

**ГЕОТЕХНОЛОГИИ. ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА
И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ**
*GEOTECHNOLOGY. EXTRACTION, PROCESSING
AND THE USE OF SOLID FUEL MINERALS*

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2024-1-137-143>
УДК 665.772:662.813

Поступила в редакцию 18.03.2024
Received 18.03.2024

УТИЛИЗАЦИЯ НЕФТЕШЛАМОВ МЕТОДОМ ПИРОЛИЗА С ТОРФОМ

В. М. Дударчик, В. М. Крайко, Е. В. Ануфриева

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Предложен способ утилизации углеводородсодержащих отходов переработки нефтепродуктов пиролизом их смесей с торфом в подвижном и стационарном слоях с получением жидких и газообразных продуктов и снижением выбросов экологически опасных загрязняющих веществ.

Установлено, что в зависимости от условий проведения процесса пиролиза можно получать различный целевой продукт. При пиролизе смесей торфа с нефтешламами в стационарном слое (при скорости нагрева 8 °С/мин) наибольшая энергетическая продуктивность достигается за счет получения жидкой смолы (выход составляет 40–55 %). В то же время среднескоростной (30–40 °С/мин) пиролиз в подвижном слое дает возможность получать большую энергетическую продуктивность за счет газовой составляющей (выход газа – 65–70 %). Таким образом, сравнительный анализ результатов пиролиза показал, что пиролиз в подвижном слое целесообразнее применять для получения газообразных продуктов, в стационарном слое – для получения жидкой смолы.

Увеличение добавки парафинсодержащих отходов к торфу при пиролизе в стационарном слое вызывает значительный рост жидкой фракции (до 67 % от исходного торфа). Также изменяется качественный состав пиролизного газа, происходит рост содержания непредельных углеводородов и метана, что приводит к увеличению теплоты сгорания пиролизного газа по сравнению с исходным торфом.

Полученные результаты по пиролизу смесевых композиций на основе нефтешламов (два вида) и торфа показали, что указанный способ их утилизации можно оценить как приемлемый в плане получения жидких и газообразных энергоносителей, однако в плане баланса затрат, экономических показателей и других факторов он требует серьезного дополнительного изучения.

Ключевые слова: торф; нефтяные шламы; пиролиз; термодеструкция; смесевые композиции; смола; пиролизный газ; теплота сгорания.

Для цитирования. Дударчик В. М., Крайко В. М., Ануфриева Е. В. Утилизация нефтешламов методом пиролиза с торфом // Природопользование. – 2024. – № 1. – С. 137–143.

UTILISATION OF OIL SLUDGE BY PYROLYSIS WITH PEAT METHOD

V. M. Dudarchik, V. M. Kraiko, A. V. Anufrieva

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The method of the utilisation of the hydrocarbon-containing wastes of oil products refining by the pyrolysis of their mixtures with peat in mobile and stationary layers with liquid and gaseous products obtaining and the reduction of the ecologically dangerous emissions of pollutants is proposed.

It is established that depending on the conditions of pyrolysis process it is possible to obtain different target product. At the pyrolysis of the mixtures of peat with oil sludge in a stationary layer (at heating rate of 8 °C/min) the greatest energy productivity is achieved by liquid tar obtaining (output is 40–55 %). At the same time, medium-speed (30–40 °C/min) pyrolysis in a moving bed makes it possible to obtain greater energy productivity due to the gas component (gas output – 65–70 %). Thus, the comparative analysis of pyrolysis results showed that pyrolysis in a moving layer is more appropriate for gaseous products obtaining, in a stationary layer – for liquid tar obtaining.

An increase in the addition of paraffin-containing waste to peat during pyrolysis in the stationary lawyer leads to a significant increase in the liquid fraction (up to 67 % of the initial peat). The qualitative composition of pyrolysis gas also changes, the content of unsaturated hydrocarbons and methane increases, which leads to an increase in the heat of the combustion of pyrolysis gas compared to the original peat.

The obtained results on the pyrolysis of mixed compositions on the base of oil sludge (two types) and peat have shown that the specified method of their utilisation can be estimated as acceptable in terms of liquid and gaseous energy carriers obtaining, but in terms of the balance of costs, economic indicators and other factors still requires serious additional study.

Keywords: peat; oil sludge; pyrolysis; thermo-destruction; mixed compositions; tar; pyrolysis gas; heat of combustion.

For citation. Dudarchik V. M., Kraiko V. M., Anufrieva A. V. Utilisation of oil sludge by pyrolysis with peat method. *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 137–143.

Введение. Загрязнение окружающей среды нефтяными шламами в настоящее время является одной из наиболее экологоопасных и быстрорастущих проблем, особенно для нефтедобывающих стран. Не менее серьезно эта проблема также стоит и перед странами, активно перерабатывающими нефть, что характерно для Беларуси, в результате чего также накапливаются большие объемы специфических отходов, требующих утилизации.

Нефтяной шлам – это жидкие, пастообразные или твердые отходы, представляющие собой смесь нефти (нефтепродуктов), твердой фазы (частиц грунта и почвы) и воды. Источники образования шламов – процессы добычи углеводородного сырья (образуются буровые шламы, которые размещаются в шламовых амбарах), объекты хранения и переработки нефти и нефтепродуктов (шлам или сточные воды хранятся в отстойниках), а также аварийные разливы (образуются «замазученные» грунты). В любом случае такие шламы рассматривают как отходы и источник проблем, связанных с необходимостью заниматься их утилизацией.

Согласно мониторинговым исследованиям Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, только поверхностных загрязнений нефтешламами (в основном это кислые гудроны, смеси вязких обводненных нефтепродуктов, нефтешламовые отложения и продукты попутной переработки нефти) имеется в объеме более 3,5 млн т.

В качестве основных методов обезвреживания и утилизации нефтеотходов практически используются физические, химические, биохимические, физико-химические, термические, комбинированные методы (основанные на сочетании ранее перечисленных методов) [1, 2].

Основным термическим методом утилизации является сжигание [3]. Условия осуществления технологического процесса: $t = 800\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$, избыток кислорода. В качестве соответствующего оборудования используют камерные, барботажные, шахтные установки с кипящим слоем и вращающиеся печи. Недостатком способа является отсутствие возможности использования для переработки отходов, содержащих фосфор, галогены, серу. В этом случае могут образовываться продукты реакции, например, диоксины и фураны, по токсичности во много раз превышающие нормативы.

Химический метод разделения [4] основан на использовании растворителей. Для диспергирования нефтешламов применяют низкокипящие парафиновые углеводороды, например, *n*-гексан, широкую фракцию легких углеводородов, газовый конденсат и некоторые другие. К недостаткам метода относятся применение специального технологического оборудования и высокий расход дефицитных и дорогостоящих органических растворителей.

Биологический метод [5] осуществляют путем использования специальных штаммов бактерий, биогенных добавок и подачи воздуха. Процесс характеризуется достаточно простым аппаратным оформлением и экологически безопасен. Недостатки метода: малая производительность; высокая затратность; невозможность реализации при низких температурах.

При переработке физико-химическими методами [6] нефтешламы предварительно разогревают, разрушают водонефтяную эмульсию и утилизируют каждый полученный компонент. Обработанный нефтешлам поступает затем на двухфазную центрифугу, в которой под влиянием центробежных сил он дополнительно очищается от взвеси механических частиц. Очищенный фугат из центрифуги в напорном режиме пропускается через самоочищающийся фильтр, оборудованный акустической системой, и поступает в трехфазный саморазгружающийся центробежный сепаратор с выделением нефти и воды. Недостатками метода являются высокая стоимость используемых реагентов и непригодность для труднорасслаиваемых высоковязких нефтешламов с повышенным содержанием парафинов и асфальтенов.

Центрифугирование на деканторах [7–9] обычно проводят через две последовательные стадии. На первой стадии отделяется основная часть твердых частиц. Грубые механические примеси выводятся из аппарата в виде твердого остатка. Жидкая фаза, состоящая из нефти и воды (и минимального количества механических примесей) поступает на вторую ступень очистки. На трехфазной тарельчатой

центрифуге происходит разделение смеси на нефть, воду и механические примеси. Недостатки предлагаемого метода: повышенные требования к используемым реагентам; необходимость постоянного состава сырья; сложное аппаратное оформление процесса.

Термические методы переработки нефтешламов по сравнению с физическими, химическими, физико-химическими и биологическими методами обладают рядом преимуществ, таких как отсутствие дорогостоящих стадий разделения; возможность переработки сырья с высокой зольностью; отказ от использования растворителей и микроорганизмов; отсутствие отходов и продуктов, требующих утилизации (фильтрующие элементы, гидрофобные капсулированные продукты и т. п.). Каталитический пиролиз нефтешламов [10] является одним из наиболее перспективных термических методов, так как позволяет получать ценные газообразные и жидкие продукты для химической и энергетической промышленности. Использование катализаторов в процессе пиролиза позволяет снизить температуру процесса, увеличить степень конверсии нефтешламов, а также выход газообразных и жидких продуктов. Кроме того, катализаторы могут существенно повлиять на химический состав жидких продуктов пиролиза, повышая выход ароматических и алкилароматических углеводородов, что особенно ценно при переработке тяжелой нефти. Катализаторы на основе хлоридов металлов проявляют высокую активность в процессах термодеструкции органического сырья. Пиролиз нефтешламов в присутствии хлоридов металлов является перспективным направлением исследований.

Результаты и их обсуждение. Цель работы – провести оценку возможности утилизации углеводородсодержащих отходов в смеси с торфом методом пиролиза в подвижном и стационарном слоях с получением жидких и газообразных продуктов и снижением экологоопасных выбросов загрязняющих веществ.

В состав компонентов смесевых композиций включили торф низинный ($W = 8,9 \%$; $A^c = 2,0 \%$); бурые угли (Бриневское месторождение); твердые отходы переработки нефтепродуктов (парафин, парафиновый гач) ОАО «Завод горного воска» (ОЗГВ), а также нефтешламовые отходы ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод» (Мозырский НПЗ). Основными компонентами ОЗГВ являются *n*-парафины и их изомеры с числом «С» от 20 до 44; температура плавления 53°C ; содержание воды – следы. Нефтешламы Мозырского НПЗ представляют собой твердые отложения на внутренних стенках нефтеловушек, в состав которых входят в основном асфальтены, карбоиды, парафины.

Для проведения серии опытов по влиянию компонентов смесевых топлив на качественные показатели продуктов пиролиза в подвижном слое была использована лабораторная установка с горизонтально расположенной ретортой и встроенным шнеком для перемещения пиролизуемого сырья.

При анализе результатов пиролиза в подвижном слое (скорость нагрева – $30\text{--}40^\circ\text{C}/\text{мин}$) при $700\text{--}800^\circ\text{C}$ двухкомпонентных смесей торфа и бурого угля с углеводородсодержащими ОЗГВ важное значение имеют выход, состав и теплота сгорания газа. Установлено, что с повышением температуры от 600°C до 800°C в газе пиролиза смеси бурого угля и торфа снижается содержание диоксида углерода и непредельных углеводородов, растет доля метана и водорода, теплота сгорания газа составляет $3615 \text{ ккал}/\text{м}^3$. Сумма компонентов синтез-газа при этом составляет не менее 70% , что позволяет использовать такой газ после удаления диоксида углерода для каталитического синтеза углеводородов и спиртов.

В бинарной смеси (торф + углеводородсодержащие отходы) с повышением концентрации отходов от 10 до 30% при температуре 800°C в газе растет содержание углеводородов и, соответственно, теплота сгорания, достигающая порядка $5000 \text{ ккал}/\text{м}^3$.

Таким образом, пиролиз в подвижном слое смесевых образцов торфа и углей при температуре 800°C позволяет получать пиролизный газ с концентрацией компонентов синтез-газа, достигающей 70% . При пиролизе в тех же условиях смеси торфа и углеводородсодержащих отходов в составе газа пиролиза растет содержание непредельных углеводородов и метана, содержание водорода снижается, а сумма монооксида углерода и водорода (синтез-газ) составляет не более 60% . При этом за счет увеличения доли более калорийной составляющей непредельных углеводородов и метана суммарное значение теплоты сгорания газа существенно возрастает.

Также проведен пиролиз двухкомпонентных смесей парафинсодержащих отходов с торфом и бурыми углями в подвижном слое при разных соотношениях компонентов и исследован состав продуктов пиролиза. Полученные данные сведены в табл. 1. Показано, что увеличение доли парафинсодержащих отходов в смеси приводит к росту содержания углеводородов в пиролизном газе, увеличивает его теплоту сгорания и выход.

Так, при увеличении содержания в пиролизной смеси углеводородсодержащих отходов с 10 до 30% растет выход газа на 8% для торфа и на 20% для бурого угля, а теплота сгорания полученного горючего газа возрастает на 20 и 30% соответственно (см. табл. 1).

Термическое разложение проводили также на установке стационарного пиролиза при различных параметрах – температуре и соотношении компонентов. Качество получающихся продуктов пиролиза

(смола, твердый остаток и пиролизный газ) оценивали по их составу, балансу и энергетическим характеристикам (теплота сгорания газа). Методика приготовления образцов для исследования заключалась в следующем: торф, пропущенный через шнековый аппарат во влажном состоянии, просушенный до воздушно-сухого, в виде небольших гранул подвергался в дальнейшем термическому разложению до необходимой температуры при средней скорости нагрева примерно 8 °С/мин (исходный образец). Образцы смесевых композиций готовили путем механического смешивания подготовленного торфа с измельченными образцами (до 2–4 мм) нефтешламов до однородного состава.

Таблица 1. Выход и состав продуктов пиролиза в подвижном слое смесей парафинсодержащих отходов с торфом и бурыми углями, $T = 800\text{ °C}$

Table 1. Yield and composition of pyrolysis products in the mobile layer of mixtures of paraffin-containing waste with peat and lignite, $T = 800\text{ °C}$

| Состав пиролизной смеси | Выход, % | | Состав газа, об. % | | | | | d , г/л | Q , ккал/м ² |
|----------------------------|----------|------|--------------------|-------------------------------|------|----------------|-----------------|--------------|------------------------------|
| | кокса | газа | CO ₂ | C _n H _m | CO | H ₂ | CH ₄ | | |
| Торф + 10 % ОЗГВ | 34,3 | 65,7 | 16,7 | 8,5 | 26,2 | 33,5 | 15,2 | 0,9218 | 4125 |
| Торф + 20 % ОЗГВ | 30,4 | 69,6 | 14,1 | 8,6 | 26,4 | 34,3 | 16,6 | 0,8864 | 4295 |
| Торф + 30 % ОЗГВ | 29,2 | 70,8 | 11,9 | 12,8 | 22,5 | 32,5 | 20,4 | 0,8814 | 5029 |
| Бурый уголь + 10 % ОЗГВ | 54,4 | 45,6 | 12,7 | 6,9 | 26,6 | 37,9 | 15,8 | 0,8343 | 4095 |
| Бурый уголь + 20 % ОЗГВ | 45,5 | 54,5 | 12,7 | 10,2 | 21,7 | 37,1 | 18,2 | 0,8388 | 4580 |
| Бурый уголь + 30 % ОЗГВ | 45,1 | 54,9 | 11,2 | 14,8 | 19,0 | 32,0 | 23,1 | 0,8727 | 5420 |

Пиролиз проводили при температурах 600 °С, 700 °С и 800 °С. Для каждой температуры соотношение компонентов составляло 10, 20 и 30 весовых частей нефтешлама и 90, 80 и 70 весовых частей торфа соответственно.

Выход и состав продуктов пиролиза смесевых композиций ОЗГВ с торфом при температуре 700 °С представлены в табл. 2.

Таблица 2. Выход и состав продуктов пиролиза в стационарном слое смесей парафинсодержащих отходов с торфом, $T = 700\text{ °C}$

Table 2. Yield and composition of pyrolysis products in a stationary bed of mixtures of paraffin-containing waste with peat, $T = 700\text{ °C}$

| Состав пиролизной смеси | Выход продуктов пиролиза, % | | | Состав газа, об. % | | | | | d , г/л | Q , ккал/м ² |
|----------------------------|-----------------------------|-------|------------------|--------------------|-------------------------------|------|----------------|-----------------|--------------|------------------------------|
| | смолы | кокса | пиролизного газа | CO ₂ | C _n H _m | CO | H ₂ | CH ₄ | | |
| Торф исх. | 33,1 | 39,4 | 27,5 | 49,4 | 0,8 | 17,1 | 15,6 | 17,1 | 1,1273 | 2493 |
| Торф + 10 вес. ч. ОЗГВ | 39,0 | 37,3 | 23,7 | 35,9 | 0,9 | 19,4 | 24,2 | 19,6 | 1,3382 | 3005 |
| Торф + 20 вес. ч. ОЗГВ | 44,6 | 31,9 | 23,5 | 33,0 | 1,2 | 18,8 | 27,6 | 19,4 | 1,0677 | 3104 |
| Торф + 30 вес. ч. ОЗГВ | 55,2 | 29,2 | 14,9 | 47,4 | 1,4 | 18,8 | 14,1 | 18,3 | 1,3855 | 2949 |

По выходу продуктов пиролиза отмечается четкая тенденция увеличения жидкой фракции (смолы) в зависимости от количества нефтешлама в исходной смеси. Из данных табл. 2 видно, что добавка нефтешлама к торфу в количестве 10, 20 и 30 весовых частей увеличивает выход смолы на 18, 35 и 67 % соответственно. В то же время выход коксозольной части с ростом количества добавки нефтешлама уменьшается на 5, 19 и 24 % соответственно.

С целью более детального изучения продуктов термодеструкции двухкомпонентных смесевых композиций был определен качественный и количественный состав исследованных образцов пиролизного газа, рассчитаны их теплоты сгорания.

Как было показано выше (см. табл. 2), увеличение добавки ОЗГВ к торфу при пиролизе в стационарном слое приводит к значительному росту жидкой фракции (до 67 % от исходного торфа). Что касается пиролизного газа, то определенной зависимости его выхода от количества добавки ОЗГВ не обнаружено. В то же время, как видно из данных табл. 2, пиролиз в стационарном слое смеси торфа и углеводородсодержащих отходов приводит к изменению качественного состава пиролизного

газа. Так, происходит рост содержания непредельных углеводородов и метана, что приводит к увеличению теплоты сгорания пиролизного газа по сравнению с исходным торфом.

Результаты экспериментов пиролиза в стационарном слое смесевых различных соотношений торфа и нефтешламов Мозырского НПЗ при температурах 600 °С, 700 °С и 800 °С представлены в табл. 3.

По выходу продуктов пиролиза смесей торфа и нефтешламов наблюдается незначительный рост жидких и газообразных продуктов с ростом температуры пиролиза и количества добавки нефтешлама.

При сравнении выходов продуктов пиролиза двух исследованных типов шламов отмечается более низкое содержание жидкой фракции у нефтешлама Мозырского НПЗ, чем у нефтешлама ОЗГВ, что в общем предсказуемо.

Таблица 3. Выход и состав продуктов пиролиза в стационарном слое смесей нефтешламов с торфом

Table 3. Yield and composition of pyrolysis products in the stationary bed of mixtures of oil sludge with peat

| Состав пиролизной смеси | T, °C | Выход продуктов пиролиза, % | | | Состав газа, об. % | | | | | d, г/л | Q, ккал/м ² |
|------------------------------|-------|--------------------------------|------|---------------------|-----------------------|-------------------------------|------|----------------|-----------------|-----------|---------------------------|
| | | смола | кокс | пиролиз- ный газ | CO ₂ | C _n H _m | CO | H ₂ | CH ₄ | | |
| Торф исх. | 700 | 33,1 | 39,4 | 27,5 | 56,6 | 1,3 | 13,7 | 10,6 | 17,8 | 1,4452 | 2384 |
| Торф + 10 вес. ч. нефтешлама | 600 | 32,0 | 51,5 | 16,5 | 61,8 | 1,6 | 14,4 | 10,2 | 12,0 | 1,5198 | 1948 |
| Торф + 20 вес. ч. нефтешлама | 600 | 32,8 | 45,4 | 21,8 | 53,2 | 1,3 | 13,9 | 13,2 | 18,4 | 1,3876 | 2511 |
| Торф + 30 вес. ч. нефтешлама | 600 | 35,4 | 46,7 | 17,9 | 46,7 | 1,8 | 16,1 | 20,0 | 15,4 | 1,2787 | 2566 |
| Торф + 10 вес. ч. нефтешлама | 700 | 34,0 | 38,6 | 27,4 | 32,7 | 1,1 | 17,8 | 28,2 | 20,2 | 1,0546 | 3140 |
| Торф + 20 вес. ч. нефтешлама | 700 | 29,2 | 43,6 | 27,2 | 38,4 | 1,6 | 14,9 | 25,2 | 19,9 | 1,1340 | 3018 |
| Торф + 30 вес. ч. нефтешлама | 700 | 35,4 | 43,1 | 21,5 | 23,0 | 0,9 | 32,6 | 30,3 | 13,2 | 0,9974 | 3017 |
| Торф + 10 вес. ч. нефтешлама | 800 | 33,8 | 39,5 | 26,7 | 23,0 | 0,9 | 32,6 | 30,3 | 13,2 | 0,9974 | 3017 |
| Торф + 20 вес. ч. нефтешлама | 800 | 32,9 | 39,9 | 27,2 | 24,6 | 1,1 | 28,8 | 31,1 | 14,3 | 0,9939 | 3051 |
| Торф + 30 вес. ч. нефтешлама | 800 | 36,8 | 41,0 | 22,2 | 16,3 | 1,3 | 54,2 | 19,5 | 8,7 | 1,0982 | 3073 |

При анализе результатов пиролиза в стационарном слое при температуре 600–800 °С двухкомпонентных смесей торфа и нефтешламов Мозырского НПЗ важное значение имеют выход, состав и теплота сгорания газа (см. табл. 3). Установлено, что с повышением температуры от 600 до 800 °С в составе газа пиролиза смесей снижается содержание диоксида углерода и непредельных углеводородов, растёт доля метана и водорода, теплота сгорания газа достигает 3140 ккал/м³. Сумма монооксида углерода и водорода (синтез-газ) при этом возрастает от 24 % при 600 °С до 73 % при 800 °С и добавке 30 вес. ч. нефтешлама. Как известно, синтез-газ можно использовать после удаления диоксида углерода для каталитического синтеза углеводородов и спиртов.

Состав продуктов пиролиза при проведении эксперимента на установке со стационарным слоем (см. табл. 2) существенно отличается от продуктов, полученных на установке в подвижном слое (см. табл. 1). Так, в подвижном слое при температуре 700–800 °С основной продукт пиролиза смесей торфа с нефтешламами – пиролизный газ (65–70 %) и кокс (30–35 %). В стационарном же слое при 700 °С пиролиз смесевых составов торф и нефтешламы приводит к получению жидких продуктов (40–55 %), коксозольного остатка (29–37 %) и пиролизного газа (15–24 %).

Закключение. Предложен способ утилизации углеводородсодержащих отходов переработки нефтепродуктов пиролизом их смесей с торфом в подвижном и стационарном слоях с получением жидких и газообразных продуктов и снижением экологически опасных выбросов загрязняющих веществ. В качестве смесевых компонентов предлагается использовать торф и нефтешламы на примере отходов ОАО «Завод горного воска» и ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод».

На основе данных по пиролизу указанных смесей, выходу и анализу получаемых продуктов установлено:

1. Увеличение добавки парафинсодержащих отходов к торфу при пиролизе в стационарном слое приводит к значительному росту жидкой фракции (до 67 % от исходного торфа). Также изменяется качественный состав пиролизного газа, происходит рост содержания непредельных углеводородов и метана, что приводит к увеличению теплоты сгорания пиролизного газа по сравнению с исходным торфом.

2. С повышением температуры от 600 °С до 800 °С в составе газа пиролиза смесей торфа и нефтешламов Мозырского НПЗ снижается содержание диоксида углерода и непредельных углеводородов, растёт доля метана и водорода, теплота сгорания газа достигает 3140 ккал/м³.

3. Сумма монооксида углерода и водорода (синтез-газ) при этом растёт от 24 % при 600 °С до 73 % при 800 °С и добавке 30 вес. ч. нефтешлама.

4. В зависимости от условий проведения процесса пиролиза можно получать различный целевой продукт. При пиролизе смесей торфа с нефтешламами в стационарном слое (при скорости нагрева 8 °С/мин) наибольшая энергетическая продуктивность достигается за счет получения жидкой смолы (выход газа – 40–55 %). В то же время среднескоростной (30–40 °С/мин) пиролиз в подвижном слое дает возможность получать большую энергетическую продуктивность за счет газовой составляющей (выход газа – 65–70 %). Таким образом, сравнительный анализ результатов пиролиза в подвижном и стационарном слоях показал, что подвижный слой целесообразнее применять для получения газообразных продуктов, а стационарный слой предпочтителен для получения жидкой смолы.

5. Полученные результаты по пиролизу смесевых композиций на основе нефтешламов (два вида) и торфа показали, что указанный способ утилизации экологически опасных канцерогенных отходов можно оценить как приемлемый в плане получения жидких и газообразных энергоносителей, но в плане баланса затрат, экономических показателей и других факторов он требует серьезного дополнительного изучения.

Список использованных источников

1. Экологические аспекты получения изомасляной кислоты / Э. Н. Абдрахманова [и др.] // Экология и промышленность России. – 2013. – № 3. – С. 18–21.
2. Аминова, А. С. Использование нефтешламов – рациональный способ их утилизации / А. С. Аминова, С. А. Гайбуллаев, К. А. Джураев // Безопасность жизнедеятельности. – 2015. – № 2. – С. 124–126.
3. Бибииков, Г. Г. Переработка и обезвреживание нефтешламов НПЗ и НХК / Г. Г. Бибииков, Ю. С. Бердин, А. Г. Немченко // Современное состояние и методы защиты окружающей среды на нефтеперерабатывающих и сланцеперерабатывающих производствах : сб. науч. тр. / ЦНИИТЭнефтехим. – М. : Мир, 1984. – С. 51–56.
4. Минигазимов, И. Н. Пути решения экологических проблем на предприятиях транспорта нефти и нефтепродуктов / И. Н. Минигазимов, А. Ф. Файзуллин // Нефтепереработка и нефтехимия – 2005 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Ин-т нефтехимпереработки Респ. Башкортостан. – Уфа, 2005. – С. 350–351.
5. Исследование детергентов для вымывания легких фракций из нефтешлама / И. Р. Ягафаров [и др.] // Нефтепереработка и нефтехимия – 2006 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Ин-т нефтехимпереработки Респ. Башкортостан. – Уфа, 2006. – С. 245–246.
6. Технология реагентной очистки нефтешламов от асфальтосмолопарафиновых отложений / Н. Х. Файзуллин [и др.] // Проблемы и методы обеспечения надежности и безопасности систем транспорта нефти, нефтепродуктов и газа : сб. науч. тр. – Уфа, 2005. – С. 237–239.
7. Проблема образования, переработки и утилизации нефтешламов / В. А. Гронь [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 9. – С. 159–162.
8. Анализ методов переработки нефтешламов. Проблемы и решения / С. В. Афанасьев [и др.] // Инновации и «зелёные» технологии : сб. матер. и докл. 2-й Всерос. науч.-практ. конф., Тольятти, 19 апр. 2019 г. / Российская академия наук, Самарский научный центр. – Самара, 2019. – С. 17–22.
9. Ахметов, А. Ф. Методы утилизации нефтешламов различного происхождения / А. Ф. Ахметов, А. Р. Гайсина, И. А. Мустафин // Нефтегазовое дело. – 2011. – Т. 9, № 3. – С. 98–101.
10. Чалов, К. В. Пиролиз торфа и нефтесодержащих отходов в присутствии металлосодержащих катализаторов / К. В. Чалов, Ю. В. Луговой // Вестник ТвГУ. Сер. Химия. – 2011. – № 12. – С. 159–163.

References

1. Abdrakhmanova E. N., Aminova G. K., Mazitova A. K., Yagafarova G. G. *Ekologicheskie aspekty polucheniya izomaslyanoy kisloty* [Environmental aspects of isobutyric acid production]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2013, no. 3, pp. 18–21. (in Russian)
2. Aminova A. S., Gaybullayev S. A., Dzhurayev K. A. *Ispol'zovanie nefteshlamov – racional'nyy sposob ih utilizatsii* [The use of oil sludge is a rational method of their disposal]. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Health and Safety*, 2015, no. 2, pp. 124–126. (in Russian)
3. Bibikov G. G., Berdin Yu. S., Nemchenko A. G. *Pererabotka i obezvrezhivanie nefteshlamov NPZ i NHK* [Refinery and NHK oil sludge processing and neutralization]. *Sbornik nauchn. trudov "Sovremennoe sostoyanie i metody zashchity okruzhayushchej sredy na neftepererabatyvayushchih i slancepererabatyvayushchih proizvodstvah"* [Proc. of JSC CNIITENeftekhim "Current state and methods of environmental protection in oil refining and shale processing facilities"]. Moscow, Mir Publ., 1984, pp. 51–56. (in Russian)
4. Minigazimov I. N., Fayzullin A. F. *Puti resheniya ekologicheskikh problem na predpriyatiyah transporta nefiti i nefteproduktov* [Ways to solve environmental problems at oil and petroleum products transport enterprises]. *Materialy mezhd. nauchno-prakt. konf. "Neftepererabotka i neftekhimiya – 2005"* [Proc. of Int. sci. and pract. conf. "Oil Refining and Petrochemicals – 2005"]. *Institut neftehimpererabotki Respubliki Bashkortostan* [Institute of petrochemical refining of the Republic of Bashkortostan], Ufa, 2005, pp. 350–351. (in Russian)
5. Yagafarov I. R., Leontyeva S. V., Barakhnina V. B., Matrosova T. V. *Issledovanie detergentov dlya vymyvaniya legkih fraktsij iz nefteshlama* [Study of detergents for leaching light fractions from oil sludge]. *Materialy mezhd.*

- nauchno-prakt. konf. "Neftepererabotka i neftekhimiya – 2006"* [Proc. of Int. sci. and pract. conf. "Oil Refining and Petrochemicals – 2006"]. *Institut neftehimpererabotki Respubliki Bashkortostan* [Institute of petrochemical refining of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, 2006, pp. 245–246. (in Russian)
6. Fayzullin N. Kh., Rogozin V. I., Khasanov I. Yu., Gareyev M. M. *Tekhnologiya reagentnoj ochistki nefteshlamov ot asfal'tosmoloparafinovykh otlozhenij* [Reagent treatment of oil sludge from asphalt-resin-paraffin deposits]. *Sbornik nauchnykh trudov "Problemy i metody obespecheniya nadezhnosti i bezopasnosti sistem transporta nefti, nefteproduktov i gaza"* [Proc. of Transtek Ltd. "Problems and methods of ensuring the reliability and safety of oil, petroleum products and gas transportation systems"]. Ufa, 2005, pp. 237–239. (in Russian)
 7. Gron V. A., Korostovenko V. V., Shakhrai S. G., Kaplichenko N. M., Galayko A. V. *Problema obrazovaniya, pererabotki i utilizatsii nefteshlamov* [Problem of oil sludge formation, processing and utilization]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Successes of modern natural history*, 2013, no. 9, pp. 159–162. (in Russian)
 8. Afanasyev S. V., Kravtsova M. V., Pais M. A., Nosarev N. S. *Analiz metodov pererabotki nefteshlamov. Problemy i resheniya* [Problem of oil sludge formation, processing and utilization]. *Sbornik mater. i dokl. 2-j Vseros. nauch.-prakt. konf. "Innovatsii i "Zelyonoe" tekhnologii", Tol'yatti, 19 apr. 2019 g.* [Proc. of 2nd All-Russian sci. and prakt. conf. "Innovations and "Green" Technologies", Tolyatti, April 19, 2019. *Rossiyskaya akademiya nauk, Samarskij nauchnyy centr* [Russian Academy of Sciences, Samara scientific center]. Samara, SNC RAS Publ., 2019, pp. 17–22. (in Russian)
 9. Akhmetov A. F., Gaysina A. R., Mustafin I. A. *Metody utilizatsii nefteshlamov razlichnogo proiskhozhdeniya* [Methods for utilization of oil sludge of different origin]. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*, 2011, vol. 9, no. 3, pp. 98–101. (in Russian)
 10. Chalov K. V., Lugovoy Yu. V. *Piroliz torfa i neftesoderzhashchih othodov v prisutstvii metallosoderzhashchih katalizatorov* [Pyrolysis of peat and oily waste in the presence of metal-containing catalysts]. *Vestnik TvGU. Ser. Himiya = Vestnik TvSU. Chemistry series*, 2011, no. 12, pp. 159–163. (in Russian)

Информация об авторах

Дударчик Владимир Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: dudwladm@gmail.com

Крайко Валентина Михайловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: vvkraiko@gmail.com

Ануфриева Елена Владимировна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru

Information about the authors

Vladimir M. Dudarchik – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: dudwladm@gmail.com

Valiantsina M. Kraiko – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, associate professor, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: vvkraiko@gmail.com

Alena V. Anufrieva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Lenaanufrieva5@rambler.ru