтегазового производства. Приведён анализ мировых тенденций и нормативных требований (в том числе OSPAR и МАГАТЭ), определяющих направления экологически безопасного обращения с отходами. Обобщён опыт применения гидроциклонных, флотационных, мембранных и термодесорбционных технологий, термохимических и гидрометаллургических процессов. Уделено внимание интеграции модульных схем водоподготовки, термодесорбции и пиролиза в единую систему замкнутого цикла. Показано, что использование данных решений обеспечивает снижение содержания нефти в сбросных водах до нормативных значений, сокращение объёмов захоронения твёрдых отходов и повышение экономической эффективности переработки. В заключении обозначены перспективные направления развития технологий – энергосбережение, цифровизация процессов мониторинга загрязнений и разработка методик оценки жизненного цикла (LCA) для комплексного сравнения альтернативных способов утилизации.

The article discusses modern technologies for the processing and disposal of oil and gas production waste. The analysis of global trends and regulatory requirements (including OSPAR and the IAEA) defining the directions of environmentally sound waste management is presented. The experience of using

hydrocyclone, flotation, membrane and thermal desorption technologies, thermochemical and hydrometallurgical processes is summarized. Attention is paid to the integration of modular schemes of water treatment, thermal desorption and pyrolysis into a single closed-cycle system. It is shown that the use of these solutions ensures a reduction in the oil content in the waste water to standard values, a reduction in the volume of solid waste disposal and an increase in the economic efficiency of processing. In conclusion, promising areas of technology development are outlined – energy conservation, digitalization of pollution monitoring processes, and the development of life cycle assessment (LCA) methodologies for a comprehensive comparison of alternative disposal methods.

Ключевые слова: нефтегазовые отходы, переработка, утилизация, пластовые воды, буровой шлам, нефтешлам, термодесорбция, пиролиз, мембранные технологии, гидрометаллургия, циркулярная экономика, экологическая безопасность.

Keywords: oil and gas waste, processing, utilization, reservoir waters, drilling sludge, oil sludge, thermal desorption, pyrolysis, membrane technologies, hydrometallurgy, circular economy, environmental safety.

Нефтегазовый сектор производит широкий набор отходов, отличающихся составом, агрегатным состоянием и рисками для окружающей среды и здоровья. К основным потокам относятся пластовые воды, буровой шлам и выбуренная порода, нефтешламы из резервуаров и отстойников, отложения солей с естественными радионуклидами и отработанные гидропроцессинговые катализаторы со значительным содержанием никеля, молибдена, кобальта и ванадия. Масштаб проблемы иллюстрируется оценкой мирового объёма пластовых вод порядка 250 млн баррелей в сутки при типичных водонефтяных соотношениях 4–5 к 1 и устойчивым ростом доли воды с возрастом месторождений. Регулирование постепенно ужесточается. В акватории ОСПАР предельно допустимая среднемесячная концентрация дисперсной нефти в сбросах пластовых вод установлена на уровне 30 мг/л, а сброс выбуренных пород, загрязнённых органическими буровыми растворами, запрещён при содержании нефти свыше 1% масс. Эти ориентиры задают параметры для технологических решений по переработке и утилизации.

Практика ликвидации попутного нефтяного газа через факельное сжигание остаётся фундаментальным источником выбросов и индикатором неэффективного обращения с ресурсом. По данным Глобального трекера Всемирного банка, объём факельного сжигания в 2023 году вырос на 7% до 148 млрд м³, причём на девять крупнейших стран пришлось около трети четвертой мирового факельного объёма. Полный отказ от рутины факельного сжигания к 2030 году оценивается как мера, способная предотвратить сотни миллионов тонн CO₂-эквивалента ежегодно. [1] Данные подчёркивают актуальность комплексных технологий, которые замыкают материально-энергетические циклы и минимизируют сбросы и захоронение.

Исследования и отраслевые руководства консолидируют большой спектр решений для основных потоков отходов. Для пластовых вод базовая линия включает гидроциклоны и флотацию напорного типа с последующей фильтрацией по зернистым средам, а при необходимости глубокой подготовки – мембранные процессы ультрафильтрации, нанофильтрации и обратного осмоса. Обзорные работы показывают, что такие каскады обеспечивают достижение регуляторных норм по дисперсной нефти и снижение растворённых загрязнителей, что позволяет переходить к повторному использованию воды или к реинъекции. Отраслевые рекомендации IPIECA и подход ОСПАР, основанный на оценке риска, задают рамки выбора наилучших доступных технологий и управления химикатами. На буровых отходах реализуются механическое обезвоживание и центрифугирование, а для снижения остаточной нефти до регуляторных уровней – технологии термодесорбции. В отношении нефтешламов исследуются термохимические маршруты, включая каталитический и микроволновой пиролиз с высокими выходами масла при температурах свыше 450 °С. Для отработанных гидропроцессинговых катализаторов наилучшие результаты демонстрируют гидрOMETаллургические схемы с извлечением Mo и Ni выше 95%, что экономически и экологически целесообразно на фоне глобальной генерации сотен тысяч тонн таких отходов ежегодно. Для отложений солей с природными радионуклидами действуют международные руководства МАГАТЭ, устанавливающие требования к классификации, упаковке, временному хранению и путям окончательного обращения.

Проведённый анализ литературы позволяет структурировать «конструктор» технологических модулей по видам потоков. Для пластовых вод оптимальная последовательность включает предварительное отделение нефти гидроциклонами, индукционную или напорную флотацию для удаления устойчивых дисперсий, фильтрацию по скорлупе ореха или мембранную барьерную очистку, обеспечивающую соответствие 30 мг/л по дисперсной нефти и целевым показателям по солёности и органике для повторного

использования или реинъекции. В критических экосистемах применяется схема RVA ОСПАР с приоритетом реинъекции, что уже привело к росту доли закачки и снижению сбросов в северо-восточной Атлантике. Для бурового шлама при использовании маслonaполненных растворов сначала применяют сушилки-декантеры для доведения остаточной нефти до порядка 5% масс., а затем низкотемпературную термодесорбцию, позволяющую получать минеральную фракцию с остаточной нефтью ниже 1% масс. и конденсат для возврата в буровой цикл. Для нефтешламов резервуарного происхождения перспективен пиролиз в диапазоне 450–550 °С, в том числе микроволновую модификацию, где в опубликованных опытах достигались выходы жидкой фракции 65–86% масс. с последующим доочищением. [2] Для катализаторов гидроочистки и гидрокрекинга базовой считается гидрометаллургическая схема выщелачивания с селективным извлечением Mo и Ni с эффективностью 95–97% и возвратом носителя в цикл регенерации. Для отложений с NORM предусматриваются дистанционная очистка оборудования, герметичная упаковка и маршруты, исключающие неконтролируемое распространение радионуклидов, в соответствии с SSG-60 и профильными документами МАГАТЭ.

Результаты синтеза данных и проектного сравнения вариантов показывают, что модульная интеграция даёт измеримые экологические и экономические эффекты на уровне промысла и НПЗ. Для месторождения с добычей 1 млн баррелей нефти в год объём пластовой воды, по консервативной оценке, составит 4–5 млн баррелей. При внедрении каскада «гидроциклон – ДАФ – фильтрация – УФ/НФ – ОО» достигается выполнение норм по дисперсной нефти и сокращается потребление свежей воды за счёт оборотного использования на ППД или на подготовке флюидов ГРП. Обзорные публикации подтверждают, что такие каскады обеспечивают удаление масел и коллоидов и более чем 90-процентное снижение растворённых примесей в барьерном контуре, что критично для повторного использования воды либо для безсбросных схем в континентальных кластерах

добычи. Для буровых отходов комбинация механического обезвоживания и термодесорбции позволяет вывести минеральную фракцию на уровень <1% масс. остаточной нефти, соответствуя требованиям ОСПАР к обращению с породой, загрязнённой органофазными растворами. Для нефтешламов переход к пиролизу снижает объём захоронения, а возврат восстановленного масла в топливный баланс частично компенсирует капитальные и операционные затраты, причём опыт микроволновой пиролизной обработки демонстрирует высокий выход и короткие времена цикла. [3] Для катализаторов выгода выражается в возврате металлов платёжеспособного качества и снижении закупок первичных концентратов; в лабораторно-полупромышленных схемах показаны извлечения Mo и Ni порядка 96%, что снижает углеродный след по сравнению с первичным сырьём. На уровне портфеля мероприятий интеграция утилизации попутного газа с водоподготовкой и переработкой шламов позволяет уменьшить суммарные выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ в районах добычи, при этом глобальные оценки указывают на существенный потенциал климатического эффекта от сокращения факельного сжигания.

Мембранные линии чувствительны к загрязнению органикой и коллоидами, поэтому выбор предочистки и режимов обратной промывки принципиален для устойчивой работы и экономичности. Менеджмент рассолов и концентратов после НФ и ОО остаётся «узким местом» и требует локального решения – от повторной минерализации для технологических нужд до глубокой реинъекции, где это оправдано гидродинамикой коллектора и риском засоления. [4] Для термодесорбции важен контроль летучих углеводородов и рекуперация теплоты, а также доказуемое достижение порогов по остаточной нефти, которые в офшорной юрисдикции ОСПАР завязаны на запрет вывода органофазно загрязнённой породы с содержанием нефти выше 1% масс. [5] Пиролиз нефтешламов предъявляет требования к газоочистке и обращению с твёрдым остатком, который может содержать металлы и полициклические ароматические углеводороды, поэтому

целесообразно сочетать с каталитическими дожигателями и улавливанием пыли. Для катализаторов критичны логистика, безопасность и прослеживаемость, поскольку часть потоков относится к перечням опасных отходов; при этом тренд на регенерацию и закрытые циклы подтверждается отраслевыми обзорами и практикой крупных операторов. Для NORM-содержащих отложений необходим радиационно-гигиенический контроль, включая измерение активности Ra-226 и Ra-228, выбор пакетов для временного хранения и согласованные маршруты обращения в соответствии с SSG-60. Наконец, даже при соблюдении норм по дисперсной нефти остаётся повестка микрозагрязнителей и добавленных химикатов, что отражено в переходе к риск-ориентированным подходам и мониторингу ВТЕХ и алкилфенолов в рамках ОСПАР. [6]

Сводя воедино доказательную базу и инженерные требования, наиболее результативной является модульная архитектура, объединяющая водоподготовку с мембранным барьером и управлением рассолами, «сухие» линии обработки буровых отходов с термодесорбцией и рекуперацией тепла, термохимическую переработку нефтешламов с возвратом жидких фракций в топливный контур, гидрометаллургическое извлечение металлов из катализаторов и регламентированное обращение с NORM-потоками. Такая связка позволяет выполнять действующие нормативы по дисперсной нефти и остаточному содержанию углеводородов на твёрдых фракциях, сокращать объёмы захоронения и добиваться повторного использования воды. На макроуровне дополнительные климатические и качественные эффекты достигаются за счёт сокращения факельного сжигания и внедрения риск-ориентированного управления химическими веществами. Первоочередными направлениями дальнейших исследований и внедрения являются снижение энергоёмкости мембранных каскадов и термопроцессов за счёт рекуперации и интеграции тепловых насосов, разработка катализаторов пиролиза, устойчивых к загрязнителям из шламов, цифровая диагностика в реальном времени, а также разработка единых методик LCA для сравнения вариантов

утилизации с учётом локальных гидрогеологических и правовых условий. На практике это позволит переходить от фрагментарного обращения с отходами к промышленному симбиозу внутри промысловых кластеров и НПЗ, обеспечивая устойчивость, соответствие нормам и экономическую эффективность.

Литература

1. International Atomic Energy Agency. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) Residues from the Oil and Gas Industry: Safety Standards Series No. SSG-60. – Vienna: IAEA, 2020. – 108 p.

2. OSPAR Commission. Guidelines for a Risk-Based Approach to the Management of Produced Water Discharges from Offshore Installations. – London: OSPAR, 2012. – 52 p.

3. World Bank. Global Gas Flaring Tracker Report 2024. – Washington, DC: World Bank Group, 2024. – URL: <https://www.worldbank.org/flaringtracker> (дата обращения: 14.10.2025).

4. Гаджиев А. Г., Магомедов М. Г., Курбанов А. Г. Современные технологии утилизации буровых отходов // Нефтегазовое дело. – 2023. – № 6. – С. 78–86.

5. Ганиев Р. Ф., Камилова Л. А. Переработка нефтешламов термохимическими методами // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 112–118.

6. Ибрагимов А. А., Сайфуллин Р. Р. Технологии очистки пластовых вод на месторождениях России // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27, № 5. – С. 48–55.

Literature

1. International Atomic Energy Agency. Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) Residues from the Oil and Gas Industry: Safety Standards Series No. SSG-60. – Vienna: IAEA, 2020. – 108 p.

2. OSPAR Commission. Guidelines for a Risk-Based Approach to the Management of Produced Water Discharges from Offshore Installations. – London: OSPAR, 2012. – 52 p.

3. World Bank. Global Gas Flaring Tracker Report 2024. – Washington, DC: World Bank Group, 2024. – URL: <https://www.worldbank.org/flaringtracker> (date of request: 14.10.2025).

4. Gadzhiev A. G., Magomedov M. G., Kurbanov A. G. Modern technologies for the disposal of drilling waste // Oil and gas industry. – 2023. – No. 6. – pp. 78-86.

5. Ganiev R. F., Kamilova L. A. Processing of oil sludge by thermochemical methods // Bulletin of the Technological University. – 2022. – Vol. 25, No. 3. – pp. 112-118.

6. Ibragimov A. A., Sayfullin R. R. Technologies of reservoir water purification in Russian fields // Ecology and industry of Russia. - 2023. – Vol. 27, No. 5. – pp. 48-55.