УДК 622.276

Коньков П.С, сутдент
(САФУ, г Архангельск)
Konkov P.S., student
(NArFU, Arkhangelsk)

СЛАНЦЕВАЯ НЕФТЬ И ГАЗ:ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОРЫВЫ

SHALE OIL AND GAS: ENVIRONMENTAL RESTRICTIONS AND TECHNOLOGICAL BREAKTHROUGHS

Аннотация. В докладе рассматривается двойственная роль сланцевых углеводородов: они стали структурообразующим фактором мирового энергобаланса, но остаются источником устойчивых экологических рисков. Цель - сопоставить экологические ограничения сланцевой добычи и технологии их смягчения. Раскрыты ключевые проблемы: гидроразрыв пласта, загрязнение подземных вод, выбросы метана, индуцированная сейсмичность и водопотребление. Показана неоднородность регулирования - от запретов на фрекинг в Европе до комплекс-подхода США, а также превращение метановой повестки в инструмент торговой политики. Отдельно рассмотрены технологические прорывы: повторное использование воды, «зелёные» проппанты, электрические фрак-флоты, цифровизация бурения и пилотные проекты CCUS. Сделан вывод о невозможности полного устранения рисков и о необходимости их снижения до приемлемого уровня через наилучшие доступные технологии, независимый мониторинг выбросов и гармонизированные требования. Практический смысл баланса между экономической выгодой и экологической безопасностью - встраивание экологических ограничений в инженерную логику проекта на ранних стадиях.

Ключевые слова:сланцевая нефть; гидроразрыв пласта; выбросы метана; экологическая безопасность

Annotation. The report examines the dual role of shale hydrocarbons: they have become a structuring factor in the global energy balance, but they remain a source of persistent environmental risks. The goal is to compare the environmental constraints of shale extraction and the technologies used to mitigate them. Key issues are identified: hydraulic fracturing, groundwater contamination, methane emissions, induced seismicity, and water consumption. The heterogeneity of regulation is shown — from bans on fracking in Europe to the compliance approach in the United States, as well as the transformation of the methane agenda into a tool of trade policy. Technological breakthroughs are considered separately: water reuse, “green” proppants, electric fraction flotillas, digitalization of drilling, and pilot CCUS projects. It is concluded that it is impossible to completely eliminate risks and that they must be reduced to an acceptable level through the best available technologies, independent emission monitoring, and harmonized requirements. The practical meaning of the balance.

Keywords:shale oil; hydraulic fracturing; methane emissions; environmental safety

Введение. Сланцевые углеводороды за последние полтора десятилетия превратились из узконаправленного сегмента в один из структурообразующих факторов мирового энергетического баланса. В 2024 г. на США приходилось более 80% глобальной добычи сланцевой нефти и газа, что сделало эту страну не только крупнейшим производителем, но и технологическим полигоном, где отрабатываются

стандарты бурения, гидроразрыва и экологического контроля для всего остального мира. Сланцевая нефть обеспечивает около двух третей американской нефтедобычи - порядка 8,8 млн баррелей в сутки к концу 2024 г., причём только Пермский бассейн давал 6,3 млн баррелей в сутки, или 48% национального производства. Для России, стран Ближнего Востока и Европы этот сдвиг означает необходимость пересмотра не только экспортных стратегий, но и подходов к экологической безопасности недропользования. Цель доклада - системно сопоставить экологические ограничения, с которыми сталкивается сланцевая добыча, и технологические решения, способные эти ограничения смягчить или снять, а также оценить перспективы баланса между экономической целесообразностью и природоохранными требованиями.

Экологические ограничения сланцевой добычи. Ключевая технологическая особенность сланцевых проектов - многостадийный гидроразрыв пласта (ГРП) в горизонтальных скважинах с большим объёмом закачки. Именно она порождает основной спектр экологических рисков, которые принято группировать в несколько взаимосвязанных блоков. ГРП требует значительных объёмов пресной воды, а возвратный поток содержит соли, углеводороды, технологические добавки и естественные загрязнители, поступающие из пласта. Даже при наличии цементных обсадных колонн и многоуровневых барьеров сохраняется остаточный риск миграции метана и пластовых флюидов по затрубному пространству или по естественным трещинам. Для густонаселённых регионов Европы и плотно заселённых территорий США это создаёт прямую угрозу водоснабжениюМетан как парниковый газ в десятки раз активнее углекислого газа в краткосрочной перспективе, и сланцевые операции с их распределённой инфраструктурой - множеством скважин, компрессорных станций и трубопроводов - являются источником так называемых «блуждающих» утечек. По оценкам американских исследователей, доля утечек на сланцевых месторождениях варьирует от 2% до 9–10% от общей добычи, что превышает «точку паритета» с углём (около 2,3%), за которой сланцевый газ проигрывает углю по климатическому эффекту. Спутниковые данные Rystad Energy показывают, что в первом квартале 2025 г. в мире было зафиксировано около 45 тыс. метановых шлейфов - на 14 тыс. больше, чем годом ранее, что соответствует примерно 45 млн т CO_2-эквивалента и росту на 40% год к году. В США прирост выбросов около 4% связывают именно с расширением добычи в сланцевых регионах, включая Баккен. Закачка больших объёмов жидкости под высоким давлением, а также последующее размещение отработанных вод в глубокие поглощающие горизонты могут провоцировать индуцированные землетрясения.[1] Сланцевый гидроразрыв - водоёмкая операция: на одну многостадийную скважину могут приходиться десятки тысяч кубометров воды, а в засушливых районах конкуренция за водные ресурсы становится самостоятельным ограничением. Законодательная реакция на эти риски неоднородна. В Европе гидроразрыв фактически заблокирован: Франция ввела запрет на ГРП для сланцевых углеводородов, аналогичные ограничения и моратории действовали в Германии, Нидерландах, Болгарии и ряде других стран; в общей сложности в Европе, Северной Америке и Океании документируется не менее пятнадцати юрисдикций с запретами или мораториями на фрекинг.[1] В США регулирование строится не на запрете технологии как таковой, а на контроле выбросов и водопользования: стандарты EPA для фрак-насосов, требования к мониторингу метана и ужесточение правил размещения отработанных вод формируют «дорогой, но работающий» комплаенс. Показательно, что европейский закон о выбросах метана уже стал предметом трансатлантического торга: США настаивают на освобождении своего СПГ от части требований как минимум до 2035 г. поскольку сланцевая добыча с фрекингом объективно увеличивает

метановый след. Это означает, что экологические ограничения превращаются из технического вопроса в инструмент торговой политики.

Технологические прорывы и снижение нагрузки. Ответ отрасли на экологические ограничения не сводится к косметическим улучшениям; речь идёт о смене технологической платформы по нескольким направлениям. Повторное использование воды и замкнутые циклы. Наиболее зрелое направление - вовлечение возвратного и попутно добываемого воды в новые циклы ГРП. В Пермском бассейне уровень повторного использования уже превышает 50%, тогда как в Баккене он остаётся на уровне около 5%, что показывает огромный разрыв между лучшими и отстающими практиками. Технологически ключевая проблема - высокая солёность и нестабильность воды; она решается подбором солеустойчивых полимеров и хелатирующих систем, а также модульными установками очистки. В Аргентине (Vaca Muerta) компании удавалось вовлекать до 25% оборотной воды в жидкость разрыва, подбирая рецептуры под конкретную минерализацию. Это снижает забор пресной воды и одновременно уменьшает объёмы закачки в поглощающие горизонты, то есть работает сразу на два экологических ограничения. «Зелёные» проппанты и менее агрессивная химия. Традиционный проппант - кварцевый песок или керамика - сам по себе инертен, однако его транспортировка и очистка сопряжены с пылью, а используемые гели и сшиватели могут формировать трудно разлагающиеся остатки. Современные решения включают проппанты с покрытиями, снижающими трение и позволяющими сокращать концентрацию полимеров, а также «мокрый» песок, промытый оборотной водой.[2] Последний вариант дешевле, но требует контроля глинистой и карбонатной фракции, чтобы не забивать трещины. В более широком смысле «зелёная» химия ГРП движется в сторону сокращения числа компонентов и перехода к разлагающимся или пищевым аналогам базовых добавок.

Электрические фрак-флоты. Замена дизельных насосных агрегатов на электрические - один из самых заметных сдвигов в наземном сланцевом сервисе. Электрический флот может питаться от сетевой электроэнергии или от попутного газа, что снижает выбросы CO_2, шум и пожарные риски, а также уменьшает число работников на площадке. По оценкам, переход на электрический флот с питанием от природного газа сокращает углеродный след операции с примерно 118 т CO_2 на дизельном варианте до 85,7 т CO_2 на газоэлектрическом. Для сланцевых операторов это не только экологический, но и ESG-фактор, напрямую влияющий на доступ к финансированию. Цифровизация бурения и «умные» скважины. Интеллектуальные системы мониторинга бурового раствора, «умные» долота и алгоритмы оптимизации траектории позволяют бурить быстрее и безопаснее, снижая вероятность выбросов и осложнений. Внедрение машинного обучения в управление буровыми процессами на сланцевых месторождениях обеспечивает сокращение незапланированных простоев примерно на 20%, эксплуатационных расходов - на 10-15% и повышение скорости бурения на 26-30%. На месторождении Шэнли (Китай) за счёт интеллектуальных систем удалось пробурить скважину глубиной около 6 тыс. м за 17,7 суток против 48 суток в 2022 г. Меньшее число дней работы буровой установки означает меньшие выбросы от дизель-генераторов, меньший расход воды и меньший след на ландшафте.CCUS и закачка CO_2 в сланцевые пласты.[3] Улавливание, использование и хранение углерода постепенно перестаёт быть экзотикой для сланцевого сегмента. CO_2 может применяться как агент повышения нефтеотдачи: в Пермском бассейне Occidental провела четыре пилотных проекта по закачке CO_2 в сланцевые формации, рассчитывая повысить коэффициент извлечения, который сегодня составляет лишь около 10%. В Китае на месторождении Туха с апреля 2024 г. в рамках теста закачано более 9 тыс. т CO_2 и получено около 1,6 тыс. т сланцевой нефти; на другом объекте закачано свыше

40 тыс. т CO_2 с приростом добычи более 6 тыс. т. CCUS в сланцах пока не является массовым, но он создаёт важный концептуальный мост: сланцевый пласт может рассматриваться не только как источник выбросов, но и как объект их частичного захоронения и одновременно как средство интенсификации добычи.[4]

Заключение. Сланцевые углеводороды демонстрируют фундаментальное противоречие современной энергетики: экономически эффективная технология, радикально изменившая глобальный рынок, остаётся экологически уязвимой в силу самой своей природы - распределённой инфраструктуры, больших объёмов воды и высоких рисков утечек метана. Полного устранения этих рисков в обозримой перспективе не произойдёт; речь идёт о последовательном снижении их до уровня, который общество и регуляторы признают приемлемым. Технологические прорывы последних лет - от повторного использования воды и электрических флотов до цифровизации бурения и пилотных CCUS-проектов - показывают, что такой путь возможен, но он требует не только инвестиций, но и прозрачной системы измерения выбросов, независимого спутникового мониторинга и гармонизированных требований в трансграничной торговле энергоносителями. Для стран, только формирующих свою сланцевую повестку, ключевым становится не выбор между «запретом» и «разрешением», а проектирование институциональной среды, в которой наилучшие доступные технологии становятся не добровольным преимуществом, а обязательным стандартом. Именно в этом заключается практический смысл баланса между экономической выгодой и экологической безопасностью: выигрывает не тот, кто быстрее бурит, а тот, кто раньше встраивает экологические ограничения в инженерную логику проекта.

Список литературы.

1. U.S. crude oil production rose by 2% in 2024 : Today in Energy // U.S. Energy Information Administration. – 2025. – 16 April. – URL: https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=65024 (дата обращения: 21.10.2026). – Текст : электронный.
2. Global onshore satellite-detected upstream methane emissions increase in 2025, bucking recent reduction trend : press release // Rystad Energy. – 2025. – 27 October. – URL: https://www.rystadenergy.com/news/global-onshore-methane-emissions-increase-in-2025 (дата обращения: 21.10.2026). – Текст : электронный.
3. Assessing Methane Emissions from Shale Gas Production in China: A Two-Tiered Mobile Measurement Approach / [authors not specified in source] // Environmental Science & Technology. – 2026. – Vol. 60, No. 1. – P. 364–375. – DOI: 10.1021/acs.est.5c01953. – Текст : непосредственный.
4. Naus S. Assessing the Relative Importance of Satellite-Detected Methane Superemitters in Quantifying Total Emissions for Oil and Gas Production Areas in Algeria / S. Naus [et al.] // Environmental Science & Technology. – 2023. – Vol. 57, No. 48. – P. 19545–19556. – DOI: 10.1021/acs.est.3c04746. – Текст : непосредственный.