

DOI: 10.15593/2409-5125/2021.01.10

УДК 628.54

Ю.А. Кетов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПРИРОДООХРАННОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ СЕРНИСТО-ЩЕЛОЧНЫХ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ОТХОДОВ В СИЛИКАТНЫЙ МАТЕРИАЛ

Рост добычи и переработки нефтепродуктов и освоение труднодоступных месторождений приводит как к увеличению количества нефтепродуктов, так и к снижению их качества, выражающихся в увеличении количества серосодержащих отходов. При этом если для жидких нефтепродуктов широко применяются непрерывно совершенствующиеся методы гидрообессеривания и окислительной конверсии по Клаусу, то для легких углеводородов до сих пор применяется преимущественно щелочная очистка. Щелочной очистке подвергают попутные нефтяные газы, сжиженные газы пиролиза и реже – бензиновые, керосиновые и дизельные фракции. При этом требования к содержанию серы в готовых продуктах постоянно ужесточаются.

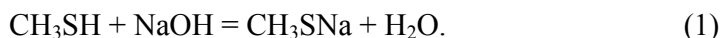
Образующиеся в результате очистки попутных нефтяных газов сернисто-щелочные отходы содержат в своем составе неорганические сульфиды, меркаптиды натрия и карбонаты. Процесс их обезвреживания не имеет единого технического решения вследствие высокой токсичности раствора и высокой доли в нем воды. В статье представлены исследования автора, направленные на обоснование и последующее внедрение технологии термического обезвреживания сернисто-щелочных стоков в присутствии аморфного оксида кремния. Методами термогравиметрии и сканирующей электронной микроскопии доказано образование в процессе термообработки из отходов и аморфного оксида кремния стеклообразного материала и окисление сероорганических соединений до оксида серы (IV). Показано, что предложенный метод позволяет перерабатывать щелочные серосодержащие отходы в силикатный материал, безопасный для размещения в окружающей среде.

Ключевые слова: сернисто-щелочные отходы, стеклообразование, силикатный материал, окисление, оксид серы (IV), экологическая безопасность.

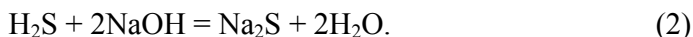
Предприятия химической и нефтехимической отраслей промышленности вследствие специфики объектов переработки и производственного цикла оказывают воздействие на окружающую среду, что требует разработки методов инженерной защиты от образующихся в производственных процессах отходов. Одна из основных экологических проблем связана с необходимостью утилизации сернисто-щелочных стоков, образующихся в ряде процессов нефте- и газоочистки [1]. Поэтому задача получения

безопасных продуктов при утилизации сернисто-щелочных отходов является весьма актуальной.

В процессе абсорбции метилмеркаптана щелочным раствором происходит реакция образования метилмеркаптида:



Сероводород образует сульфид:



Дополнительно содержащийся в газах оксид углерода (IV) также абсорбируется раствором щелочи по реакции



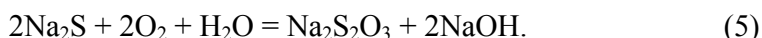
В реальности в газах в незначительных количествах могут присутствовать серосодержащие примеси в виде высших меркаптанов, сероуглерода CS_2 и оксид-сульфид углерода COS . В результате абсорбции меркаптаны образуют меркаптиды, а сероуглерод и сульфид углерода переходят в сульфиды и карбонаты. Кроме того, гидролиз приводит к сложному равновесию между кислыми и нейтральными анионами, в результате чего вся композиция приобретает весьма сложное химическое строение. Тем не менее можно утверждать, что абсорбированные соединения серы сохраняют степень окисления +2 и высокую опасность для окружающей среды.

Существуют различные методы обезвреживания сернисто-щелочных отходов [2, 3], из которых наиболее приемлемыми являются физические или безреагентные методы, химические методы и комплексные методы очистки. В результате соединения серы (+2) концентрируются и переводятся в менее токсичные соединения. Для увеличения концентрации соединений серы применяют предварительную обработку серной кислотой, что приводит к полному или частичному удалению отдувкой сульфидной и меркаптидной серы в виде сероводорода и его дальнейшему использованию в концентрированном виде [4]. Однако данный метод приводит к безвозвратной потере щелочного раствора и возрастанию объемов стоков, хотя и менее токсичных.

Для реализации возврата щелочного абсорбента в циклический процесс применяется метод регенерации полученных сернисто-щелочных отходов. Процесс осуществляется методом ректификации раствора методами паровой дистилляции и кипячения в присутствии и отсутствии инертного газа [5]. Процесс дистилляции может быть улучшен в присутствии экстрагентов в виде пропана и бутана [6] или при оптимизации работы колонны и применении специальных насадок [7]. Данное техническое решение позво-

ляет частично вернуть в цикл щелочной раствор, но ограничивается накоплением в рабочем растворе карбонатов и оставляет открытым вопрос использования сконцентрированных сероводорода и меркаптанов.

Для соединений серы (II) всегда менее токсичными являются соединения серы (IV) и (VI). К процессам окисления соединений серы (II) до соединений серы (IV) можно отнести метод локального окислительно-восстановительного обезвреживания, в ходе которого меркаптиды и сульфид натрия окисляются в сульфонат и тиосульфат натрия по реакциям [8]:



Процесс окисления может быть ускорен в присутствии катализатора. Так, применение фталоцианина кобальта в качестве катализатора существенно ускоряет процесс окисления меркаптидов [9].

Следует отметить, что помимо физических и химических методов утилизации сернисто-щелочных отходов имеется информация о биологических методах [10]. В этом случае отработанный щелочной раствор был биологически обработан и регенерирован для повторного использования бактериями *Thiobacillus denitrificans* для окисления сульфидной серы до приемлемого уровня для повторного использования щелочного раствора. Но данный метод может быть весьма ограниченно применен на практике вследствие низкой производительности и требований по температурным режимам.

Все указанные методы требуют значительных капитальных и текущих затрат, связанных с эксплуатацией сложных и материалоемких установок, постоянного использования расходных реагентов и выделения образующихся продуктов.

Помимо выделения раствора щелочи и возвращения его в производственный цикл представляет интерес с технологической точки зрения переработка его в различные продукты. В этом случае серосодержащие примеси должны утилизироваться в безопасные соединения в процессе переработки. Для обеспечения экономической целесообразности такого решения получаемые продукты должны представлять маркетинговый интерес. Одним из наиболее известных технических решений по использованию раствора гидроксида натрия является гидротермальный способ вскрытия раствором щелочи кремнийсодержащих пород с дальнейшим получением стекольной шихты [11].

Известно, что многие промышленные отходы могут быть переработаны в экологически безопасные керамические продукты термической

обработкой [12]. Кроме того, гидроксид натрия может быть сырьем для введения Na_2O в состав силикатных стекол [13]. Применение щелочного раствора, содержащего соединения серы, для получения силикатных стекол имеет дополнительное преимущество, заключающееся в возможности получения легких стекол ячеистого строения и традиционного применения серосодержащих компонентов при производстве стекол [14]. Поэтому можно ожидать, что синтез силикатных стекол на основе щелочно-силикатного раствора позволит не только получить экологически безопасный стеклообразный материал, но и окислить в процессе синтеза соединения серы (II) до сравнительно менее опасного оксида серы (IV).

Целью настоящего исследования является природоохранное обоснование утилизации серосодержащих щелочных отходов переработкой в стеклообразный силикатный материал и получение из щелочно-силикатных отходов экологически безопасного продукта.

Для проведения исследований были использованы промышленные сернисто-щелочные стоки, содержащие, по данным химического анализа, 8,6 мас. % гидроксида натрия и 1,4 мас. % серы (II). Для исследования возможности связывания в силикат сернисто-щелочных стоков был выбран силикагель КСКГ.

На рис. 1 представлены результаты термогравиметического анализа синхронного с масс-спектрометрией образца, полученного поглощением 3,0 мл сернисто-щелочного раствора 10,0 г силикагеля. В процессе приготовления весь раствор был абсорбирован силикагелем без остатков видимой свободной жидкости.

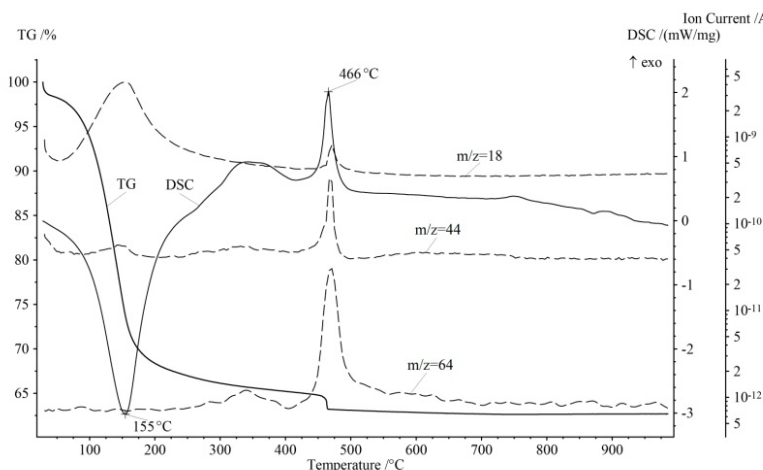
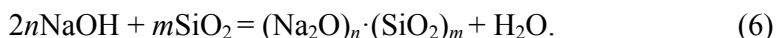


Рис. 1. Результаты синхронного термогравиметического анализа на воздухе образца силикагеля с абсорбированным щелочно-силикатным раствором

Удаление свободной воды происходит при температурах до 100–250 °С с максимумом при 155 °С, что связано с эндотермическим эффектом и соответствующим пиком на кривой ионного тока $m/z = 18$. При этом в указанном температурном интервале наблюдается незначительный пик на кривой ионного тока углекислого газа $m/z = 44$, что соответствует представлениям о ректификации углекислого газа при регенерации щелочного раствора по описанным выше технологическим схемам. Следует отметить, что ионные токи $m/z = 34$ и $m/z = 48$, соответствующие сероводороду и метилмеркаптану, не превышают фоновых значений, что дает основание заключить, что сера (II) остается связанной в виде сульфидов и меркаптидов.

Основные химические превращения происходят в узком температурном интервале 450–510 °С с максимумом при 466 °С. Экзотермический тепловой эффект дает основание предположить, что в данном случае происходит не десорбция, а окисление. Предположение подтверждается наличием пиков углекислого газа и оксида серы (IV) на кривых ионных токов соответственно $m/z = 44$ и $m/z = 64$, которые являются продуктами окисления сульфидов и меркаптидов.

Наличие в указанном температурном интервале пика на кривой ионного тока воды $m/z = 18$ свидетельствует не только об окислении водорода меркаптида до воды, но и о силикатообразовании с нейтрализацией щелочи до образования полисиликата по реакции



Таким образом, абсорбция сернисто-щелочных отходов силикагелем с последующей термообработкой полученной композиции приводит к окислению соединений серы (II) в менее токсичный оксид серы (IV), а гидроксида натрия – в безопасный полисиликат натрия. Однако препятствием для реализации данного процесса на практике является высокая стоимость силикагеля, что было преодолено путем использования природного аналога – трепела [15]. Для практической реализации предложенного метода утилизации сернисто-щелочных отходов был выбран трепел Потанинского месторождения со средним химическим составом (мас. %):

SiO_2 – 76,16

Al_2O_3 – 9,33

Fe_2O_3 – 4,10

CaO – 1,05

MgO – 1,01

SO_3 – 0,31

Наличие на кривых ионного тока углекислого газа $m/z = 44$ дополнительного высокотемпературного пика с максимумом при 647 °С, который отсутствует у силикагеля, может быть объяснен как большей абсорбционной емкостью трепела по отношению к силикагелю и, как следствие, окислением пироуглерода, так и наличием в составе трепела соединений железа (III), кальция и магния, образующих карбонаты и разлагающихся при высоких температурах.

Принципиальным является отсутствие в отходящих газах при нагревании следов сероводорода и меркаптанов, как при использовании силикагеля, так и при использовании трепела. Полученный из трепела и сернисто-щелочных отходов силикатный материал представляет собой пористые гранулы. Микрофотография такой гранулы, обработанной при 700 °С, представлена на рис. 2.

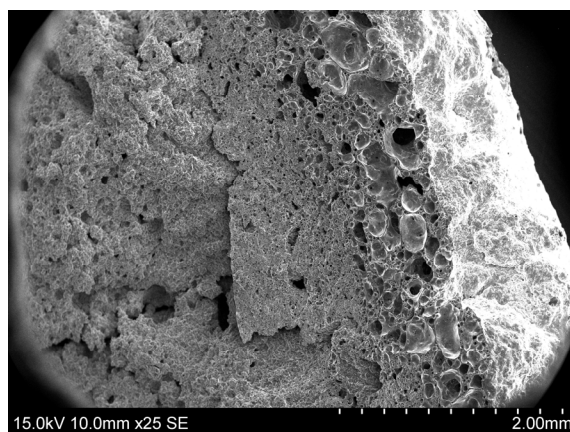


Рис. 2. Фото сканирующей электронной микроскопии гранулы, полученной термообработкой при 700 °С сернисто-щелочного отхода, абсорбированного трепелом

Для анализа опасности исходного отхода и полученного продукта применяли стандартные методики:

- методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодovitости дафний (ФР. 1.39.2007.03222);

- методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей (ФР. 1.39.2007.03223).

В качестве тест-объектов использовали зеленые протококковые водоросли *Scenedesmus quadricauda* (Turp). Breb. и низших ракообразных *Daphnia magna* St. В тест-реакциях наблюдались соответственно измене-

ния (снижения) численности клеток водорослей под воздействием токсических веществ, присутствующих в исследуемой тестируемой водной вытяжке, по сравнению с контролем и гибель 50 % и более дафний при воздействии токсических веществ, присутствующих в исследуемых пробах, по сравнению с контролем.

Условия проведения анализа: условия проведения биотестирования, показатели качества разбавляющей (культивационной, дистиллированной) воды, а также значения водородного показателя (ед. pH), температуры ($^{\circ}\text{C}$), концентраций растворенного кислорода (мг/дм^3) исследуемых водных вытяжек отхода в начале и по завершении эксперимента соответствуют установленным методиками пределам оптимальных значений.

Были исследованы четыре образца:

1 – исходный раствор сернисто-щелочного отхода;

2 – гранулированная композиция, содержащая на 100 мас. частей трепела Потанинского месторождения 40 мас. частей раствора сернисто-щелочного отхода;

3 – гранулированная композиция по п. 2, термообработанная на воздухе при 450°C ;

4 – гранулированная композиция по п. 2, термообработанная на воздухе при 700°C .

Фотографии скола гранул образцов 3 и 4 представлены на рис. 3.

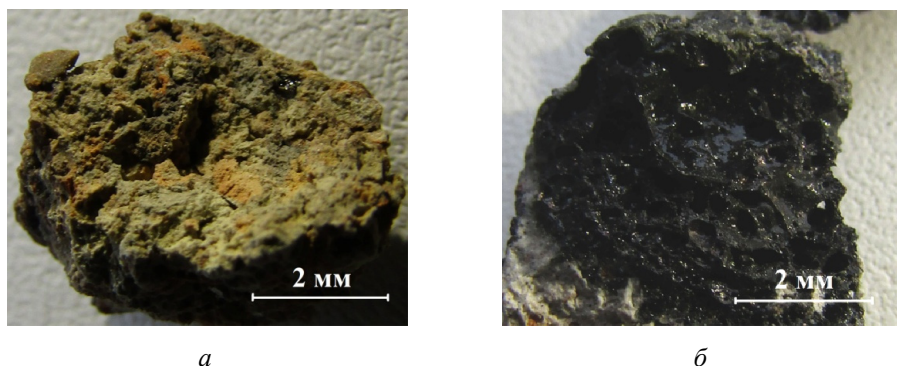


Рис. 3. Фотографии скола гранул образца 3 (а) и образца 4 (б)

Результаты токсикологического анализа образцов представлены в таблице.

Очевидно, что предложенный метод абсорбции сернисто-щелочного отхода трепелом с последующей термообработкой полученных гранул выше 700°C позволяет окислить соединения серы (II) до оксида серы (IV) и получить безопасный для окружающей среды силикатный материал пя-

того класса опасности. Полученный силикатный гранулированный материал по своим структурно-механическим и физико-химическим характеристикам подобен природному щебню и может без ограничений размещаться в окружающей среде, использоваться для технической рекультивации нарушенных земель и применяться в дорожном строительстве.

Результаты токсикологического анализа образцов

Номер образца	Подготовка образца	Результаты анализа на водорослях	Результаты анализа на дафниях	pH вытяжки	Класс опасности*	Опасные свойства
1	Сернисто-щелочной раствор	Наличие острого токсикологического действия при концентрации 0,03 %	Наличие острого токсикологического действия при концентрации 0,02 %	11,5	2	Токсичность
2	Гранулы из трепела и сернисто-щелочного раствора	Наличие острого токсикологического действия при концентрации 7,05 %	Наличие острого токсикологического действия при концентрации 3,44 %	11,5	4	Токсичность
3	Гранулы, прокаленные при 450 °С	Наличие острого токсикологического действия при концентрации 15,37 %	Наличие острого токсикологического действия при концентрации 16,11 %	10,9	4	Токсичность
4	Гранулы, прокаленные при 700 °С	Отсутствие острого токсического воздействия	Отсутствие острого токсического воздействия	8,3	5	Отсутствуют

*В соответствии с «Критериями отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды» (утверждены Приказом МПР от 04.12.2014 № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду»).

В результате проведенного исследования:

1. Предложено техническое решение по утилизации серосодержащих щелочных отходов нефтехимии переработкой в стеклообразный силикатный материал совместной грануляцией с аморфным оксидом кремния и последующим обжигом при температуре 700–800 °С и образованием легкого гранулированного силикатного материала.

2. Доказано, что в ходе предложенного процесса утилизации высокотоксичных сернисто-щелочных отходов щелочь преобразуется в экологически безопасный силикат при взаимодействии с оксидом кремния, а се-

раорганические соединения окисляются с выделением газообразных оксида серы (IV) и оксида углерода (IV).

3. Доказана экологическая безопасность получаемого гранулированного силикатного материала пятого класса опасности и возможность его размещения в окружающей среде при использовании для технической рекультивации нарушенных земель и применении в дорожном строительстве.

Библиографический список

1. Абдрахимов Ю.Р., Ахмадуллина А.Г., Смирнов И.Н. Обезвреживание и использование сернисто-щелочных отходов нефтепереработки и нефтехимии. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1990. – 56 с.
2. Будник В.А., Бобровский Р.И., Бабкин Д.Е. Комплексные методы очистки сернисто-щелочных сточных вод нефтеперерабатывающих производств // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 5. – С. 58–85.
3. Ксандопуло С.Ю., Шурай С.П., Барко А.В. Перспективы очистки стоков нефтеперерабатывающих заводов в целях сохранения качества окружающей среды // Санитарный врач. – 2009. – № 12. – С. 25–33.
4. Вопрос очистки сернисто-щелочных стоков нефтеперерабатывающих предприятий / А.Р. Мурзакова, А.Д. Бадикова Ф.Х., Кудашева, М.А. Цадкин, Р.Н. Гимаев // Известия вузов. Серия: Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50, № 2. – С. 103–104.
5. Treatment of Sulfide Alkali Waste Waters from Mercaptans Using Distillation / A.V. Anisimov, B.V. Andreev, E.A. Eseva, P.D. Polikarpova, A.V. Tarakanova, A.S. Ustinov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 52(4). – P. 673–676.
6. The Optimization of Effective Factors on Mercaptan Extraction by Alkaline Solution / A.S. Afshar, S.R. Hashemi, M. Miri, P. Setayeshi // Petroleum Science and Technology. – 2013. – Vol. 31(22). – P. 2364–2370.
7. Koncsag C.I., Barbulescu A. Modelling the removal of mercaptans from liquid hydrocarbon streams in structured packing columns // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2008. – Vol. 47(9–10). – P. 1717–1725.
8. Поиск путей очистки сернисто-щелочных стоков нефтеперерабатывающих предприятий / А.Д. Бадикова, А.Р. Мурзакова, Ф.Х. Кудашева, М.А. Цадкин, Р.Н. Гимаев // Нефтегазовое дело. – 2005. – № 2. – С. 24–29.
9. Kinetics of catalytic oxidation of sodium ethyl mercaptide / Y.-Y. Zhan, J. Shi, M.-J. Su, Y. Luo, G.-W. Chu, H.-K. Zou, J.-F. Chen // Chemical Engineering Science. – 2020. – 217. – 115516.
10. Sayed Reza Hashemi, Amir Heidarinasab. Spent Caustic Bioregeneration by using Thiobacillus denitrificans Bacteria // Engineering and Technology International Journal of Biotechnology and Bioengineering. – 2012. – Vol. 6, no. 7. – P. 417–419.
11. Мелконян Р.Г., Мелконян Г.Р. Технология получения калиевого и натриевого жидких стекол путем гидротермально-щелочной переработки аморфных горных пород // Техника и технология силикатов. – 2012. – Т. 19, № 4. – С. 20–26.
12. Характеристики керамической массы, модифицированной органическими и минеральными отходами техногенного происхождения / А.С. Карманова, Е.И. Панькова, В.А. Шаманов, А.А. Мартынова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 4 (35). – С. 55–65.
13. Лавров Р.В., Миронович Л.М. Новый способ подготовки стекольной шихты для силикатных стекол с использованием гидроксидов натрия и калия // Физика и химия стекла. – 2018. – Т. 44, № 2. – С. 190–198.
14. Особенности химии газообразования при одностадийном синтезе пеностекла из гидроксида и нитрата натрия / Я.И. Вайсман, Ю.А. Кетов, В.С. Корзанов, М.П. Красновских // Строительные материалы. – 2018. – № 11. – С. 64–67.

15. Утилизация сернисто-щелочных отходов переработкой в ячеистый силикатный материал / Я.И. Вайсман, И.С. Глушанкова, Ю.А. Кетов, Л.В. Рудакова, М.П. Красновских // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 10. – С. 24–27.

References

1. Abdrakhimov Yu.R., Akhmadullina A.G., Smirnov I.N. Neutralization and Use of Sulfur-Alkaline Waste of Oil Refining and Petrochemistry. Moscow: TsNIITEneftkhimPubl., 1990. 56 p.
2. Budnik V.A., Bobrovskii R.I., Babkin D.E. Complex methods of treatment of sulfur-alkaline wastewater of oil refineries // Oil and gas business. 2019. No 5. P. 58-85.
3. Ksandopulo S.Yu., Shurai S.P., Barko A.V. Prospects of Oil Refineries Draining for Safeguarding of Environment Quality // Sanitary Doctor. 2009. No. 12. P. 25-33.
4. Murzakova A.R., Badikova A.D., Kudasheva F.Kh., Tsadkin M.A., Gimaev R.N. The question of clearing of sulfide-alkaline drains of the oil refining enterprises // News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology. 2007. V. 50. No 2. P. 103-104.
5. Anisimov A.V., Andreev B.V., Eseva E.A., Polikarpova P.D., Tarakanova A.V., Ustinov A.S. Treatment of Sulfide Alkali Waste Waters from Mercaptans Using Distillation // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2018. 52(4). P. 673–676.
6. Afshar A.S., Hashemi S.R., Miri M., Setayeshi P. The Optimization of Effective Factors on Mercaptan Extraction by Alkaline Solution // Petroleum Science and Technology. 2013. 31(22). P. 2364–2370.
7. Koncsag C.I., Barbulescu A. Modelling the removal of mercaptans from liquid hydrocarbon streams in structured packing columns // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2008. 47(9-10).-P. 1717–1725.
8. Badikova A.D., Murzakova A.R., Kudasheva F.Kh., Tsadkin M.A., Gimaev R.N. Finding ways of clearing of sulfide-alkaline drains of the oil refining enterprises // Oil and gas business. 2005. No 2. P. 24-29.
9. Zhan Y.-Y., Shi J., Su M.-J., Luo Y., Chu G.-W., Zou H.-K., Chen J.-F. Kinetics of catalytic oxidation of sodium ethyl mercaptide // Chemical Engineering Science. 2020. 217. 115516.
10. Sayed Reza Hashemi, Amir Heidarinasab. Spent Caustic Bioregeneration by using *Thiobacillus denitrificans* Bacteria // Engineering and Technology International Journal of Biotechnology and Bioengineering. 2012. Vol.6. No.7. P. 417-419.
11. Melkonyan R.G., Melkonyan G.R. Technology for the production of potassium and sodium liquid glasses by hydrothermal-alkaline processing of amorphous rocks // Technique and technology of silicates. 2012. Vol. 19. No 4. P. 20-26.
12. Karmanova A.S., Pan'kova E.I., Shamanov V.A., Martynova A.A. Characteristics of ceramic mass modified by organic and mineral waste of technogenic origin // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied Ecology. Urban development. 2019. No 4 (35). P. 55–65.
13. Lavrov R.V., Mironovich L.M. A novel method for preparing a batch of silicate glasses using sodium and potassium hydroxides // Glass Physics and Chemistry. 2018. Vol. 44. No 2. P. 145-151.
14. Vaysman Ya.I., Ketov Yu.A., Korzanov V.S., Krasnovskikh M.P. Features of gas formation chemistry at single-stage synthesis of foam glass from hydroxide and sodium nitrate // Construction Materials. 2018. No. 11. P. 64–67.
15. Vaisman Ya I., Glushankova I.S., Ketov Yu.A., Rudakova L.V., Krasnovskikh M.P. Recovery of sulphur-alkaline waste by processing into cellular silicate material // Ecology and Industry of Russia. 2018. Vol. 22. No 10. P. 24-27.

Получено 25.12.2020

I. Ketov

ENVIRONMENTAL SUBSTANTIATION OF PROCESSING OF SULFUR-ALKALINE PETROCHEMICALS WASTE INTO SILICATE MATERIAL

The growth in the production and refining of petroleum products and the development of hard-to-reach deposits leads both to an increase in the number of petroleum products and to a decrease in their quality, expressed in increasing amount of sulphur-containing waste. At the same time, while continuously improving methods of hydrodesulfurization and oxidative conversion according to Claus are widely used for liquid petroleum products, alkaline purification is still used for light hydrocarbons. Associated petroleum gases, liquefied pyrolysis gases, and, less often, gasoline, kerosene and diesel fractions are subjected to alkaline purification. At the same time, on the one hand, in the process of developing deposits, oil products with a high content of sulfur compounds are involved in production and processing. On the other hand, the requirements for the sulfur content in finished products are constantly being tightened up.

Sulfur-alkaline waste generated as a result of the purification of associated petroleum gases contains inorganic sulfides, sodium mercaptides and carbonates. The process of their neutralization does not have a single technical solution due to the high toxicity of the solution and the high proportion of water in it. The article presents the author's research aimed at substantiation and subsequent implementation of the technology of thermal neutralization of sulfuric-alkaline wastewater in the presence of amorphous silicon oxide. The formation of a glassy material from waste and amorphous silicon oxide during heat treatment and the oxidation of organic-sulfur compounds to sulfur (IV) oxide have been proven by thermogravimetry and scanning electron microscopy. It is shown that the proposed method makes it possible to process alkaline sulfur-containing waste into a silicate material that is safe for placement in the environment.

Keywords: sulfur-alkaline waste, mercaptides, recycling, glass formation, oxidation, sulfur (IV) oxide, environmental safety.

Кетов Юрий Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Охрана окружающей среды», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ketov1992@internet.ru).

Iurii Ketov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: ketov1992@internet.ru).