ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru




*Научная статья* *Геотехнология и инженерная геология*

# Влияние методов очистки бурового шлама на свойства пропантов

**Е.А.Яценко, С.В.Трофимов✉, Б.М.Гольцман, Л.В.Климова**

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И.Платова, Новочеркасск, Россия*

***Как цитировать эту статью:*** Яценко Е.А., Трофимов С.В., Гольцман Б.М., Климова Л.В. Влияние методов очистки бурового шлама на свойства пропантов // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 105-118. EDN PZUPYV

***Аннотация***

Утилизация буровых шламов является актуальной проблемой нефтегазовой отрасли. В работе исследовано влияние трех методов очистки шлама Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (промывка водой, бензином и прокаливание при 400 °С) на физико-химические характеристики и механические свойства модельных образцов пропантов. Научная новизна заключается в установлении прямой количественной корреляции между фазовым составом модельных образцов и их предельной прочностью на сжатие, что ранее не было продемонстрировано для буровых шламов ачимовской толщи. С использованием комплекса методов (рентгенофазовый анализ, ИК-Фурье-спектроскопия, газовая хромато-масс-спектрометрия, рентгенофлуоресцентный анализ) охарактеризован исходный шлам. Показано, что он содержит 2,2 мас.% остаточных углеводородов и является полиминеральным сырьем. Установлено, что промывка бензином наиболее эффективно удаляет углеводороды (степень очистки до 97 %), промывка водой эффективно удаляет хлориды (снижение до 0,05 %). Прокаливание при 400 °С не обеспечивает полного удаления углеводородов из-за коксования тяжелых фракций и приводит к аморфизации глинистых минералов. Методом количественного рентгенофазового анализа модельных образцов пропантов установлена зависимость между содержанием муллита и предельной прочностью на сжатие. Максимальная прочность (125,38 МПа) достигнута для образца, полученного из шлама, промытого водой, что обусловлено высоким содержанием муллита (23,5 мас.%) и минимальным количеством аморфной фазы. Наименьшая прочность (74,79 МПа) получена у модельного образца пропанта из прокаленного шлама вследствие деструкции глинистых минералов. Результаты работы обосновывают выбор промывки водой как оптимального метода подготовки бурового шлама для синтеза прочных расклинивающих агентов.

***Ключевые слова***

буровой шлам; керамические пропанты; фазовый состав; структурообразование; рециклинг; отходы; Уренгойское месторождение; спекание; очистка сырья

***Финансирование***

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания по теме «Фундаментальные основы технологий рециклинга отходов нефтедобывающей отрасли Арктической зоны Российской Федерации с получением эффективных строительных материалов и расклинивающих агентов» (FENN-2025-0001).

***Поступила: 10.04.2026*** ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 30.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

## Введение

В настоящее время наблюдается прогрессивное развитие мер экологической безопасности в России и мире во всех отраслях промышленности, включая энергетический сектор при добыче нефти и газа [1, 2]. Современные экологические тренды [3] развития промышленности направлены на снижение негативного воздействия на окружающую среду при сохранении высоких показателей производства [4, 5]. Несмотря на тенденцию последних лет к незначительному снижению объемов нефтедобычи в Российской Федерации, страна продолжает находиться в рейтинге мировых лидеров по добыче нефти. Высокий темп разведки и добычи углеводородов приводит к увеличению роста строительства скважин, что влечет за собой образование повышенных объемов отходов [6].



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Отходы разведки и добычи углеводородов подразделяются на следующие категории: буровые отходы (буровые растворы и шламы), сточная вода (соленая вода, поднимаемая на поверхность вместе с нефтью и газом) и сопутствующие отходы [7, 8]. Точных данных по количеству образующихся твердых отходов при нефтедобыче нет, но известно, что их объем зависит от геологии породы, глубины и диаметра скважины, типа используемого бурового раствора, а также других факторов. Однако существуют исследования, косвенно оценивающие данный показатель. Так, согласно оценке авторов [7], образуется приблизительно 10 % твердых и 90 % жидких буровых отходов, при этом их общий объем составляет от 1000 до 5000 м$^3$ на одну скважину. При морском извлечении 229 млн т нефти образовалось 530000 т отходов, из которых 260000 т составляли буровые шламы [9]. Согласно расчетам, приведенным в исследованиях [10], и РД 39-133-94 «Инструкции по охране окружающей среды при строительстве скважин на нефть и газ на суше» с одной скважины глубиной от 2 до 3,3 км, при диаметрах долота 250 и 311 мм, образуется от 260 до 1000 т бурового шлама, диапазон которого зависит от коэффициентов кавернозности и разуплотнения породы. Аккумуляция такого объема буровых отходов на специализированных полигонах приводит к существенному сокращению значительных площадей, пригодных для хозяйственной деятельности, и их загрязнению.

Известно, что буровые шламы представляют собой мелкие частицы горной породы (обломки), образующиеся при разрушении пласта буровым долотом в процессе бурения. Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов, буровые шламы относятся к умеренно опасным и малоопасным отходам (III, IV классы опасности), содержащим токсичные химические соединения. Ненадлежащее обращение с ними создает экологические риски, обусловленные засолением почвенных горизонтов [8, 11, 12] и реже потенциальным загрязнением грунтовых вод [11]. Также в составе бурового шлама часто присутствуют тяжелые металлы, такие как стронций, цирконий, цинк, хром и мышьяк, в связи с применением буровых растворов и химических реагентов при разработке месторождений [13-15]. Вследствие способности металлов аккумулироваться в почвенном слое и представлять существенную угрозу для биосферы, применение эффективных методов очистки и утилизации бурового шлама является обязательным условием для предотвращения их эмиссии и засоления почвенных горизонтов.

В настоящее время существует множество научных исследований, посвященных вопросам очистки и обработки буровых растворов для их повторного использования [16-18], при этом значительно меньше внимания уделяется проблеме утилизации буровых шламов. Тем не менее, можно выделить следующие методы их обработки: биоремедиация – применение микроорганизмов для детоксикации загрязнителей [19] с дальнейшим применением шламов для рекультивации почвы (не более 5 мас.%) [12]; термические методы – сжигание содержащихся углеводородов с получением твердой фазы (золы) [20] или пиролиза [21] для получения масла, схожего по составу с товарным дизельным топливом; физико-химические методы – затвердевание шламов путем смешения с портладцементом и дальнейшим захоронением [22] или центрифугирование [23]. Несмотря на то, что существующие методы обработки буровых отходов позволяют существенно снизить их токсичность и даже, в некоторых случаях, обеспечить определенную экономическую выгоду, проблема их окончательной утилизации остается актуальной, поскольку твердая фаза все равно требует размещения на шламовых амбарах.

Таким образом, необходимо найти комплексный подход к решению проблемы утилизации буровых шламов, который позволит не только улучшить экологическую ситуацию на нефтедобывающих месторождениях, но и получить экономическую выгоду от переработки отходов. Согласно исследованию [24], помимо улучшения экологической ситуации, наибольшая экономическая эффективность и целесообразность достигается путем переработки буровых отходов в строительные материалы. Существуют исследования по переработке буровых шламов в керамзит [25], кирпич [26], добавку к цементу [27], а также в керамические расклинивающие материалы, называемые пропантами [28, 29]. Однако зачастую в качестве основного алюмосиликатного сырья выступает боксит [28-30] и реже бентонит [31], что тоже не решает проблему утилизации буровых шламов.

Рассмотренные ранее исследования, посвященные синтезу пропантов из буровых шламов, практически не учитывают наличие в них остаточных компонентов буровых растворов или сырой


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

нефти, которые могут оказывать существенное влияние на качество пропантов. В настоящее время, в качестве метода очистки применяют пиролиз буровых отходов для их разделения на фракции [29, 32], а затем используют твердую фазу (буровой шлам) в качестве добавки для синтеза пропантов, но не основного прекурсора. Вследствие высокой температуры процесса пиролиза (выше 500 °С), превышающей температуру кипения большинства легких и тяжелых углеводородных фракций, данный метод обеспечивает практически полное удаление углеводородов из бурового шлама, что, вероятно, положительно отразится на механических свойствах пропантов.

Существует определенный научно-практический пробел в исследовании влияния методов очистки бурового шлама при его использовании в качестве основного сырья для синтеза пропантов, а также в изучении воздействия данного процесса на физико-химические характеристики получаемых материалов. В связи с этим целью настоящей работы является установление влияния различных методов очистки бурового шлама на физико-механические свойства пропантов.

**Методы**

В качестве основного алюмосиликатного сырья для синтеза модельных образцов пропантов применяли буровой шлам Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (Уренгойское НГКМ, Ямало-Ненецкий автономный округ) и бой тарного стекла. Физические показатели отходов, такие как истинная плотность, средний диаметр частиц и удельная площадь поверхности, представлены в табл.1. Гранулометрический состав сырья получен с применением лазерного анализатора «ЛАСКА-ТД» (БиоМедСистем, Санкт-Петербург). Проведены рентгенофазовый, рентгеноспектральный анализы и инфракрасная спектрокопия исходного бурового шлама. В качестве модифицирующих добавок применяли оксид алюминия ($Al_2O_3$) марки ЧДА (ЛенРеактив, Санкт-Петербург) и фторид натрия (NaF) марки ЧДА (ОАО «Красный химик», Санкт-Петербург).

*Таблица 1*

**Физические характеристики отходов**

| Материал | Истинная плотность, кг/м$^3$ | Диаметр частиц, мкм | | Удельная площадь поверхности, м$^2$/кг |
|---|---|---|---|---|
| | | *D*50 | *D*99 | |
| Буровой шлам | 2480 | 10,23 | 23,56 | 413 |
| Бой тарного стекла | 2200 | 13,92 | 39,63 | 342 |

Для очистки бурового шлама применялись три метода – однократная промывка водой или бензином без длительного перемешивания и прокаливание. Промывка шлама осуществлялась с использованием нагретой до 75 °С дистиллированной воды в соотношении 1:3 (буровой шлам и вода) и бензина марки АИ-92 в соотношении 1:1 (буровой шлам и бензин). Прокаливание проводили во вращающейся трубчатой печи ТК.3.1100.3Ф (ООО «Термокерамика», Москва) при температуре 400 °С, угле наклона 4° и скорости вращения трубы 2 об/мин. При таких параметрах буровой шлам находится в зоне максимальных температур в течение 5 мин. Выбор данной температуры прокаливания обусловлен температурой кипения (370-390 °С) большей части углеводородов, присутствующих в сырой нефти.

Для синтеза модельных образцов пропантов был использован ранее разработанный авторами компонентный состав сырьевой смеси [33], включающий, мас.%: буровой шлам – 80; бой тарного стекла – 20; оксид алюминия – 5 (сверх 100); фторид натрия – 4 (сверх 100); вода – 5 (сверх 100). Введение $Al_2O_3$ направлено на повышение механической прочности модельных образцов пропантов посредством формирования каркаса пропантов муллита в процессе спекания. Бой тарного стекла выступает в роли плавня, незначительно понижая температуру спекания и частично заполняя поры итогового изделия, что положительно влияет на предельную прочность при сжатии. Фторид натрия дополнительно снижает температуру спекания пропанта. Синтез модельных образцов пропантов проводили по технологии, представленной на рис.1.

Предварительно высушенный до постоянной массы и обработанный различными методами буровой шлам Уренгойского НГКМ смешивали с боем тарного стекла, оксидом алюминия и фторидом натрия в течение 120 с в смесителе ТЛ-020 (ООО «ДзержинскТехноМаш», Дзержинск). Для обеспечения требуемой пластичности в смесь добавляли необходимое количество воды, после чего


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

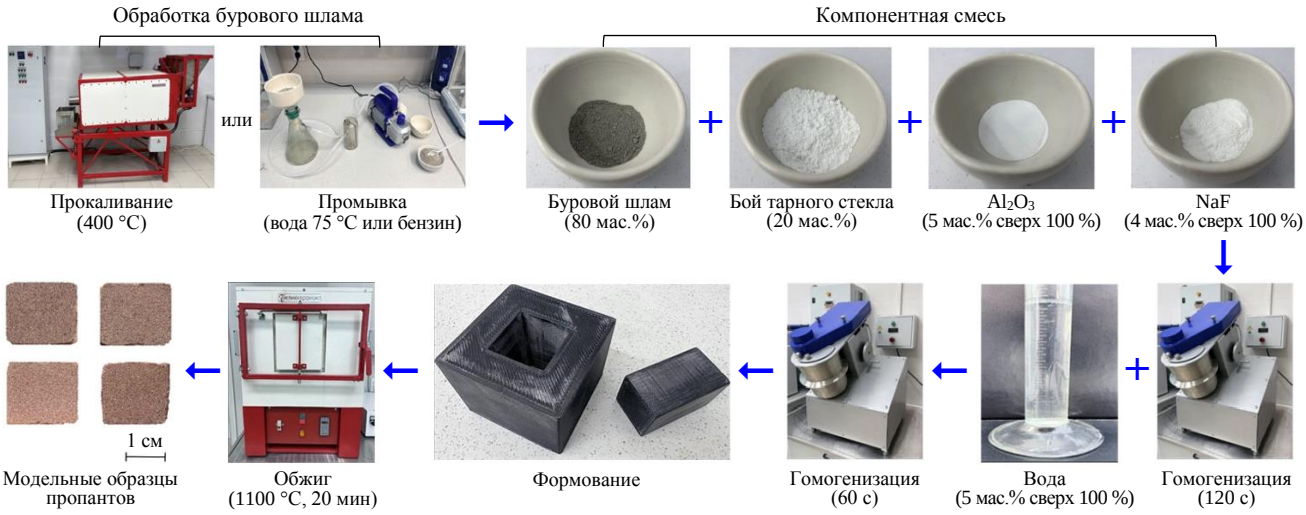



Рис.1. Технологическая схема синтеза модельных образцов пропантов

осуществляли дополнительное перемешивание в течение 60 с. Из полученной сырьевой смеси без применения избыточного давления формовали образцы кубической формы с длиной ребра 20 мм. Далее их подвергали термической обработке в камерной электропечи ТК.8.1300.Н.1Ф (ООО «Термокерамика») при температуре 1100 °С со скоростью нагрева 13 °С/мин и выдержкой 20 мин. После этого образцы охлаждали в печи до комнатной температуры. Каждая серия синтезированных модельных пропантов содержит четыре образца.

Выбор температуры обжига 1100 °С обусловлен комплексным действием добавок-плавней – фторида натрия и боя тарного стекла. Введение NaF в алюмосиликатные шихты в количестве 2-4 мас.% позволяет снизить температуру кристаллизации муллита с 1200-1400 до 1050-1200 °С [34]. Фторид натрия выступает в роли минерализатора – фторид-ионы разрушают связи Si–O–Si и Al–O–Si в структуре силикатного расплава, снижают его вязкость и ускоряют диффузию $Al^{3+}$ и $Si^{4+}$, что способствует зарождению и росту кристаллов муллита при более низких температурах. Бой тарного стекла при нагреве до 850-900 °С переходит в силикатный расплав, который обволакивает частицы твердой фазы. Добавка NaF дополнительно снижает вязкость этого расплава, создавая оптимальные условия для жидкофазного спекания. Результаты дериватографического анализа [34] показывают, что при содержании NaF 4 мас.% муллитизация в расплаве начинается при 795 °С и активно протекает до 918 °С. Кристаллизация муллита завершается к 1100 °С, о чем свидетельствует максимальное содержание этой фазы (23,5 мас.%) при минимальном количестве аморфной составляющей (3,49 мас.%). Повышение температуры обжига до 1150 °С и выше, как показано в работе [34] для аналогичной сырьевой системы, приводит к избыточному плавлению, растворению кристаллов муллита в расплаве и вспениванию материала, что сопровождается снижением прочности (с 73,6 до 41,2 МПа). Таким образом, температура 1100 °С является оптимальной, обеспечивающей максимальное образование муллита и, как следствие, наивысшую механическую прочность синтезируемых пропантов.

Идентификацию минеральных фаз (XRD) буровых шламов и модельных образцов пропантов проводили с использованием дифрактометра ARL X’TRA (Thermo Fisher Scientific, США) и применением излучения Cu. Рентгенограммы регистрировались в угловом диапазоне (2θ) от 10 до 80° с шагом 0,04°. Интерпретацию данных проводили с использованием программного пакета базы данных Crystallographica Search-Match 3.1.0.2. Количественный рентгенофазовый анализ выполняли с применением программного обеспечения MAUD (Materials Analysis Using Diffraction) с использованием метода Ритвельда. Рентгенофазовый анализ проводили в ЦКП «Нанотехнологии» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И.Платова.

Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ (XRF) буровых шламов и модельных образцов пропантов выполнен на вакуумном спектрометре последовательного действия с дисперсией по длине волны Axios mAX (PANalytical, Нидерланды) по методике НСАМ ВИМС 439-РС (2010).


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

Функциональные группы буровых шламов и модельных образцов пропантов охарактеризованы посредством ИК-Фурье-спектроскопии (FTIR), которую проводили на спектрометре WQF-530A (Rayleigh, Китай). Расшифровку спектров проводили в автоматическом режиме с применением встроенной базы данных HAVEC, входящей в программный пакет MainFTOS Suite 1.18.2023.1227. Съемка велась на поглощение в количестве 24 сканов в среднем инфракрасном диапазоне волновых чисел от 500 до 4000 $см^{-1}$.

Методика и оборудование, необходимые для определения линейных размеров, а также некоторых физико-химических характеристик (объем, плотность, коэффициент спекания и предельная прочность на сжатие) модельных образцов пропантов, представлены в исследовании [35]. Каждое зарегистрированное тестовое значение физико-химических характеристик представляет собой среднее арифметическое, рассчитанное на основе четырех повторных измерений.

Идентификацию углеводородов в буровом шламе проводили методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) с использованием системы Agilent 7890A (Agilent Technologies, США), оснащенной масс-селективным детектором Agilent 5975C (ионизация электронным ударом, 70 эВ) и капиллярной колонкой HP-5MS. В качестве газа-носителя применяли гелий с постоянным потоком 1 мл/мин. Идентификацию соединений осуществляли по библиотеке масс-спектров NIST в соответствии с литературной методикой [36].

В рамках проведенных исследований методы очистки шламов (составов) маркировали следующим образом: 1 – исходный шлам без обработки; 2 – шлам, промытый водой; 3 – шлам, промытый бензином; 4 – шлам, прокаленный при 400 °С. Модельные образцы пропантов маркировали соответствующей цифрой с литерой «п», например, 3п – образец пропанта с использованием бурового шлама, промытого бензином.

**Обсуждение результатов**

Идентификацию и относительное распределение остаточных углеводородов в буровом шламе проводили на исходном (необработанном) шламе 1 методом хромато-масс-спектрометрии с применением маточного раствора. Приготовление раствора вели путем смешивания в течение 16 ч навески шлама массой 1 г с 2 мл дихлорметана, после чего смесь центрифугировали. Молекулярно-массовое распределение углеводородов в шламе представлено на рис.2 и в табл.2.

Согласно полученным данным, относительное распределение остаточных углеводородов в исходном буровом шламе следующее: ненасыщенных углеводородов 66,8 % (диапазон углеродных атомов $C_{12}$-$C_{18}$ до 46 %, $C_{19}$-$C_{31}$ до 20,8 %), н-алканов $C_{12}$-$C_{31}$ до 11,3 %, изоалканов $C_{12}$-$C_{31}$ до 16 % и кислородсодержащих соединений до 5,3 %. Отношение олеинов к парафинам подтверждает преимущественное преобладание ненасыщенных соединений. Согласно полученным экспериментальным данным, от применения различных методов обработки ожидаются следующие результаты: промывка водой удалит содержащиеся в шламе хлориды и оксисоединения, при этом основная часть углеводородов сохранится; промывка бензином удалит неполярные алканы и, вероятно, часть оксисоединений; прокаливание удалит практически все остаточные углеводороды.

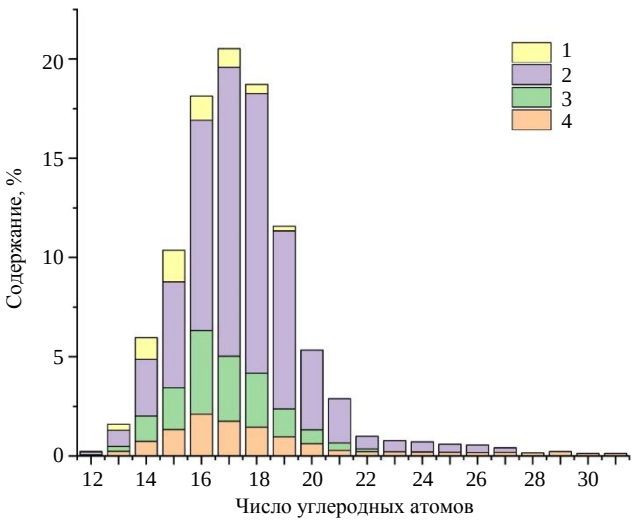



Рис.2. Молекулярно-массовое распределение углеводородов в исходном буровом шламе

1 – оксисоединения; 2 – ненасыщенные углеводороды; 3 – изоалканы; 4 – алканы

Для определения количества остаточных углеводородов в буровом шламе использовали метод экстрактивности вытяжки исходного бурового шлама до и после очистки. Навеску образца массой 5 г перемешивали с 50 мл дихлорметана при комнатной температуре (22±1 °С) в течение 5 ч. Полученную вытяжку фильтровали, после чего осадок промывали 50 мл дихлорметана. Далее объединенный экстракт упаривали на роторном испарителе при



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

температуре 25 °С и давлении 50 мм рт.ст. Масса сухого остатка, показывающая количество остаточных углеводородов, в процентах от массы исходной навески: состав 1 – 2,2; состав 2 – 1,2; состав 3 – до 0,05; состав 4 – 1,0.

*Таблица 2*

**Групповой состав углеводородов в исходном буровом шламе, мас.%**

| Продукты | Групповой состав | | Всего | Изо/н-* | О/П** |
|---|---|---|---|---|---|
| | $C_{12}$-$C_{18}$ | $C_{19+}$ | | | |
| н-алканы | 7,1 | 4,8 | 11,9 | 6,9 | 2,4 |
| Изоалканы | 13,0 | 3,0 | 16,0 | | |
| Ненасыщенные углеводороды | 46,0 | 20,8 | 66,8 | | |
| Оксисоединения | 5,0 | 0,3 | 5,3 | | |
| Сумма | 71,1 | 28,9 | 100 | | |

* Изо/н- – отношение углеводородов изостроения к углеводородам нормального строения.
** О/П – отношение олефинов к парафинам.

Согласно полученным данным, при промывке водой (состав 2) удалось снизить содержание остаточных углеводородов на 45 % (с 2,2 до 1,2 мас.%). Прокаливание шлама (состав 4) демонстрирует практически схожий результат – степень очистки от углеводородов составляет около 55 %. Вероятно, этот эффект связан с коксованием тяжелой фракции углеводородов вследствие низкой температуры прокаливания (400 °С), необходимой для полного протекания реакции пиролиза. Данный вывод подтверждается исследованием авторов [37], показывающим, что при пиролизе углеводородов в температурном диапазоне 600-800 °С происходит образование жидких ароматических соединений с последующим коксообразованием. Однако при температуре 600 °С процессы коксообразования протекают уже довольно активно, причем соотношение кокса максимально при 650 °С. Этот вывод коррелирует с результатами исследования, поскольку процессы коксообразования начинаются при температурах ниже 600 °С. Промывка бензином (состав 3), который является неполярным растворителем, демонстрирует наилучший результат удаления остаточных углеводородов – масса сухого остатка составила менее 0,05 %, что соответствует степени очистки более 97 %.

В качестве подтверждения эффективности применяемых методов обработки и оценки снижения содержания остаточных углеводородов, находящихся в потерях при прокаливании (ППП), проведен анализ химического состава бурового шлама с различными способами обработки. Результаты исследования представлены в табл.3.

*Таблица 3*

**Химический состав бурового шлама, мас.%**

| Состав | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | BaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $TiO_2$ | $Fe_2O_3$ | MnO | $P_2O_5$ | Cl | $SO_3$ | ППП | ∑ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 59,47 | 14,92 | 4,01 | 1,31 | 0,36 | 2,34 | 2,34 | 0,60 | 4,10 | 0,08 | 0,14 | 1,43 | 0,82 | 8,09 | 100 |
| 2 | 60,45 | 16,44 | 4,17 | 1,56 | 0,31 | 1,75 | 2,81 | 0,67 | 4,81 | 0,06 | 0,17 | 0,05 | 0,23 | 6,52 | 100 |
| 3 | 60,05 | 16,62 | 4,00 | 1,58 | 0,31 | 1,93 | 2,68 | 0,65 | 4,83 | 0,08 | 0,15 | 0,48 | 0,19 | 6,44 | 100 |
| 4 | 60,27 | 15,77 | 4,23 | 1,62 | 0,33 | 2,18 | 3,35 | 0,57 | 5,32 | 0,11 | 0,17 | 1,12 | 0,27 | 4,68 | 100 |

Согласно полученным данным, буровой шлам Уренгойского НГКМ относится к алюмосиликатным низкокальциевым отходам с преимущественным содержанием оксидов кремния и алюминия в суммарном количестве 74,39 %, что характерно для терригенных отложений ачимовской толщи. Повышенное содержание хлоридов ($Cl^-$) объясняется применением реагентов хлорида натрия (NaCl) или хлорида калия (KCl) в буровом растворе для ингибирования набухания глин. Наличие оксида бария в буровом шламе связано с применением барита ($BaSO_4$) в качестве утяжелителя бурового раствора. Также стоит отметить высокое содержание потерь при прокаливании, составляющих более 8 %. В них входят остаточные углеводороды, разложение карбонатов и удаление химически связанной воды.

Промывка водой при 75 °С (состав 2) эффективно удалила часть хлоридов и сульфатов. При этом общее содержание ППП снизилось на 19,5 %, что коррелирует с данными экстрактивности,


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

поскольку вода удаляет углеводороды с 45 %-ной эффективностью. Аналогичные результаты демонстрирует промывка бензином (состав 3), за исключением отличия в большей концентрации хлора, при этом остальные показатели схожи с составом 2. Прокаливание шлама (состав 4) демонстрирует наилучшие результаты по уменьшению количества ППП, вероятно связанного с удалением химически связанной воды и частичным удалением легколетучей фракции углеводородов. При сравнительном анализе методов обработки бурового шлама выявлена их селективность очистки: промывка водой эффективно удаляет хлориды, но хуже органическую фракцию; бензин эффективно удаляет остаточные углеводороды, но хуже хлориды; прокаливание при 400 °С, вероятно, эффективно удаляет химически связанную воду, при этом сохраняется высокое содержание хлоридов и органики.

Для определения функциональных групп буровых шламов с применением различных методов очистки проведена ИК-Фурье-спектроскопия, результаты которой представлены на рис.3. Во всех спектрах поглощения наблюдаются характерные для алюмосиликатных материалов валентные колебания связей Si–O–Si и Si–O–Al в широкой среднечастотной области 1200-900 и 550-500 $см^{-1}$. Присутствие валентных симметричных карбоксилатных групп в области 1350-1530 $см^{-1}$ указывает на наличие как неполярных углеводородов, так и остаточных солей карбоновых кислот, что также коррелирует с результатами хроматографии. Их сохранение связано с тем, что полярные органические соли не растворяются бензином, поскольку он является неполярным растворителем. Стоит отметить, что интенсивность пиков карбоксилатных групп идентична при промывке бензином и водой, которая в свою очередь является полярным растворителем. Вероятно, это связано с тем, что промывка водой осуществлялась однократно без длительного перемешивания. В противоположном случае применение длительного перемешивания снизило содержание и степень поглощения карбоксилатных групп аналогично прокаливанию (состав 4).

Узкая полоса поглощения при 2300-2400 $см^{-1}$, соответствующая атмосферному углекислому газу $CO_2$, также подтверждается исследованием авторов [38] (дублеты $CO_2$ на 2360 и 2340 $см^{-1}$). В области 2800-2950 $см^{-1}$ на спектрах исходного шлама (рис.3, линия 1) присутствуют валентные колебания метиленовых связей С–Н, соответствующих н- и изоалканам, которые также были идентифицированы методом ГХ-МС. При методах обработки (рис.3, линии 2-4) интенсивность связей С–Н ниже, что также подтверждает эффективность очистки. Широкая интенсивная полоса валентных колебаний О–Н при 3600-3300 $см^{-1}$ в шламах 1-3 включает структурную (химически связанную) воду глинистых минералов (например, монтмориллонита) или частично адсорбированную воду. Наиболее существенные изменения в ИК-спектрах протекают при прокаливании шлама: уменьшение интенсивности и увеличение ширины плеча валентных колебаний Si–O–Si (1200-900 и 550-500 $см^{-1}$), связанных с частичным переходом силикатов в аморфную фазу; снижение интенсивности полос поглощения карбоксилатных групп (1350-1530 $см^{-1}$) с выделением $CO_2$ или образованием кокса вследствие термической деструкции некоторых карбоксилатов; а также удаление полос С–Н и О–Н, связанных с разложением большинства углеводородов и удалением химически связанной воды из кристаллической решетки глинистых минералов.

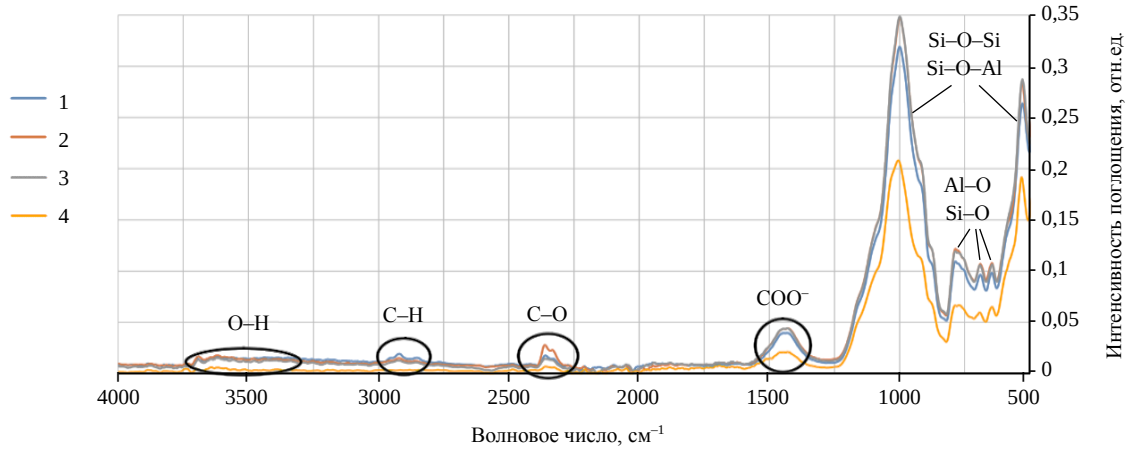



Рис.3. ИК-спектры буровых шламов

1 – исходный шлам без обработки; 2 – шлам, промытый водой; 3 – шлам, промытый бензином; 4 – шлам, прокаленный при 400 °С



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

© Е.А.Яценко, С.В.Трофимов, Б.М.Гольцман, Л.В.Климова, 2026

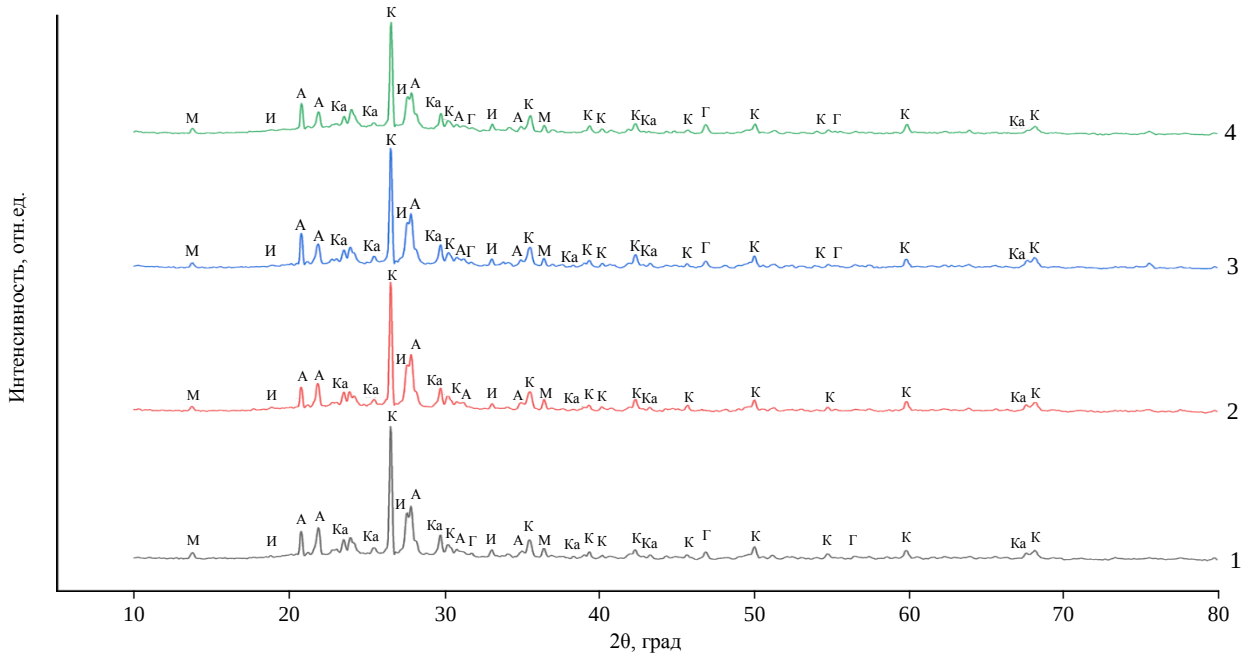



Рис.4. Рентгенограммы буровых шламов

1 – исходный шлам без обработки; 2 – шлам, промытый водой; 3 – шлам, промытый бензином; 4 – шлам, прокаленный при 400 °С
К – кварц ($SiO_2$); М – монтмориллонит $(Na,Ca)_{0,33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2 \cdot nH_2O$; Г – галит (NaCl); А – альбит ($Na[AlSi_3O_8]$);
И – иллит $(K_{0,75}(H_3O)_{0,25})Al_2(Si_3Al)O_{10}((H_2O)_{0,75}(OH)_{0,25})_2$; Ка – кальцит ($CaCO_3$)

Для установления структурообразующих минералов бурового шлама проведен рентгенофазовый анализ, результаты которого представлены на рис.4. Рентгенограммы, полученные методом качественного рентгенофазового анализа, демонстрируют схожие результаты. Составы 1-3 имеют относительно равную степень кристалличности и положение пиков. Единственное отличие заключается в отсутствии пиков галита в составе 2, что подтверждает эффективность промывки горячей водой. Стоит отметить, что идентификация галита зарегистрирована на границе чувствительности дифрактометра. Принципиальные изменения характерны для состава 4: прокаливание буровых шламов снижает интенсивность всех пиков, причем наибольший эффект сказывается на пике монтмориллонита, который отсутствует в углах съемки 20,1-20,3° 2θ. К тому же наблюдается незначительное повышение аморфного гало, присутствующего в углах съемки 19-32° 2θ. Количественный рентгенофазовый анализ, полученный с применением программного обеспечения MAUD, представлен в табл.4.

Сравнительный анализ количественного рентгенофазового состава обработанных образцов подтвердил эффективность удаления галита при промывке водой без влияния на остальные фазы, что коррелирует с результатами предыдущих исследований. Промывка бензином также частично снижает количество галита и аморфной фазы, однако снижение последней вероятнее вызвано погрешностью метода расчета, чем ее вымыванием, поскольку органические растворители не способны взаимодействовать с силикатной или алюмосиликатной структурой. Прокаливание шлама при 400 °С приводит к сильной деструкции глинистых слоистых минералов – монтмориллонита и частично иллита, которые содержат в составе химически связанную воду. Повышение содержания аморфной фазы также связано с их разложением и частичным переходом продуктов деструкции в аморфную составляющую. Кварц, альбит и кальцит сохраняют кристаллическую структуру, что подтверждает их термическую стабильность при 400 °С. В целом проведенный качественный и количественный рентгенофазовый анализ полностью коррелирует с результатами предыдущих исследований.

*Таблица 4*

**Количественный рентгенофазовый анализ бурового шлама, мас.%**

| Фаза | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Кварц | 62,63 | 63,73 | 63,64 | 69,04 |
| Монтмориллонит | 10,02 | 10,78 | 11,11 | 2,03 |
| Галит | 2,81 | – | 1,01 | 1,52 |
| Альбит | 6,01 | 6,38 | 6,06 | 7,11 |
| Иллит | 11,51 | 11,76 | 11,62 | 8,12 |
| Кальцит | 4,01 | 3,92 | 4,03 | 4,06 |
| Аморфная | 3,01 | 3,43 | 2,53 | 8,12 |
| ∑ | 100 | 100 | 100 | 100 |


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

На основании технологии и методик расчета физико-механических характеристик синтезированы модельные образцы пропантов: 1п – на основе шлама без обработки; 2п – на основе шлама, промытого водой; 3п – на основе шлама, промытого бензином; 4п – на основе шлама, прокаленного при 400 °С. Их внешний вид до и после обжига и усредненные свойства представлены на рис.5 и в табл.5.

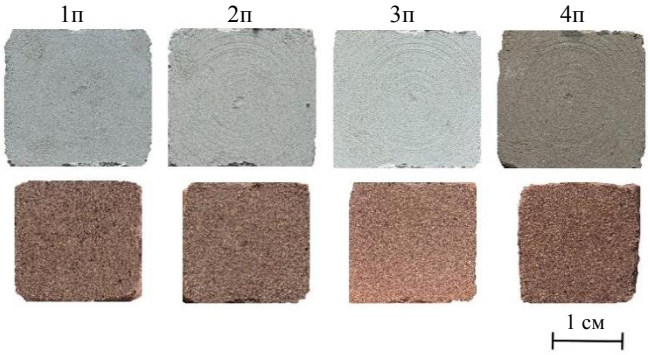



Рис.5. Внешний вид модельных образцов пропантов до (верхний ряд) и после (нижний ряд) обжига

*Таблица 5*

**Физико-механические свойства модельных образцов пропантов**

| Состав | Плотность, кг/м$^3$ | Предельная прочность на сжатие, МПа | Коэффициент спекания |
|---|---|---|---|
| 1 | 1771±40 | 91,17±2,53 | 1,27±0,05 |
| 2 | 1865±16 | 125,38±3,71 | 1,35±0,01 |
| 3 | 1884±48 | 99,51±4,67 | 1,39±0,05 |
| 4 | 1889±32 | 74,79±3,94 | 1,41±0,04 |

Полученные физико-механические свойства модельных образцов пропантов полностью коррелируют с результатами XRF-, FTIR- и XRD-анализов. Максимальная прочность на сжатие (125,38±3,71 МПа) соответствует модельным образцам пропантов, синтезированным с применением бурового шлама, промытого горячей водой. Высокие механические характеристики, вероятно, связаны с удалением галита из структуры шлама при сохранении кристаллической структуры всех глинистых минералов, что подтверждается исчезновением пиков NaCl с рентгенограммы (см. рис.4) и количественным содержанием фаз (табл.5). Промывка бензином обеспечивает удаление углеводородов, однако сохраняет галит, что приводит к снижению прочности модельных образцов пропантов в среднем на 26 % (99,5 МПа) относительно состава 2. В то же время состав 3 демонстрирует увеличение прочности на 9 % относительно состава 1. Наименьшую прочность демонстрирует образец с применением прокаленного бурового шлама (74,79±3,94 МПа). Низкие прочностные характеристики обусловлены сохранением NaCl и деструкцией глинистого минерала – монтмориллонита, необходимого для обеспечения оптимальной пластичности керамической массы. При синтезе гранул пропанта соблюдение данного условия наделяется важным значением, что подтверждается исследованием авторов, добавляющих глину в малопластичную смесь на основе боксита и золы-уноса [39]. Изменение цвета модельных образцов пропантов со светло-серого на рыжеватый оттенок обусловлено образованием гематита ($Fe_2O_3$) в результате окисления железа до $Fe^{3+}$ при обжиге.

Для установления структурообразующих минералов модельных образцов пропантов проведен рентгенофазовый анализ, результаты которого представлены на рис.6. Количественный рентгенофазовый анализ, полученный с применением программного обеспечения MAUD, представлен в табл.6.

При высокотемпературной обработке буровых шламов и боя тарного стекла образовались новые кристаллические фазы муллита, анортита и гематита. Образование анортита проходит согласно реакциям

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow;$$

$$CaO + Al_2O_3 + 2SiO_2 \rightarrow CaAl_2Si_2O_8.$$

В реакции образования анортита взаимодействуют кальцит и алюмосиликатные минералы. При нагревании до 700-850 °С кальцит разлагается на оксид кальция и углекислый газ. В то же время разлагаются и глинистые минералы, высвобождающие оксиды кремния и алюминия, которые затем вступают в реакцию с оксидом кальция, образуя анортит.

Образование гематита происходит в результате последовательного окисления соединений железа через промежуточное образование магнетита ($Fe_3O_4$) по реакциям

$$6FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4;$$

$$4Fe_3O_4 + O_2 \rightarrow 6Fe_2O_3.$$



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

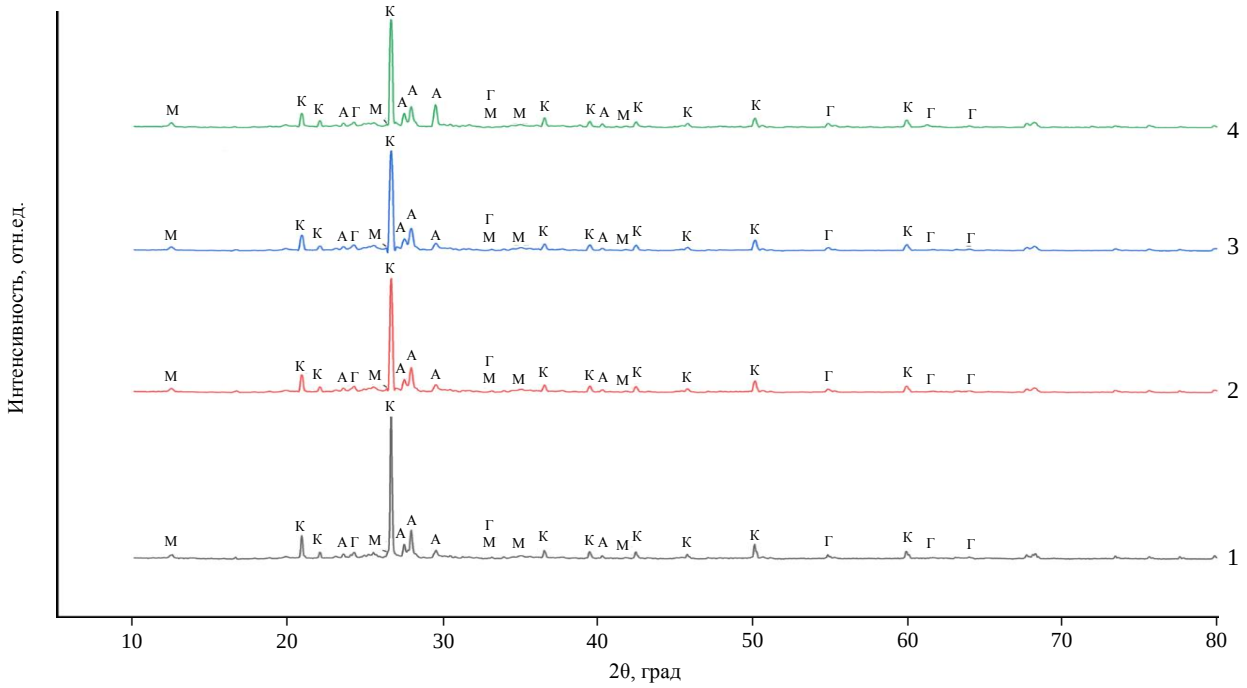



Рис.6. Рентгенограммы модельных образцов пропантов
1 – 1п; 2 – 2п; 3 – 3п; 4 – 4п
К – кварц ($SiO_2$); М – муллит ($Al_6Si_2O_{13}$); А – анортит ($CaAl_2Si_2O_8$); Г – гематит ($Fe_2O_3$)

*Таблица 6*

**Количественный рентгенофазовый анализ модельных образцов пропантов, мас.%**

| Фаза | 1п | 2п | 3п | 4п |
|---|---|---|---|---|
| Кварц | 63,78 | 57,03 | 60,13 | 66,86 |
| Муллит | 15,82 | 23,43 | 18,67 | 10,06 |
| Анортит | 7,65 | 9,27 | 8,34 | 6,41 |
| Гематит | 5,1 | 6,78 | 7,13 | 7,59 |
| Аморфная | 7,65 | 3,49 | 5,73 | 9,08 |

Полученные результаты рентгенофазового анализа выявили прямую зависимость предельной прочности на сжатие модельных образцов пропантов от содержания муллита. Состав 2п характеризуется максимальным содержанием муллита (23,43 %) и минимальным содержанием аморфной фазы (3,49 %), что обеспечивает максимальную прочность. Аналогичная зависимость подтверждается исследованиями других авторов [40, 41]. Вероятно, удаление хлористых соединений и сохранение глинистых минералов создают оптимальные условия для муллитообразования. Состав 3п занимает промежуточное значение по содержаниям муллита и аморфной фазы, а также значению предельной прочности на сжатие. Установлена зависимость – увеличение содержания муллита и уменьшение аморфной фазы позволяют получать пропанты с наибольшей прочностью.

Механизм муллитообразования в синтезированных модельных образцах пропантов включает несколько стадий. При нагреве выше 900 °С глинистые минералы дегидроксилируются и разрушаются с образованием метастабильной аморфной алюмосиликатной фазы по упрощенным формулам

$$\text{Монтмориллонит} \rightarrow Al_2O_3{\cdot}2SiO_2\ (\text{аморфный}) + R_2O + XO + H_2O\uparrow;$$

$$\text{Иллит} \rightarrow Al_2O_3{\cdot}2SiO_2\ (\text{аморфный}) + K_2O + H_2O\uparrow,$$

где XO – щелочноземельные металлы (Ca, Mg); $R_2O$ – щелочные металлы (Na, K).

Введение дополнительного $Al_2O_3$ (5 мас.% сверх 100 %) смещает локальный химический состав в область, благоприятную для кристаллизации первичного муллита по твердофазному механизму

$$Al_2O_3 + 2SiO_2 \rightarrow 3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2.$$

Бой тарного стекла, содержащий аморфный $SiO_2$ и $Na_2O$, выступает в роли флюса. При температуре 1100 °С он образует силикатный расплав, который способствует растворению кварца


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

и остаточных алюмосиликатов, ускоряя диффузию $Al^{3+}$ и $Si^{4+}$, а также снижая энергию активации зарождения кристаллов муллита. Фторид натрия дополнительно снижает температуру спекания, взаимодействуя с $SiO_2$ с образованием газообразного $SiF_4$. При этом выделяющийся $Na_2O$ дополнительно снижает вязкость расплава. Совокупное действие флюсующих компонентов (бой тарного стекла и NaF) позволяет проводить зарождение кристаллов муллита при 1100 °С, тогда как обычно для его образования требуется температура 1300-1400 °С.

В составе 2п сохранение кристаллической структуры глинистых минералов и отсутствие хлоридов обеспечивают максимальную реакционную способность алюмосиликатов, что подтверждается высоким выходом муллита (23,43 %) и минимальным содержанием аморфной фазы (3,49 %). В составе 4п предварительное прокаливание при 400 °С приводит к частичной дегидратации и аморфизации глинистых минералов еще до стадии высокотемпературного спекания. При последующем обжиге они не рекристаллизуются полностью в муллит, а остаются в виде инертного алюмосиликатного стекла, что подтверждается низким выходом муллита (10,06 %) и высоким содержанием аморфной фазы (9,08 %).

Влияние остаточных углеводородов на структуру и механические свойства модельных образцов пропантов носит разнообразный характер. В составе 1п при обжиге происходит пиролиз органики с выделением газов ($CO_2$, $H_2O$, $CH_4$), что приводит к формированию пористости и микродефектов вследствие локального перенапряжения. Это подтверждается снижением предела прочности при сжатии (91,17 МПа) по сравнению с составом 2п (125,38 МПа). Частичное удаление углеводородов водой снижает газовыделение, но сохраняющаяся органика, вероятно, локализована в крупных порах и не оказывает критического дефектообразующего действия при условии свободного извлечения газов. Напротив, промывка бензином почти полностью исключает газовыделение, однако прочность (99,51 МПа) не достигает уровня состава 2п из-за сохранившихся хлоридов (0,48 %), которые при обжиге могут вызывать частичную деструкцию. В составе 4п происходит коксование тяжелых углеводородов – твердый углеродистый остаток препятствует спеканию и муллитообразованию, а также создает центры напряжений, которые приводят к минимальной прочности (74,79 МПа). Таким образом, оптимальная подготовка шлама должна обеспечивать не только максимальное удаление углеводородов, но и полное удаление хлоридов, а также сохранение кристаллической структуры глинистых минералов и отсутствие термодеструкции, что в совокупности является необходимыми условиями успешного синтеза пропантов.

Промывка бурового шлама водой рекомендуется как оптимальный метод подготовки буровых шламов, обеспечивающий удаление хлоридов, сохранение глинистых минералов и получение высокопрочных (до 125 МПа) керамических пропантов для их дальнейшего использования в качестве расклинивающих агентов. В рамках будущих исследований планируются следующие направления: изучение механохимической активации основных прекурсоров и влияние на свойства пропантов; подбор более распространенных вспомогательных сырьевых материалов, аналогичных бою тарного стекла; снижение плотности пропантов, а также гранулирование и оценка соответствия их свойств нормативным документам.

**Заключение**

В результате проведенных исследований установлено, что метод очистки бурового шлама Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения существенно влияет на физико-механические свойства синтезируемых керамических модельных образцов пропантов. Показано, что исходный буровой шлам содержит 2,2 мас.% остаточных углеводородов и хлоридов (1,43 мас.% Cl), а также является полиминеральным алюмосиликатным сырьем с преобладанием кварца, монтмориллонита и иллита.

Выявлена следующая селективность методов очистки:

• промывка водой, нагретой до температуры 75 °С, наиболее эффективно удаляет хлориды (снижение Cl до 0,05 мас.%) при сохранении кристаллической структуры глинистых минералов; степень очистки от углеводородов составляет 45 %;

• промывка бензином обеспечивает максимальное удаление углеводородов (степень очистки до 97 %), но менее эффективна в отношении хлоридов (0,48 мас.% Cl);



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

• прокаливание при 400 °С не только не удаляет углеводороды полностью (остаток 1,0 мас.%) из-за коксования тяжелых фракций, но и приводит к деструкции глинистых минералов и увеличению аморфной фазы до 8,12 % (против 3,01 % в исходном шламе).

Методом количественного рентгенофазового анализа модельных образцов пропантов установлена прямая корреляция между содержанием муллита и предельной прочностью на сжатие. Максимальная прочность (125,38 МПа) достигнута для состава 2п на основе шлама, промытого водой. При этом содержание муллита составило 23,43 % при минимальном количестве аморфной фазы 3,49 %. Минимальная прочность (74,79 МПа) зафиксирована для состава 4п на основе прокаленного шлама при 400 °С, вследствие низкого содержания муллита (10,06 %) и высокой аморфной составляющей (9,08 %).

Практическая значимость работы заключается в научном обосновании выбора промывки водой как оптимального метода подготовки бурового шлама для синтеза высокопрочных (до 125 МПа) пропантов, пригодных для применения в качестве расклинивающих агентов. Это позволяет не только утилизировать отходы бурения III и IV классов опасности, но также вовлечь их в производственный процесс, получить экономически ценный продукт, снижая при этом нагрузку на шламовые амбары и почвенные горизонты.

Направления будущих исследований включают подбор более доступных и распространенных аналогов боя тарного стекла в качестве вспомогательной добавки; разработку методов снижения плотности пропантов; гранулирование полученных составов и оценку их соответствия нормативным требованиям, предъявляемым к пропантам.

*Авторы выражают благодарность инженерам ЦКП «Нанотехнологии» А.Н.Яценко и И.В.Лаврентьеву за выполнение рентгенофазовых исследований и младшему научному сотруднику НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы» А.А.Чемес за проведение газовой хромато-масс-спектрометрии.*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Hongfang Lu, Lijun Guo, Yitong Zhang.* Oil and gas companies' low-carbon emission transition to integrated energy companies // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 686. P. 1202-1209. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.014

2. *Danilov-Danilyan V.I., Klyuev N.N., Kotlyakov V.M.* Russia in the Global Natural and Ecological Space // Regional Research of Russia. 2023. Vol. 13. № 1. P. 34-57. DOI: 10.1134/S2079970522700472

3. *Awewomom J., Dzeble F., Takyi Y.D. et al.* Addressing global environmental pollution using environmental control techniques: a focus on environmental policy and preventive environmental management // Discover Environment. 2024. Vol. 2. № 8. DOI: 10.1007/s44274-024-00033-5

4. *Congbin Cheng, Ahmad S.F., Irshad M. et al.* Impact of Green Process Innovation and Productivity on Sustainability: The Moderating Role of Environmental Awareness // Sustainability. 2023. Vol. 15. Iss. 17. № 12945. DOI: 10.3390/su151712945

5. *Semenova T., Martínez Santoyo J.Y.* Economic Strategy for Developing the Oil Industry in Mexico by Incorporating Environmental Factors // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 1. № 36. DOI: 10.3390/su16010036

6. *Pereira L.B., Sad C.M.S., Castro E.V.R. et al.* Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review // Fuel. 2022. Vol. 310. Part B. № 122301. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122301

7. *Gaurina-Međimurec N., Simon K., Mavar K.N. et al.* The Circular Economy in the Oil and Gas Industry: A Solution for the Sustainability of Drilling and Production Processes // Circular Economy on Energy and Natural Resources Industries. Springer, 2024. P. 115-150. DOI: 10.1007/978-3-031-56284-6_7

8. *Varonka M.S., Lombard M.A., Preston T.M. et al.* Land application of drill waste: A scope analysis // Journal of the Air & Waste Management Association. 2025. Vol. 75. Iss. 8. P. 656-669. DOI: 10.1080/10962247.2025.2516576

9. *Daae H.L., Kulvik H.K., Madsen A.M. et al.* Occupational exposure during treatment of offshore drilling waste and characterization of microbiological diversity // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 681. P. 533-540. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.131

10. *Dabo K. Jnr.* Estimation of Drilling Waste Generation for Effective Waste Management // Journal of Petroleum Technology. 2023. Vol. 13. Iss. 1. P. 14-19.

11. *Kujawska J., Pawłowska M., Cel W., Pawłowski A.* Potential influence of drill cuttings landfill on groundwater quality – comparison of leaching tests results and groundwater composition // Desalination and Water Treatment. 2016. Vol. 57. Iss. 3. P. 1409-1419. DOI: 10.1080/19443994.2015.1030117

12. *Kujawska J., Pawłowska M.* Effect of drill cuttings addition on physicochemical and chemical properties of soil and red clover (*Trifolium pretense* L.) growth // PLOS ONE. 2020. Vol. 15 (11). № e0242081. DOI: 10.1371/journal.pone.0242081



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

13. *Bakhtiari H., Amanipoor H., Battaleb-Looie S.* Analysis of heavy metal accumulation and environmental indicators in fluids and drilling cuttings // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2024. Vol. 14. Iss. 1. P. 41-58. DOI: 10.1007/s13202-023-01690-7

14. *de Costa de Azevedo P.C., Krzyzaniak S.R., Ferreira B.L. et al.* Chemical fractionation and risk assessment of metals in drill cuttings from onshore and offshore oil and gas wells // Marine Pollution Bulletin. 2025. Vol. 213. № 117635. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2025.117635

15. *Elrayah A.A.I.* Enhancing drilling operations: prioritizing wellbore integrity, formation preservation, and effective mud waste control (case study) // Journal of Engineering and Applied Science. 2024. Vol. 71. № 86. DOI: 10.1186/s44147-024-00383-0

16. *Jie Yang, Jinsheng Sun, Ren Wang, Yuanzhi Qu.* Treatment of drilling fluid waste during oil and gas drilling: a review // Environmental Science and Pollution Research. 2023. Vol. 30. Iss. 8. P. 19662-19682. DOI: 10.1007/s11356-022-25114-x

17. *Mahmoud H., Mohammed A.A.A., Nasser M.S. et al.* Green drilling fluid additives for a sustainable hole-cleaning performance: a comprehensive review // Emergent Materials. 2024. Vol. 7. Iss. 2. P. 387-402. DOI: 10.1007/s42247-023-00524-w

18. *Njuguna J., Siddique S., Kwroffie L.B. et al.* The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations // Waste Management. 2022. Vol. 139. P. 362-380. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.12.025

19. *Ahmed T.A., Ahmed D.G.* Bioremediation of oil contaminated drill-cuttings using different strains of native soil bacteria and fungi from the Kurdistan Region of Iraq // Malaysian Journal of Sustainable Agriculture. 2024. Vol. 8. Iss. 1. P. 20-27. DOI: 10.26480/mjsa.01.2024.20.27

20. *Carignan M.-P., Lake C.B., Menzies T.* Assessment of two thermally treated drill mud wastes for landfill containment applications // Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2007. Vol. 25. Iss. 5. P. 394-401. DOI: 10.1177/0734242X07073652

21. *Reyes-Urrutia A., Fernandez A., Torres-Sciancalepore R. et al.* Sustainable Hazardous Mitigation and Resource Recovery from Oil-Based Drill Cuttings Through Slow Pyrolysis: A Kinetic and Product Analysis // Sustainability. 2026. Vol. 18. Iss. 2. № 969. DOI: 10.3390/su18020969

22. *Lounas O., Malek A., Aribi C. et al.* Ten-year assessment of the stabilization/solidification method applied to Algerian oil-based drill cuttings: Ain Amenas oil field case study // Environmental Monitoring and Assessment. 2025. Vol. 197. Iss. 11. № 1256. DOI: 10.1007/s10661-025-14738-4

23. *Grabsch A.F., Fawell P.D., Davies M.G.* Flocculating fine cuttings particles suspended within partially hydrolysed polyacrylamide (PHPA) solutions used as drilling fluids in mineral exploration // Minerals Engineering. 2024. Vol. 206. № 108510. DOI: 10.1016/j.mineng.2023.108510

24. *Lebedev A., Cherepovitsyn A.* Waste Management during the Production Drilling Stage in the Oil and Gas Sector: A Feasibility Study // Resources. 2024. Vol. 13. Iss. 2. № 26. DOI: 10.3390/resources13020026

25. *Deming Xiong, Chaoqiang Wang, Xin Huang.* Particular pollutants, physical properties, and environmental performance of porous ceramsite materials containing oil-based drilling cuttings residues // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29. Iss. 5. P. 7202-7213. DOI: 10.1007/s11356-021-16120-6

26. *Haoyue Yang, Zhichao Wang, Zechun Huang et al.* Development and validation of diffusion-controlled model for predicting polycyclic aromatic hydrocarbons from baking-free brick derived from oil-based drilling cuttings // Journal of Environmental Management. 2023. Vol. 325. Part A. № 116497. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116497

27. *Chao-qiang Wang, Ji-zhong Jin, Xiao-yan Lin et al.* A study on the oil-based drilling cutting pyrolysis residue resource utilization by the exploration and development of shale gas // Environmental Science and Pollution Research. 2017. Vol. 24. Iss. 21. P. 17816-17828. DOI: 10.1007/s11356-017-9199-7

28. *Yuanyi Yang, Hui Li, Zhenghuan Lei et al.* Preparation and characterization of high-performance ceramic proppant from recycling utilization of oil-based drilling cuttings pyrolysis residues // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. № 2345. DOI: 10.1038/s41598-024-52334-7

29. *Wenshi Liu, Xingyang Xiong, Yulong Zhao et al.* Preparing high-strength and low-density proppants with oil-based drilling cuttings pyrolysis residues and red mud: Process optimization and sintering mechanism // Fuel. 2023. Vol. 331. Part 1. № 125777. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125777

30. *Pin Xie, Hongyi Wu, Hang Yang et al.* Utilization of Cr-Contaminated Oil-Based Drilling-Cuttings Ash in Preparation of Bauxite-Based Proppants // Environmental Engineering Science. 2022. Vol. 39. Iss. 1. P. 73-80. DOI: 10.1089/ees.2020.0490

31. *Qingxin Meng, Keqing Li, Siqi Zhang et al.* Preparation and sintering mechanism of ceramic proppants with oil-based drill cuttings pyrolysis residues // Ceramics International. 2025. Vol. 51. Iss. 5. P. 6183-6194. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.12.062

32. *Hongxian Chen, Zhenghuan Lei, Yuanyi Yang et al.* Fabrication of oil-based drilling cutting pyrolysis residues-based ceramic proppants with high strength, low acid solubility and green characteristics through high efficiency microwave sintering method // Process Safety and Environmental Protection. 2025. Vol. 200. № 107398. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107398

33. *Яценко Е.А., Смолий В.А., Головко Д.А., Климова Л.В.* Рециклинг отходов бурения нефтедобывающей отрасли арктической зоны РФ: анализ возможности применения // Стекло и керамика. 2025. Т. 98. № 8. С. 45-50. DOI: 10.14489/glc.2025.08.pp.045-050

34. *Чумаков А.А.* Технология алюмосиликатных пропантов на основе бурового шлама Восточно-Чумаковского нефтяного месторождения: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И.Платова, 2024. 19 с.

35. *Головко Д.А.* Влияние добавок на прочностные свойства расклинивающих агентов, синтезированных на основе буровых отходов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2024. Т. 9. № 11. С. 71-80. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-11-71-80



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

36. *Соколов А.Н., Соромотин В.Н., Яковенко Р.Е., Савостьянов А.П.* Методология определения состава жидких продуктов синтеза Фишера-Тропша на основе данных газовой хроматографии / масс-спектрометрии // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2019. Вып. 3 (203). С. 38-42. DOI: 10.17213/0321-2653-2019-3-38-42

37. *Haowen Li, Yong Wu, Zixin Yang et al.* Effect of molecular structure on pyrolysis coking performances of hydrocarbons at different temperatures // Fuel. 2022. Vol. 326. № 125095. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125095

38. *Volkov D.S., Rogova O.B., Proskurnin M.A.* Organic Matter and Mineral Composition of Silicate Soils: FTIR Comparison Study by Photoacoustic, Diffuse Reflectance, and Attenuated Total Reflection Modalities // Agronomy. 2021. Vol. 11. Iss. 9. № 1879. DOI: 10.3390/agronomy11091879

39. *Qiang Ren, Yuhan Ren, Huanhuan Li et al.* Preparation and characterization of high silicon ceramic proppants using low grade bauxite and fly ash // Materials Chemistry and Physics. 2019. Vol. 230. P. 355-361. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2019.04.009

40. *Heng Zhang, Tian Yuan, Liehui Zhang et al.* $MnO_2$-$TiO_2$ composite additives driven low-cost fabrication of coal gangue/bauxite ceramic proppants // Ceramics International. 2025. Vol. 51. Iss. 24. Part A. P. 41293-41303. DOI: 10.1016/j.ceramint.2025.06.353

41. *Kaiyue Wang, Huijun Wang, Yi Zhou et al.* Preparation and characterization of low-cost high-performance mullite-quartz ceramic proppants for coal bed methane wells // Science and Engineering of Composite Materials. 2018. Vol. 25. Iss 5. P. 957-961. DOI: 10.1515/secm-2017-0142

***Авторы*: Елена Альфредовна Яценко**, *д-р техн. наук, заведующий кафедрой* (*Южно-Российский государственный политехнический университет* (*НПИ*) *имени М.И.Платова, Новочеркасск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-2242-1765*, **Сергей Вячеславович Трофимов**, *младший научный сотрудник* (*Южно-Российский государственный политехнический университет* (*НПИ*) *имени М.И.Платова, Новочеркасск, Россия*), *23zarj23@mail.ru*, *https://orcid.org/0000-0003-0373-3683*, **Борис Михайлович Гольцман**, *канд. техн. наук, доцент* (*Южно-Российский государственный политехнический университет* (*НПИ*) *имени М.И.Платова, Новочеркасск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-0013-5557*, **Людмила Васильевна Климова**, *канд. техн. наук, доцент* (*Южно-Российский государственный политехнический университет* (*НПИ*) *имени М.И.Платова, Новочеркасск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-1396-0006*.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*