DOI: 10.24892/RIJIE/202504014

Экологичная альтернатива: разработка строительных материалов на базе буровых отходов

Смолий В.А., Головко Д.А.,Трофимов С.В., Гольцман Б.М., Старовойтова О.А.
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова
г. Новочеркасск, Российская Федерация
dima.golovko.9898@mail.ru

Аннотация. **Строительная промышленность является одной из ведущих отраслей экономики в стране. Среди них широкое применение получили материалы из глинистого сырья. Одним из таких материалов являются керамстены. В связи с истощением запасов месторождений глины, являющейся основным материалом в сырьевой смеси для производства керамических стройматериалов, актуален дальнейший поиск решений необходимых для разработки ресурсосберегающих технологий. Другой актуальной проблемой на сегодняшний день является утилизация техногенных отходов. Одним из видов таких отходов является буровой шлам, образующийся при бурении нефтедобывающих скважин. Актуальность исследований заключается в необходимости разработки новых современных технологий и способов производства керамстенов, с использованием в сырьевом составе буровых шламов с месторождений нефти Арктической зоны РФ. Это обусловлено стремительным ростом объема не перерабатываемых отходов бурения в шламонакопителях нефтедобывающих станций, и истощением запасов природного глинистого сырья, используемого в керамической промышленности. Исследование направлено на утилизацию и повторное использование бурового шлама, что позволит создать резерв доступного конкурентоспособного сырья для производства керамстенов.**

Ключевые слова**: техногенные отходы, буровой шлам, силикатные материалы, глина, ресурсосберегающие технологии, утилизация, керамстены.**

Введение

В современном мире углеводородная энергетика занимает значительную долю в общем энергобалансе. В связи с этим нефтегазовые компании продолжают увеличивать объемы разведки и добычи нефти и газа, что приводит к росту соответствующих отходов. Особенно актуальна данная тема для Арктической зоны Российской Федерации, где сосредоточены значительные запасы углеводородов. Однако, ведение добычи в таких уязвимых экосистемах требует особого внимания к экологическим аспектам. Учитывая, что экология окружающей среды больше всего страдает от массовых загрязнений различных эко-сфер, то запуск её восстановительного эффекта очищения не сможет состояться без участия человечества.

При бурении нефтяных и газовых скважин в арктической зоне, одним из источников загрязнения экосистемы являются запасы бурового шлама (буровых отходов) – выбуренной горной породы, в составе которой содержатся остатки бурового раствора, буровых сточных вод и флюида пластов скважин. За последние десятилетия объемные показатели залежей бурового шлама возрастают. В связи с этим, экологическое состояние мира страдает от негативного влияния техногенных отходов. Нефтедобывающая промышленность не самый большой производитель отходов, но они также оказывают негативное воздействие на окружающую среду. С 2009 года и по настоящее время объемы буровых шламов увеличились в десятки раз, так как его переработка не осуществляется естественным путем. Также увеличение объемов неперерабатываемого бурового шлама связано с тем, что количество скважин, созданных для добычи нефти, возросло [1-2].

Эти виды отходов снижают экономическую эффективность предприятий, так как требуют выделения территории для хранения, увеличивают экологические платежи и выбросы загрязняющих веществ. По данным Росприроднадзора с 2019 по 2024 год объем утилизированных и обезвреженных отходов производства возрос, однако одновременно увеличился и их объем образования. Основными способами обращения с отходами в добыче полезных ископаемых стали утилизация и обезвреживание, составляющие 45,6 % и 40,4 % от общего числа отходов соответственно, в то время как на захоронение приходится около 12 %. В последние годы наблюдается положительная динамика в обращении с отходами от добычи нефти и газа, выраженная в увеличении доли утилизированных и обезвреженных отходов. Основной причиной роста процента утилизированных отходов является государственная политика в области обращения с ними, а второстепенной - повышение экологической осознательности предприятий. Однако количество образующихся отходов в настоящее время в 2,2 раза превышает объем перерабатываемых.

Учитывая вышеизложенное, восстановление природных экосистем стало одной из ключевых задач, требующих срочного поиска эффективных решений. В условиях серьезного негативного влияния массового загрязнения на окружающую среду крайне важно активно участвовать в её восстановлении. Одним из наиболее перспективных направлений рециклинга буровых шламов является синтез высокоэффективных строительных материалов (керамстенов – керамических конструкционных материалов)) на базе буровых отходов. Кроме того, использование буровых шламов в качестве сырьевых материалов поможет сократить потребность промышленности в природном сырье.

* Работа выполнена при финансосовой 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 получени-ем эффективных строительных материалов и расклинивающих агентов" (FENN-2025-0001). Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Строительство, архитектура и техносферная безопасность", https://iccats.org

Материалы и методы

Объектом исследования выбраны буровые шламы Арктической зоны РФ: Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ), Комсомольское (НГКМ), Суторминское (НГКМ), расположенные в Пуровском районе Ямало-Ненецкого автономного округа Арктической зоны Предварительно, для исследования возможности использования буровых шламов синтезе керамстенов установлен их усредненный химический состав с помощью рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре последовательного действия с дисперсией по длине волны. Результаты анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Усредненный химический состав исследуемых буровых отходов

Компонент	Месторождения		
	Уренгойское	Комсомольское	Суторминское
Na_2O	2,37	2,43	2,55
MgO	1,33	1,42	1,36
Al_2O_3	12,11	12,53	10,84
SiO_2	63,23	52,45	41,92
K_2O	2,37	4,29	9,25
CaO	4,06	4,13	8,48
TiO_2	0,61	0,54	0,49
MnO	0,078	0,136	0,054
Fe_2O_3	4,15	4,42	5,25
P_2O_5	0,14	0,18	0,23
SO_3	0,83	0,94	0,43
Cl	0,26	1,45	5,96
ППП	8,19	14,78	13,09

Как видно из таблицы 1 химический анализ подтверждает преимущественное содержание в буровых шламах основных минералообразующих элементов, таких как SiO_2 и Al_2O_3. Также стоит отметить, что в буровом шламе Суторминского месторождения содержание SiO_2 в 1,5 раза меньше, чем в шламе Уренгойского и Комсомольского месторождения. Оксиды кремния и алюминия снижают температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) глинистого материала, при низких значениях которого термостойкость сырья повышается. Это указывает на то, что буровой шлам Суторминского месторождения обладает лучшей термостойкостью, что позволяет материалу не растрескиваться при резких и многократных изменениях температуры.

Для определения возможности применения исследуемых буровых шламов, как сырьевого компонента при производстве керамстенов, был проведен сравнительный анализ буровых шламов с глиной (табл. 2), добываемой на территории ЮФО (Владимировского месторождения Ростовской области). Проведены исследования физико-химических и технологических свойств рассматриваемых материалов.

Из таблицы 2: значительное содержание в глине оксидов SiO_2 (63,20 %) и Al_2O_3 (20,45 %). Глина Владимировского месторождения состоит преимущественно из каолинита (37,8 %) и небольшого количества (10,6 %) гидрослюды. Она включает в себя между пакетами гидрослюды пакет монтмориллонита (9,6 %) с примесями серицита (7,7 %) и зерен кварца (26,4 %). Исследуемая глина обладает ячеистой микроструктурой с содержанием полевого шпата 5,9 %.

Таблица 2

Химический состав глины Владимировского месторождения Ростовской области

Материал	Содержание, мас. %										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	P_2O_5	K_2O	Na_2O	SO_3	ППП
Глина	63,2	20,45	3,26	1,37	0,48	0,90	0,06	2,05	0,61	0,04	7,37

По результатам сравнительного анализа химических составов буровых шламов и глины установлено, что наличие основных глинообразующих оксидов в буровых шламах позволяет применять их в качестве сырьевого компонента при производстве керамстенов. Исследуемый вид техногенных отходов является близким по составу и свойствам к глинистому сырью, используемом в технологии производства строительной керамики.

Также для определения применимости буровых шламов для синтеза керамстенов проведены радиологические испытания, результаты которых представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты радиологических исследований

Буровые отход	Результаты исследований; единицы измерения; доверительная вероятность
Комсомольское месторождение	(191±27) Бк/кг; P = 0,95
Уренгойское месторождение	(139±17) Бк/кг; P = 0,95
Суторминское месторождение	(194±27) Бк/кг; P = 0,95

Основываясь на полученных результатах установлено, что изучаемые буровые шламы относятся к первому классу строительных материалов, поскольку их эффективная удельная активность составляет (191±27), (139±17) и (194±27) Бк/кг, соответственно. Что позволяет заключить: данные отходы бурения можно использовать при производстве любых видов строительных материалов.

Рентгенофазовый анализ буровых шламов проводился с целью выявления пиков, по которым возможно идентифицировать присутствующие в материале фазы или минералы. Полученные рентгенограммы исследуемых материалов представлены на рис. 1.

Как видно из полученных результатов, во всех исследуемых буровых шламах присутствуют кристаллические фазы диоксида кремния, полевого шпата, карбоната кальция, которые составляют основу алюмосиликатной матрицы. Следовательно, буровые шламы Уренгойского, Комсомольского и Суторминского месторождения по своему химическому и минералогическому составу соответствуют сырью для производства керамстенов.

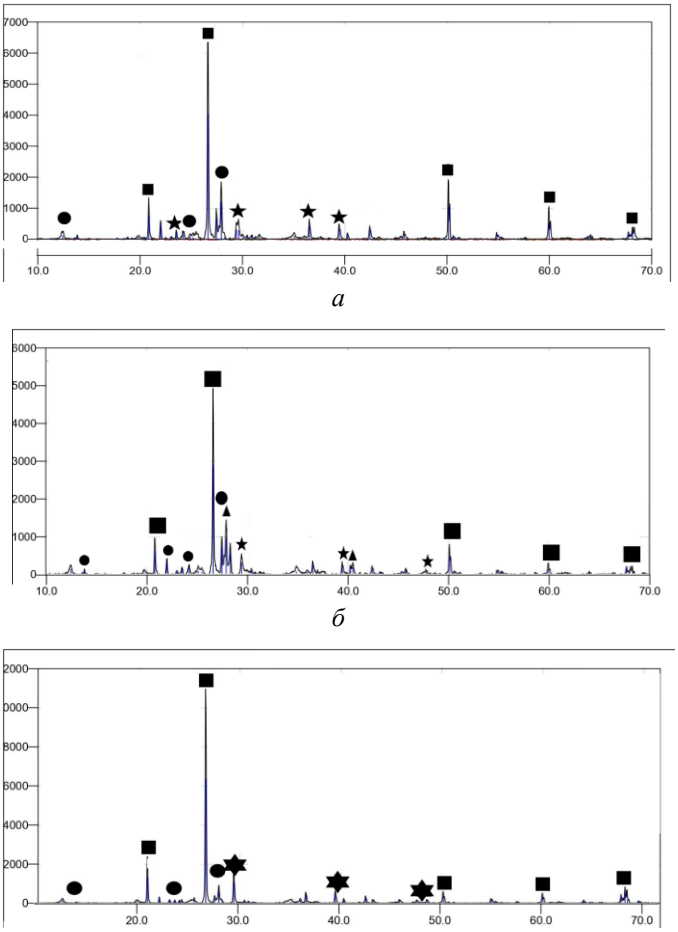

Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа бурового шлама Уренгойского (*а*), Комсомольского (*б*) и Сутормінского (*в*) месторождений:
■ – диоксид кремния; ● – полевой шпат;
★ – карбонат кальция; ▲ – KCl

Для исследования возможной доли замены буровым шламом основного сырьевого компонента в производстве керамстенов – глины, проведен ряд технологических испытаний в соответствии с ГОСТ 21216-2014.

Опытные образцы отформованы из глины Владимировского месторождения Ростовской области (ВКС) и бурового шлама с различным процентным соотношением (табл. 4).

Таблица 4

Состав сырьевой смеси опытных образцов

Материал	Содержание, %		
	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Глина ВКС	40	50	60
Буровой шлам	60	50	40

Для определения формовочной влажности вручную подготавливают глинистое тесто нормальной густоты с последующим его формованием. После этого полученные образцы взвешивают и отправляют в сушильный шкаф до полного высыхания. Затем охлаждают и снова взвешивают. По результатам эксперимента выполняют расчеты абсолютной и относительной влажности.

Определение пластичности проводится двумя методами: на приборе Васильева и в соответствии с ГОСТ 5180-2015. Замешанное однородное тесто помещают в чашу прибора Васильева. Чаше, закрепленной стержнем, дают свободно падать и ударяться об опорную плиту. Это делается до тех пор, пока не получится нужная консистенция рабочей массы. Как только достигается необходимая консистенция, берется проба для определения влажности материала в состоянии верхнего предела пластичности. Оставшаяся масса используется для определения нижнего предела пластичности. По полученным данным проводят расчет числа пластичности.

Результаты и обсуждение

Результаты определения формовочной влажности необходимой для получения нормальной густоты испытуемого сырья для дальнейших исследований представлены в табл. 5. Точное значение формовочной влажности не регламентируется, но является одним из важных показателей при выборе способа производства керамических материалов.

Таблица 5

Результаты определение формовочной влажности глины Владимировского месторождения (ВКС) и бурового шлама Уренгойского, Комсомольского и Сутормінского месторождений

Материал	Влажность, %	
	Абсолютная влажность	Относительная влажность
Глина ВКС	45,49	31,27
Уренгойское месторождение	22,28	18,.98
Комсомольское месторождение	47,88	32,38
Сутормінское месторождение	79,30	44,75

Из полученных результатов видно, что количество необходимой влаги для каждого сырьевого компонента: глины ВКС, бурового шлама Уренгойского, Комсомольского и Сутормінского месторождений соответственно равны 31,27 %, 18,98 %, 32,38 % и 44,75 %. Из этого следует, что данное сырье может использоваться при производстве керамического кирпича пластическим способом формования, так как формовочная влажность при таком способе составляет не менее 18 %.

Число пластичности определяет, при каких значениях материал способен образовывать пластичную массу, склонную к деформации без проявления разрыва в сплошности. Результаты определения числа пластичности представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты определения числа пластичности

Материал	$W_т$, %	$W_р$, %	П, %
Глина ВКС	75,13	39,63	35,50
Уренгойское месторождение	36,57	28,13	8,44
Комсомольское месторождение	69.38	35,23	34,15
Сутормінское месторождение	76,25	38,73	37,52

Из табл. 6 можно заметить, что число пластичности глины ВКС, а также бурового шлама Уренгойского, Комсомольского и Сутормин-ского месторождений составляет соответственно 35,50 %, 8,44 %, 34,15 %, 37.52%. Согласно классификации по ГОСТ 9169–2021 выявлено, что глина ВКС, буровой шлам Комсомольского и Сутормин-ского месторождений относится к высокопластичным материалам, а буровой шлам Уренгойского месторождения к умеренно-пластичным. Таким образом, можно сделать вывод, что чем пластичнее материал, тем шире его интервал влажности, при котором проявляется пластичность. Если материалы обладают формовочной способностью, то их сочетание допустимо.

На основании полученных данных отформованы опытные образцы с использованием в сырьевой смеси исследуемых буровых шламов и глины, а также исследованы обжиговые свойства исходного сырья.

Для получения опытных образцов был использован буровой шлам Уренгойского, Комсомольского и Сутор-минского месторождений нефти и глины Владимировского месторождения, предварительно просушивался до остаточной влажности 4-6 %, с дальнейшим измельчением и просеиванием на сите 008, затем формовалось по 3 образца каждого состава для каждого шлама с последующей сушкой и обжигом при температуре 1000 °С, внешний вид образцов представлен на рис. 2. В процессе обжига температура повышалась со скоростью 2 °/мин и при конечной температуре была выдержка в течение 1 часа. Охлаждение естественное, продолжительностью не менее 10 часов. В процессе обжига наблюдался процесс выгорания органических составляющих бурового шлама в интервале температур 500-600 °С, что свидетельствует об утилизации отхода в технологическом процессе производства керамстенов.

После завершения обжига каждый образец подвергся детальному визуальному осмотру, в ходе которого фиксировались следующие параметры: расположение образцов в печи (для анализа влияния температурных зон на свойства материала); цвет черепка и равномерность его распределения (показатель однородности состава и качества обжига); наличие трещин (может указывать на внутренние напряжения, вызванные резкими перепадами температуры или неоптимальным составом смеси); изменение геометрии образцов (обусловлено неравномерной усадкой из-за колебаний температуры в печи или различий в составе керамической массы); деформации и признаки оплавления (свидетельствуют о локальном или общем пережоге).

В ходе исследования установлено, что образцы с содержанием бурового шлама 40 % продемонстрировали наилучшие технологические характеристики: спекшийся, прочный черепок с однородной микроструктурой; стабильный цвет в диапазоне от красно-коричневого до светло-оранжевого; отсутствие трещин и деформаций, что подтверждает оптимальность температурного режима и состава смеси. В то же время образцы с повышенным содержанием бурового шлама (60 %) показали признаки небольшого пережога, потемнение черепка до тёмно-коричневого оттенка, что связано с избыточной температурой или продолжительностью обжига.

Увеличение доли отходов приводит к ухудшению качества изделий из-за пережога, что может негативно сказаться на их эксплуатационных свойствах.

а

б

в

Рис. 2. Внешний вид образцов на базе Уренгойского (а), Комсомольского (б) и Сутормин-ского (*в*) месторождений

Заключение

Использование техногенных отходов, в частности буровых шламов нефтяных месторождений, в сырьевой смеси для производства керамстенов позволяет получить положительный экологический эффект в результате обезвреживания нефтешламов и экономии основного глинистого сырья, используемого в технологии производства керамических стройматериалов.

В ходе проведенных испытаний выявлено, что частичное замещение глинистого сырья на буровые отходы Арктической зоны РФ в производстве керамстенов допустимо. При этом данный строительный материал сохраняет свои основные свойства и может быть использован в строительстве согласно ГОСТ 530-2018. Предложенная технология поспособствует утилизации буровых отходов нефтедобывающих станций и впоследствии сокращению в природе объема техногенных не перерабатываемых отходов, а также сохранению природных запасов глинистого сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Information on the state and prospects for using the mineral resource base of the Southern Federal District for 2021. URL: https://www.rosnedra.gov.ru (дата обращения 23.11.2023).
2. Dynamics of industrial production in 2022-2023: URL: https://rosstat.gov.ru (дата обращения 23.11.2023).
3. Kuvykin N.A., Bubnov A.G. and Grinevich V.I. Hazardous industrial waste. Ivanovo: Ivan. state chemical-technological un-t, 2004. – 148 p.
4. Pichugin E.A. Assessment of the impact of drilling waste on the environment. Young scientist. – 2013. – no. 9. – P. 122-124.
5. Tretyak A.A. Identification of drilling wastes and their use / A.A. Tretyak, E.A. Yatsenko, S.A. Onofrienko E.V. Karelskaya // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. – 2021.
6. Yatsenko E.A. Prospects for the use of drilling fluids for the synthesis of aluminosilicate proppants / E.A. Yatsenko, A.A. Tretyak, A.A. Chumakov D.A. Golovko // Materials today: Materials. – 2021. – vol. 38. – P. 1886-1888.
7. Yatsenko E.A. Research on the synthesis of proppants used for oil production by hydraulic lining / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, A.A. Chumakov, N.A. Vilbitskaya, Li Wensheng // Material Science Forum. 1037 (2021), pp. 181-188.
8. Goltsman B.M. Influence of fluxes on the synthesis of porous materials based on native silicate raw materials / B.M. Goltsman, E.A. Yatsenko, N.Yu. Komunzhieva, L.A. Yatsenko, V.S. Gerashchenko, V.A. Smoliy // Glass and Ceramics (English translation of Glass and Ceramics). – 2010. – vol. 77(5-6). – P. 240-244.
9. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. Production of ceramic products. – Moscow: BAT Bureau, 2015. – P. 66-78.
10. Wendlandt W. Thermal methods of analysis. – M.: Mir, 1978. – 527 p.
11. Shestak Ya. Theory of thermal analysis: Physical and chemical properties of solid inorganic substances. – M.: Mir, 1987. – 456 p.
12. Landfill for the disposal and processing of drilling waste and oil production: Fundamental technological solutions. Book. 3. Development of fundamental solutions for the neutralization and disposal of drilling waste and oil-contaminated sands. Ed. Savelyeva V.N. – Surgut: NGDU, 1996. – 101 p.
13. Deneko Yu. About the problem of drilling waste processing // Oil and gas of Siberia. – 2014. – no. 1(14). – P. 29-30.
14. Maksimovich V.G. Neutralization of oil sludge and cleaning oil pipelines of oil deposits in the Krasnodar Territory / V.G. Maksimovich, N.N. Bukov // Materials of the XI International Seminar on Magnetic Resonance (spectroscopy, tomography and ecology). – Rostov-on-Don, 2013. – P. 120.
15. Aminova A.S. The use of oil sludge is a rational way of their disposal / A.S. Aminova, S.A. Gaibullaev, K.A. Juraev // Young scientist. – 2015. – no. 2. – P. 124-126.
16. Pashchenko A.A. Physical chemistry of silicates: a textbook for universities. – M.: Higher school, 1986. – 367 p.
17. Chemical technology of ceramics and refractories: textbook / Ed. Budnikova P.P. and Poluboyarinova D.N. – M.: Stroyizdat, 1972. – 552 p.
18. Gorshkov B.S. Physical chemistry of silicates and other refractory compounds: textbook / B.S. Gorshkov, V.G. Saveliev, N.F. Fedorov. – Moscow: Higher School, 1988. – 400 p.
19. Strelov K.K. Teoreticheskie osnovy tekhnologii refractory materials: a tutorial. – M.: Metallurgy, 1985. – 480 p.
20. Al'myashev V.I. Thermal methods of analysis: textbook. / V.I. Al'myashev, V.V. Gusarov. – St. Petersbug: SPbGTU (LETI), 1999. – 40 p.
21. SanPiN 2.6.1.2523 "Radiation Safety Standards (NRB-99/2009)". – M.: Standardinform. 2010. – 222 p.

DOI: 10.24892/RIJIE/20250414

An Eco-friendly Alternative: Developing Construction Materials from Drilling Waste

Smoliy V.A., Golovko D.A., Trofimov S.V., Goltsman B.M., Starovoitova O.A.
South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov
Novocherkassk, Russian Federation
dima.golovko.9898@mail.ru

Abstract. **The construction industry is one of the main leading sectors of the country's economy. Materials made from clay raw materials are widely used in this industry. One such material is expanded clay. Due to the depletion of clay deposits, which are the main material in the raw mixture for the production of ceramic building materials, it is important to continue searching for solutions to develop resource-saving technologies. Another pressing issue today is the disposal of industrial waste. One of the types of such waste is drilling mud, which is generated during the drilling of oil-producing wells. The relevance of research lies in the need to develop new modern technologies and methods for the production of expanded clay bricks using drilling mud from oil fields in the Arctic zone of the Russian Federation. This is due to the rapid increase in the volume of non-recyclable drilling waste in the slurry storage facilities of oil-producing stations, and the depletion of natural resources.**

Keywords: **industrial waste, drilling mud, silicate materials, clay, resource-saving technologies, recycling, expanded clay.**