

---

**ОТКРЫТАЯ НАУКА**

---

УДК 665.637.5

DOI: 10.15372/KhUR2024574

EDN: PGWVVU

## **Термолиз мазута в реакторе проточного типа над оловянно-свинцовым расплавом**

Г. В. БОЖЕНКОВ<sup>1</sup>, Д. В. МЕДВЕДЕВ<sup>2</sup>, А. А. ЧАЙКА<sup>1</sup>, Е. В. РУДЯКОВА<sup>1</sup>, Н. Б. АЛИМОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

E-mail: georgy.bozhenkov@yandex.ru

<sup>2</sup>ООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, Россия

(Поступила 26.01.2024; после доработки 23.04.2024; принята к печати 20.05.2024)

### **Аннотация**

Предложена технология термолитической переработки мазутов над оловянно-свинцовым расплавом в реакторе проточного типа. Способы переработки мазутов, реализуемые на сегодняшний день на нефтеперерабатывающих предприятиях, сложны и высокочастотны, в связи с чем актуальной задачей стала разработка эффективных технологий переработки мазутов. Основные преимущества использования предлагаемой технологии заключаются в проведении процесса переработки при невысоких температурах и давлениях, близких к атмосферному. Технологические параметры процесса постоянны во всех точках реактора, что позволяет обеспечить высокое качество продукции. Практически исключается образование углеродистых отложений на стенках реактора. Технологический процесс протекает одновременно со вспомогательными и транспортными операциями, что повышает производительность установки. Появляется возможность полной механизации и автоматизации технологического процесса, исключающей применение ручного труда и упрощающей обслуживание установки. Приведена принципиальная схема установки проточного типа. Представлены результаты экспериментов по термическому крекингу мазута над оловянно-свинцовым расплавом, проведенных по двум вариантам деструктивной перегонки. Первый вариант – с минимальным отбором термогазойля (31 %), второй вариант – с максимальным отбором термогазойля (77 %). Показано, что содержание бензиновой фракции (н. к.–180 °С, где н. к. – начало кипения) и дизельной фракции (180–360 °С) в термогазойле, полученном по второму варианту, ниже, чем в термогазойле, полученном по первому варианту. Термогазойли характеризуются высоким содержанием ароматических соединений, что делает их перспективным сырьем для получения игольчатого кокса.

**Ключевые слова:** термолиз, переработка мазута, проточный реактор, оловянно-свинцовый расплав, дистиллятные фракции

### **ВВЕДЕНИЕ**

Правительство Российской Федерации при помощи диверсификации ставок стимулирует нефтяные компании заниматься производством

определенных нефтепродуктов, преимущественно товаров с более высокой степенью переработки. На сырую нефть и темные нефтепродукты (мазут, нефтяной битум, отработанные нефтепродукты) установлена максимальная ставка экс-

портной торговой пошлины, в то время как на переработанные продукты (дистилляты, бензол, смазочные масла) она составляет всего 30 % от стоимости нефти.

Разработка эффективных технологий переработки мазутов в топливные фракции позволит сократить избыточное количество мазутов на внутреннем рынке и повысить рентабельность производства нефтепродуктов в целом.

На сегодняшний день для переработки тяжелого нефтяного сырья используются такие методы, как каталитический крекинг, термический крекинг, висбрекинг, замедленное коксование, но при этом возникает ряд проблем.

При каталитическом крекинге происходит быстрое закоксовывание катализатора, что ведет к усложнению конструкции реакторно-регенераторного блока установки, а также возникает необходимость применения дорогих современных широкопористых пылевидных катализаторов [1, 2].

Замедленное коксование – процесс, направленный на получение кокса, качество и выход которого напрямую зависят от качества сырья, а именно от содержания сернистых соединений и ароматических углеводородов. Например, процесс замедленного коксования мазута Иракской нефти создает дополнительные проблемы, связанные с необходимостью сбыта высокосернистого нефтяного кокса, имеющего ограниченные области применения. Наилучшие перспективы имеет процесс жидкостного термического крекинга мазута, в котором “за проход” получают наиболее приемлемые вторичные дистилляты, применяемые в качестве сырья для производства моторных топлив [3]. Существенная проблема, снижающая эффективность процесса коксования, заключается в образовании при процессах коксования и разделения продуктов методом ректификации агрегативно устойчивых эмульсий воды в нефтепродуктах. Это приводит к обводнению дистиллятных фракций и ловушечного нефтепродукта и, в свою очередь, к серьезным технологическим и экологическим проблемам при их дальнейшей переработке [4].

Среди различных вариантов термического крекинга чаще всего для переработки тяжелого нефтяного сырья применяют висбрекинг, который позволяет улучшить качество мазутов. Этот процесс протекает в относительно мягких температурных условиях (400–480 °С), вследствие чего наблюдается незначительная степень превращения сырья, приводящая к снижению вязкости и, как итог, к получению более

качественного продукта. Количество бензиновой фракции, образующейся в этом процессе, незначительно [3, 5].

Процесс термического крекинга тяжелого нефтяного сырья, протекающий при температуре более 500 °С, не нашел широкого распространения по двум причинам: низкое качество получаемых продуктов, а также отложение кокса на стенках труб, вызывающее их прогорание и вывод из строя трубчатых печей [6, 7].

Решением проблемы закоксовывания и прогорания труб печей термического крекинга может быть применение технологии термолитической переработки мазутов с использованием неорганических расплавов, поскольку при термолитике над металлическим расплавом рабочая поверхность (поверхность расплава, на которой происходит термолит) постоянно обновляется. Кокс, образующийся в процессе термолитиза, не растворяется в расплаве и не удерживается его поверхностью, в результате чего рабочая зона реактора не закоксовывается.

К настоящему времени имеются сведения о применении неорганических расплавов разнообразного состава в качестве реакционных сред и/или катализаторов для осуществления деструктивных превращений углеводородов. Разнообразны также типы процессов. В расплавах осуществляют крекинг [8, 9], пиролиз [10, 11], газификацию [12] и другие процессы переработки углеводородов. Переработку проводят в широком диапазоне температур и давлений. В качестве исходного сырья может использоваться широкий спектр органических материалов, содержащих в своем составе углеводороды: нефть, индивидуальные и смешанные углеводороды [9] и др.

Ранее [13, 14] нами было показано, что основным продуктом термолитиза мазута периодическим методом является термогазойль, который не содержит смолисто-асфальтеновых веществ и тяжелых металлов, и, следовательно, для его дальнейшей переработки возможно применение каталитического крекинга. Однако использование периодических процессов существенно снижает производительность установки за счет простоев оборудования. Технологические параметры процесса изменяются во времени, что не позволяет обеспечить постоянство качества продукции, кроме этого, образующийся в периодическом реакторе кокс выгружается с использованием ручного труда. Для повышения производительности установки, обеспечения постоянства каче-

ства продукции, исключения применения ручного труда, механизации и автоматизации процесса необходимо применение реактора проточного типа.

Цель данного исследования – изучение процесса термолитиз мазута над оловянно-свинцовым расплавом в реакторе проточного типа.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Материалы

В качестве сырья для лабораторных исследований использовали мазут марки М-100 по ГОСТ 10585-2013, полученный из смеси нефтей Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна [15]. В табл. 1 представлены физико-химические характеристики мазута М-100.

### Методики исследования

На рис. 1 представлена принципиальная технологическая схема стендовой установки для непрерывного термолитиз мазута. Реактор (Р-1) представляет собой горизонтальный цилиндрический аппарат, выполненный из стали 09Г2С. Корпус реактора (поз. 1) выполнен из трубы диаметром 273 мм, толщиной 8 мм и длиной 800 мм. Через корпус реактора проходит греющая труба 57 мм × 3,5 мм (поз. 2). Зазор между нижней образующей греющей трубы и внутренней образующей корпуса составляет 15 мм. Греющая труба полностью погружена в оловянно-свинцовый расплав с соотношением олово / свинец = 3 : 2 (поз. 3). Верхняя поверхность свинцового расплава находится выше греющей трубы на 15 мм. В реакторе установлены три термо-

пары для измерения температуры расплава (ТЕ 1), жидкой (ТЕ 2) и паровой (ТЕ 3) фаз, а также манометр (РЕ 1) для контроля давления в корпусе реактора. Мазут подается в реактор сверху на расплав. В греющей трубе реактора (поз. 3) устанавливается газовоздушная инжекторная горелка, работающая на пропан-бутановой смеси (штуцер А). Расход углеводородного газа на горелку составляет от 2 до 5 нормальных м<sup>3</sup>/ч. При нормальном течении процесса жидкая фаза, находящаяся над расплавом, занимает примерно 50 % объема от всего свободного пространства, остальные 50 % объема составляет паровая фаза. Это соотношение контролируют по указателю уровня (штуцера Б и В для подключения уровнемерной колонки). Если уровень жидкой фазы падает, то увеличивают расход исходного мазута, а при увеличении уровня мазута более 50 % его расход уменьшают.

Процесс термолитиз мазута на стендовой установке проводили в следующем порядке. Перед заполнением установки мазутом она продувалась азотом. Далее исходный мазут, находящийся в емкости (Е-1), подогревали до температуры 60–80 °С за счет наружного электрического подогрева (на наружной поверхности установлена саморегулируемая нагревательная лента). После разогрева мазута дозировочным насосом (Н-1) заполняли установку таким образом, чтобы жидкая фаза заполнила 50 % объема пустого пространства реактора (Р-1), находящегося над сплавом (сплав находится в твердой фазе), и выключали насос. Далее с помощью горелки начинали разогревать реактор. При температуре в слое мазута около 380 °С начинался процесс

ТАБЛИЦА 1

Физико-химические параметры мазута М-100

| Наименование показателя                                 | Результаты испытаний | Метод испытания   |
|---------------------------------------------------------|----------------------|-------------------|
| Вязкость кинематическая при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с, | 15.4                 | ГОСТ 33-2016      |
| Зольность, %                                            | 0.03                 | ГОСТ 1461-75      |
| Массовая доля механических примесей, %                  | 0.03                 | ГОСТ 6370-83      |
| Массовая доля серы, %                                   | 1.07                 | ГОСТ Р 51947-2002 |
| Температура вспышки в открытом тигле, °С                | 175                  | ГОСТ 4333-2014    |
| Температура застывания, °С                              | 23                   | ГОСТ 20287-91     |
| Плотность при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>                  | 937.7                | ГОСТ 3900-85      |
| Коксуемость, %                                          | 6                    | ГОСТ 19932-99     |
| Содержание металлов, мг/кг:                             |                      |                   |
| Ванадий                                                 | 15                   | М-049-М1/12       |
| Никель                                                  | 8                    | М-049-М1/12       |
| Железо                                                  | 6                    | М-049-М1/12       |
| Свинец                                                  | 2                    | М-049-М1/12       |

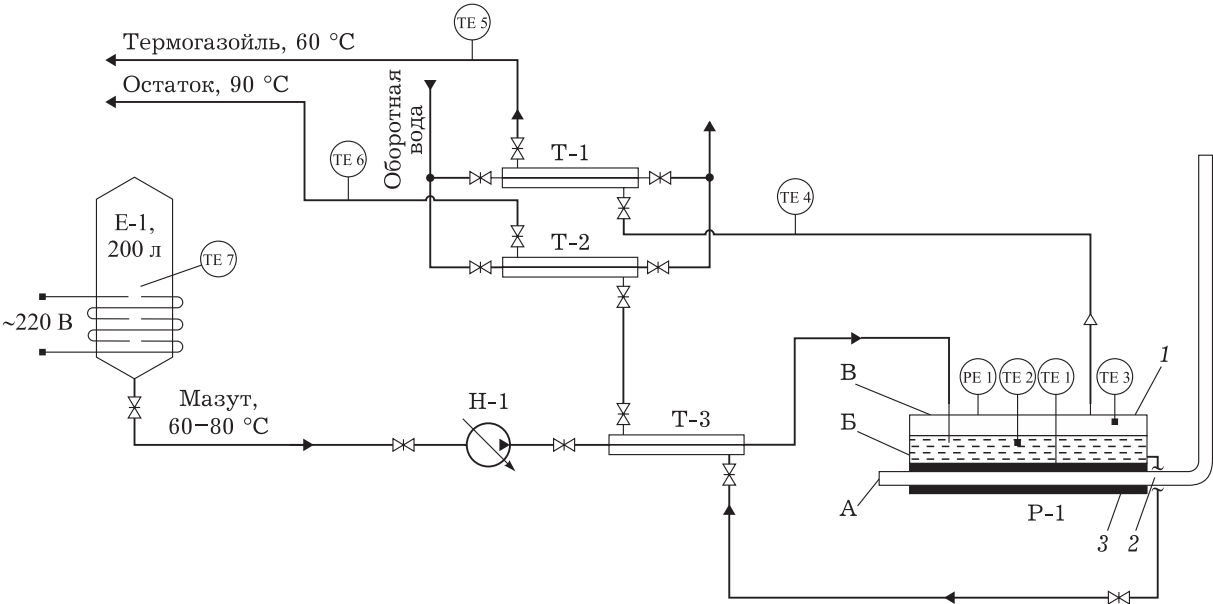


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема стендовой установки: 1 – реактор; 2 – дымовая труба; 3 – металлический расплав; E-1 – исходная емкость с мазутом с наружным обогревом от электрического кабеля; H-1 – насос дозировочный марки НД-1.0 Р 40/100 (подача 40 л/ч, предельное давление 100 атм, мощность двигателя 0.55 кВт); P-1 – реактор с оловянно-свинцовым расплавом; T-1 – теплообменник труба в трубе для конденсации и охлаждения термогазойля; T-2 и T-3 – теплообменники труба в трубе для охлаждения кубового остатка; TE1 – TE7 – термопары для контроля температуры фаз; PE1 – манометр; А – штуцер для подключения газовой горелки марки ГВ-900В; Б и В – штуцера для подключения указателя уровня.

термолиза. При понижении уровня мазута в реакторе включали дозировочный насос.

Минимальная температура, при которой начинался процесс термолиза, – 380 °С, максимальная температура процесса составляла 420 °С. Основной процесс термолиза мазута протекал

при температуре 410 °С и избыточном давлении в реакторе 0.1 МПа. Сверху реактора отводили пары углеводородов, которые конденсировали и охлаждали в кожухотрубчатом теплообменнике (Т-1), за счет подачи в него оборотной воды. Термогазойль из теплообменника (Т-1) с темпе-

ТАБЛИЦА 2

Материальный баланс процесса термолиза мазута

| Сырье | Содержание сырья, мас. % | Скорость подачи, кг/ч | Продукты     | Вариант I                    |                       | Вариант II                   |                       |
|-------|--------------------------|-----------------------|--------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
|       |                          |                       |              | Содержание продуктов, мас. % | Скорость подачи, кг/ч | Содержание продуктов, мас. % | Скорость подачи, кг/ч |
| Мазут | 100.00                   | 6.28                  | Термогазойль | 31.00                        | 1.95                  | 77.00                        | 4.84                  |
|       |                          |                       | Остаток      | 68.00                        | 4.27                  | 22.00                        | 1.38                  |
|       |                          |                       | Потери       | 1.00                         | 0.06                  | 1.00                         | 0.06                  |
| Итого | 100.00                   | 6.28                  | Итого        | 100.00                       | 6.28                  | 100.00                       | 6.28                  |

ТАБЛИЦА 3

Разгонка термогазойлей по ГОСТ 2177-99

| V, об. %                | 0  | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  | 60  | 70  | 80  | 90  |
|-------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| T, °C (760 мм. рт. ст.) | 37 | 109 | 194 | 242 | 271 | 296 | 317 | 338 | 363 | 402 |
| Вариант I               |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
| T, °C (760 мм. рт. ст.) | 64 | 184 | 257 | 303 | 332 | 353 | 371 | 385 | –   | –   |
| Вариант II              |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

Примечание. V – объемная доля отбора термогазойля из исходного мазута; T – температура начала кипения (н. к.).

ратурой 60 °С самотеком поступал в продуктовую емкость. Кубовый остаток из реактора (Р-1) также самотеком поступал на предварительное охлаждение в теплообменник (Т-3), где охлаждался исходным мазутом, поступающим в реактор (Р-1), и далее поступал на окончательное охлаждение до 90 °С в теплообменник (Т-2). После теплообменника кубовый остаток самотеком поступал в продуктовую емкость.

Процесс термолитза мазута проводили с различной долей отбора термогазойля от исходного мазута, что позволило получать продукты (термогазойль и остаток) с необходимыми физико-химическими характеристиками. В табл. 2 приведен материальный баланс продуктов, полученных по двум вариантам:

– вариант I (ВI) – минимальный отбор термогазойля (31.00 %);

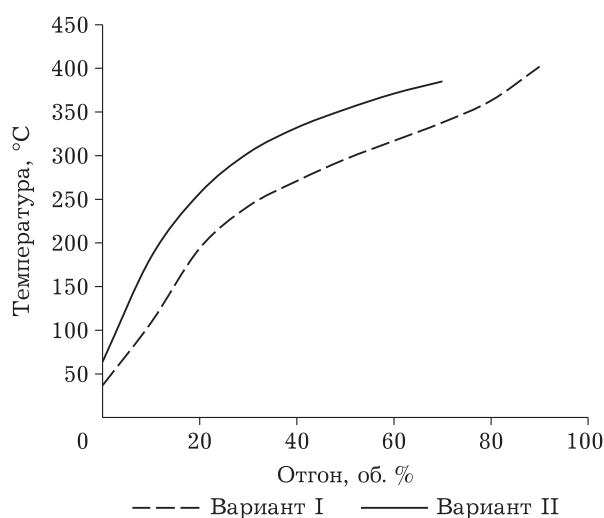


Рис. 2. Фракционная разгонка термогазойлей по ГОСТ 2177-99.

ТАБЛИЦА 4

Физико-химические характеристики термогазойлей

| Наименование показателя                                            | Результат испытания |            | Метод испытания    |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------|------------|--------------------|
|                                                                    | Вариант I           | Вариант II |                    |
| Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>                             | 853                 | 868.7      | ГОСТ 3900-85       |
| Температура помутнения, °С                                         | 14                  | 12         | ГОСТ 5066-91       |
| Температура застывания, °С                                         | 4                   | –3         | ГОСТ 5066-91       |
| Массовая доля серы, %                                              | 0.43                | 0.87       | ГОСТ 32139-2019    |
| Вязкость кинематическая, мм <sup>2</sup> /с, при температуре 20 °С | 3.68                | 11.55      | ГОСТ 31391-2009    |
| Общее массовое содержание ароматических углеводородов, мас. %      | 60.3                | 67.8       | ГОСТ ЕН 12916-2017 |
| Фракционный состав:                                                |                     |            |                    |
| температура начала перегонки, °С                                   | 37                  | 64         | ГОСТ 2177-91       |
| температура, °С при доле отгона, об. %:                            |                     |            |                    |
| 10                                                                 | 109                 | 184        | ГОСТ 2177-91       |
| 20                                                                 | 194                 | 257        | ГОСТ 2177-91       |
| 30                                                                 | 242                 | 303        | ГОСТ 2177-91       |
| 40                                                                 | 271                 | 332        | ГОСТ 2177-91       |
| 50                                                                 | 296                 | 353        | ГОСТ 2177-91       |
| 60                                                                 | 317                 | 371        | ГОСТ 2177-91       |
| 70                                                                 | 338                 | 385        | ГОСТ 2177-91       |
| 80                                                                 | 363                 | –          | ГОСТ 2177-91       |
| 90                                                                 | 402                 | –          | ГОСТ 2177-91       |
| Содержание непредельных углеводородов, мас. %                      | 3.2                 | 4.8        | ГОСТ 2070-82       |
| Содержание металлов, мг/кг:                                        |                     |            |                    |
| Ванадий                                                            | <2                  | <2         | М-049-М1/12        |
| Никель                                                             | <2                  | <2         | М-049-М1/12        |
| Железо                                                             | <2                  | <2         | М-049-М1/12        |
| Свинец                                                             | <3                  | <3         | М-049-М1/12        |

Примечание. Прочерк – параметр не определяли.

ТАБЛИЦА 5

Физико-химические характеристики остатков

| Наименование показателя                                            | Результат испытания |            | Метод испытания |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------|------------|-----------------|
|                                                                    | Вариант I           | Вариант II |                 |
| Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>                             | 947                 | 1010       | ГОСТ 3900-85    |
| Температура вспышки в открытом тигле, °С                           | 151                 | 163        | ГОСТ 4333-2018  |
| Температура застывания, °С                                         | 6                   | 20         | ГОСТ 20287-91   |
| Массовая доля серы, %                                              | 1.12                | 1.18       | ГОСТ 32139-2019 |
| Вязкость кинематическая при температуре 100 °С, мм <sup>2</sup> /с | 15.4                | 135.14     | ГОСТ 31391-2009 |
| Зольность, мас. %                                                  | 0.045               | 0.14       | ГОСТ 1461-75    |
| Содержание металлов*, мг/кг:                                       |                     |            |                 |
| Ванадий                                                            | 21                  | 65         | IP 501          |
| Никель                                                             | 11                  | 34         | IP 501          |
| Железо                                                             | 8                   | 26         | IP 501          |
| Свинец                                                             | 8                   | 23         | IP 501          |
| Содержание металлов*, мг/кг:                                       |                     |            |                 |
| Ванадий                                                            | 14.3                | 14.3       | M-049-M1/12     |
| Никель                                                             | 7.5                 | 7.5        | M-049-M1/12     |
| Железо                                                             | 5.4                 | 5.7        | M-049-M1/12     |
| Свинец                                                             | 5.4                 | 5.1        | M-049-M1/12     |

\* Содержание металлов приведено в пересчете на исходный мазут.

– вариант II (ВII) – максимальный отбор термогазойля (77.00 %).

Фракционные составы термогазойлей, полученных по варианту I и II, представлены в табл. 3 и на рис. 2. Физико-химические характеристики полученных термогазойлей и кубовых остатков приведены в табл. 4 и 5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ кривых фракционной разгонки термогазойлей (см. рис. 2) показал, что содержание бензиновой фракции (н. к. –180 °С, где н. к. – начало кипения) и дизельной фракции (180–360 °С) в термогазойле ВII ниже, чем в термогазойле ВI, а плотность и кинематическая вязкость выше у термогазойля ВII (см. табл. 4), что объясняется более высоким содержанием светлых фракций в термогазойле ВI. Содержание общей серы в термогазойле ВI вдвое ниже, чем в термогазойле ВII. Уменьшение содержания общей серы в термогазойлях по сравнению с содержанием серы в исходном мазуте (см. табл. 4) объясняется тем, что в процессе термолиза сернистых соединений мазута происходит их разрушение с образованием сероводорода. Наличие сероводорода в газообразных продуктах определялось по потемнению полоски бума-

ги, смоченной раствором нитрата свинца, взаимодействующего с сероводородом.

Согласно представленным данным (см. табл. 4), термогазойли имеют высокое содержание ароматических соединений, что делает их перспективным сырьем для получения игольчатого кокса [16].

В научной литературе описана близкая к разработанной нами технология деструктивной перегонки углеводородов в оловянно-свинцовом сплаве [17], отличающаяся конструкцией реактора и способом ввода сырья в реактор. В этой работе применен проточный реактор барботажного типа с вводом сырья под слой расплава. При использовании такой схемы ввода мазута (под слой сплава) в нашей лабораторной установке происходило закоксовывание поверхности колбы, контактирующей с расплавом, приводящее к ухудшению процесса термолиза мазута. Также, по нашему мнению, такой ввод сырья будет создавать проблемы при пуске промышленной установки, когда сплав металла находится в твердой фазе, а узел ввода сырья находится в слое сплава.

В нашем варианте проведение процесса термолиза над металлическим сплавом позволяет избежать процесса закоксовывания рабочей поверхности (поверхность расплава, на которой происходит термолиз) в результате постоянного ее обновления, связанного с процессом конвек-

ции расплава. Кокс, образующийся в процессе термолитического крекинга, не растворяется в расплаве и не удерживается его поверхностью, в результате чего рабочая зона реактора не закоксовывается. Выделяющийся микрокристаллический кокс в результате интенсивного кипения жидкой углеводородной фазы все время находится во взвешенном состоянии в смеси мазута и продуктов его разложения. В такой системе сохраняется очень высокая скорость теплопередачи, что способствует увеличению выхода термогазойля. Микрокристаллический кокс выводится из установки с остатком термолитического крекинга. При хранении остатка, содержащего микрокристаллический кокс, не наблюдалось его расслоения и выпадения кокса в осадок.

Анализ остатков на содержание металлов, полученных по двум вариантам (см. табл. 5), показал, что практически все металлы, определяемые в исходном мазуте, сконцентрировались в остатках, за исключением свинца. Его количество увеличилось на 3 м. д. (в пересчете содержания металлов на исходный мазут). Содержание металлов в термогазойлях не превышает нижней границы применяемой методики определения. Полученные после термолитического крекинга остатки, исходя из их физико-химических характеристик (см. табл. 5), можно применять как топочный мазут марки М100, а также использовать в качестве сырья во вторичных процессах, таких как замедленное коксование, пекование, висбрекинг.

Выход углеводородных газов, образующихся в процессе термолитического крекинга, не превышает 1 мас. %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении непрерывного термического крекинга мазута над оловянно-свинцовым расплавом по двум вариантам: с минимальным отбором термогазойля 31 % (ВІ) и с максимальным отбором термогазойля 77 % (ВІІ) – содержание бензиновой фракции (н. к.–180 °С) и дизельной фракции (180–360 °С) в термогазойле ВІІ ниже, чем в ВІ. Продукты различаются по своим физико-химическим характеристикам. Плотность и кинематическая вязкость термогазойля ВІІ значительно выше, чем для ВІ. Термогазойль ВІ содержит вдвое меньше серы по сравнению с ВІІ. Термогазойль, полученный в результате термолитического крекинга мазута, содержит значительное количество ароматических соединений и не содержит тяжелых металлов, поэтому его можно использовать

либо в качестве сырья для получения высококачественного металлургического игольчатого кокса, который практически на 100 % импортируется металлургическими предприятиями, либо полученный термогазойль можно подвергнуть процессам облагораживания, таким как гидроочистка, изомеризация, риформинг, с целью получения качественных автомобильных бензинов и дизельных топлив.

Предложенная технология непрерывной термолитической переработки мазута имеет следующие достоинства:

- 1) процесс переработки протекает при невысоких температурах и давлениях, близких к атмосферному;
- 2) технологические параметры процесса постоянны во всех точках реактора, что позволяет обеспечить высокое качество продукции;
- 3) практически исключается образование углеродистых отложений на стенках реактора;
- 4) технологический процесс протекает одновременно со вспомогательными и транспортными операциями, что повышает производительность установки;
- 5) появляется возможность полной механизации и автоматизации технологического процесса, исключающей применение ручного труда и упрощающей обслуживание установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Солодова Н. Л., Терентьева Н. А. Современное состояние и тенденции развития каталитического крекинга нефтяного сырья // Вестн. Казанского технолог. ун-та. 2012. Т. 15, № 1. С. 141–147.
- 2 Нефедов Б. К. Современные технологии переработки нефтяных остатков // Катализ в пром-сти. 2007. № 4. С. 31–37.
- 3 Хайрудинов И. Р., Тихонов А. А., Омран А. Д., Теляшев Э. Г. Выбор варианта термической переработки мазута Иракской нефти // Башкирский хим. журн. 2012. Т. 19, № 2. С. 156–158.
- 4 Кузора И. Е., Турова А. В., Юшинов А. И., Кривых В. А. Образование в процессе замедленного коксования агрегативно устойчивых эмульсий и проблемы их переработки // Нефтепереработка и нефтехимия. 2011. № 4. С. 24–31.
- 5 Солодова Н. Л., Терентьева Н. А. Пути снижения коксообразования на установках висбрекинга // Вестн. Казанского технолог. ун-та. 2011. № 20. С. 217–224.
- 6 Pat. US 4836909 A, 1989.
- 7 Pat. US 3562146 A, 1971.
- 8 Paxman D., Trotter S., Nikoo M., Secanell M., Ordorica-Garcia G. Initial experimental and theoretical investigation of solar molten media methane cracking for hydrogen production // Energy Procedia. 2014. Vol. 49. P. 2027–2036.
- 9 Черноусов Е. Ю. Исследование процесса деструктивной переработки углеводородного сырья в неорганических расплавах // "Технология-2015" : материалы XVIII Міжнарод. наук.-техн. конф., Севастополь, 17–18 квіт. 2015 р., Ч. 1. Севастополь, 2015. С. 34–35.

- 10 Ai N., Zeng G., Zhou H., He Y. Co-production of activated carbon and bio-oil from agricultural residues by molten salt pyrolysis // *BioResources*. 2013. Vol. 8, № 2. P. 1551–1562.
- 11 Jiang H., Wu Y., Fan H., Ji J. Hydrogen production from biomass pyrolysis in molten alkali // *AASRI Procedia*. 2012. Vol. 3. P. 217–223.
- 12 Rizkiana J., Guan G., Widayatno W. B., Hao X., Wang Z., Zhang Z., Abudula A. Oil production from mild pyrolysis of low-rank coal in molten salts media // *Applied Energy*. 2015. Vol. 154. P. 944–950.
- 13 Медведев Д. В., Уханев С. А., Филиппов Н. С., Боженков Г. В., Рудякова Е. В. Термический крекинг мазута на металлическом сплаве // “Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов” : материалы VIII Всероссийской науч.-практ. конф. с международ. участием (Иркутск, 26–27 апреля 2018 г.). Иркутск: Изд-во Иркутского нац. исслед. техн. ун-та, 2018. С. 192–194.
- 14 Боженков Г. В., Медведев Д. В., Чайка А. А., Рудякова Е. В., Губанов Н. Д. Термолиз мазута в реакторе непрерывного действия над оловянно-свинцовым расплавом // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2022. Т. 30, № 2. С. 144–151.
- 15 ГОСТ 10585–2013. Топливо нефтяное. Мазут. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 12 с.
- 16 Хайрудинов И. Р., Тихонов А. А., Ахметов М. М. Перспектива расширения сырьевой базы для получения игольчатого кокса // *Башкирский хим. журн.* 2011. Т. 18, № 3 С. 103–111.
- 17 Гликин М. А., Тарасов В. Ю., Зубцов Е. И., Черноусов Е. Ю. Исследование процесса деструктивной переработки углеводородов в неорганических расплавах. Влияние управляющих параметров // *Технолог. аудит и резервы пр-ва*. 2015. Т. 3, № 4 (23). С. 57–63.