УДК 691.175.743:66.092-977:629.3.027.5; https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-3.14
http://orcid.org/0000-0003-4962-6330
https://orcid.org/0009-0005-3466-5494

УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ ШИН В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОГО КРЕКИНГА ВАКУУМНОГО ГАЗОЙЛЯ

Т.А. МАММАДОВА[1],
доктор технических наук,
профессор,
mammadova.tarana63@gmail.com

Р.Т. САМАДОВ[2],
докторант,
rafaellsamedov@gmail.com

[1]ИНСТИТУТ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИМ. Ю.Г. МАМЕДАЛИЕВА
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ АЗЕРБАЙДЖАНА
Азербайджан, г. Баку, Проспект Ходжалы, 30

[2]БАКИНСКАЯ ВЫСШАЯ ШКОЛА НЕФТИ
Азербайджан, г. Баку, Новое Сальянское Шоссе, 25

Изучен процесс термического крекинга вакуумного газойля (ВГ) с добавлением 10% шинной крошки при температуре 500 °С и скорости подачи сырья 1 ч$^{-1}$. В ходе исследования были проведены эксперименты, которые показали, что введение шинной крошки в состав ВГ способствует ускорению конверсии тяжелой фракции ВГ. Добавление 10% шинной крошки оказывает положительное влияние на процесс крекинга, что выражается в увеличении выхода дизельной фракции по массе на 2%.

Анализ материального баланса процесса термического крекинга измельченной шинной крошки показывает, что в данных условиях шинная крошка слабо подвергалась термическому превращению. Выход бензиновой фракции и фракции легкого газойля в составе катализата составил всего 1% и 7.4% по массе соответственно. Конверсия шинной крошки в легкие фракции, включая газовую, достигла 20.5%.

Добавление 10% по массе шинной крошки в состав вакуумного газойля способствует увеличению выхода бензиновых и дизельных фракций (фракций легкого газойля), одновременно снижая количество тяжелого газойля. Прирост выхода дизельной фракции составляет 4% по массе, а общая конверсия смесевого сырья достигает 59.5%. Таким образом, добавление шинной крошки в состав вакуумного газойля практически не влияет на общую конверсию, но увеличивает выход легкого газойля. Это позволяет сделать

вывод, что введение шинной крошки способствует более эффективной конверсии тяжелых фракций вакуумного газойля.

После проведения процесса гидроочистки полученные дизельные и бензиновые фракции могут быть успешно использованы в качестве компонентов автомобильных топлив. Таким образом, добавление шинной крошки в процесс термического крекинга вакуумного газойля не только улучшает конверсию тяжелых фракций, но и увеличивает выход ценных продуктов, таких как дизельное топливо, что имеет важное значение для нефтеперерабатывающей промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *зеленое топливо, термический крекинг, шинные крошки, вакуумный газойль, отходы растительных масел.*

ВАКУУМДЫҚ ГАЗОЙЛДЫҢ ТЕРМИЯЛЫҚ КРЕКИНГІ ПРОЦЕСІНДЕ ШИНА ҚАЛДЫҚТАРЫН КӘДЕГЕ ЖАРАТУ

Т.А. МАММАДОВА[1], техника ғылымдарының докторы, профессор,
mammadova.tarana63@gmail.com
Р.Т. САМАДОВ[2], докторант, *rafaellsamedov@gmail.com*

[1]ӘЗІРБАЙЖАН ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІНІҢ Ю.Г. МАМЕДАЛИЕВ АТЫНДАҒЫ МҰНАЙ-ХИМИЯ ПРОЦЕСТЕРІ ИНСТИТУТЫ,
Әзірбайжан, Баку қаласы, Қожалы даңғылы, 30
[2]БАКУ ЖОҒАРЫ МҰНАЙ МЕКТЕБІ,
Әзірбайжан, Баку қаласы, Жаңа Салян тас жолы, 25

Бұл зерттеуде 500°С температурада және 1 сағ $^{-1}$шикізатты беру жылдамдығында 10% шиналық ұнтақ қосылған вакуумдық газойлдың (ВГ) термиялық крекинг процесі зерттеледі. Эксперимент деректері ВГ құрамына шина үгіндісін енгізу ВГ ауыр фракциясының конверсиясын жеделдететінін көрсетеді. Дизельді фракцияның шығарылымын салмағы бойынша 2.0% -ға арттыруға шиналық ұнтақ қосу есебінен қол жеткізілді. Гидротазартудан кейін дизель және бензин фракциялары автомобильдерге арналған отын компоненті ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Ұсақталған шина ұнтағының термиялық крекингі процесінің материалдық теңгерімін талдау осы жағдайларда шина ұнтағының термиялық түрлендіруге шамалы ұшырағанын көрсетеді. Бензин фракциясының және жеңіл газойль фракциясының катализ құрамындағы шығымы тиісінше салмағы бойынша 1% және 7.4%-ды құрады. Шина ұнтағының газды қоса алғанда, жеңіл фракцияларға конверсиясы 20.5% -ға жетті.

Вакуумдық газойль құрамына шина ұнтағының салмағы бойынша 10% қосу бір мезгілде ауыр газойлдың мөлшерін төмендете отырып, бензин және дизель фракцияларының (жеңіл газойль фракцияларының) шығуын ұлғайтуға ықпал етеді. Дизель фракциясы шығымының өсімі салмағы бойынша 4% -ды құрайды, ал аралас шикізаттың жалпы конверсиясы 59.5% -ға жетеді. Осылайша, вакуумдық газойль құрамына шина ұнтағын қосу жалпы конверсияға әсер етпейді, бірақ жеңіл газойлдың шығуын арттырады. Бұл шина ұнтағын енгізу вакуумдық газойлдың ауыр фракцияларын неғұрлым тиімді конверсиялауға ықпал етеді деген қорытынды жасауға мүмкіндік береді.

Гидротазарту процесі жүргізілгеннен кейін алынған дизель және бензин фракциялары автомобиль отындарының компоненттері ретінде табысты пайдаланылуы мүмкін. Осылайша, вакуумдық газойлдың термиялық крекинг процесіне шина ұнтағын қосу ауыр фракциялардың конверсиясын жақсартып қана қоймай, сонымен бірге мұнай өңдеу өнеркәсібі үшін маңызды мәні бар дизель отыны сияқты құнды өнімдердің шығуын арттырады.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *жасыл отын, термиялық крекинг, шиналық ұнтақтар, вакуумдық газойль, өсімдік майларының қалдықтары.*

UTILIZATION OF WASTE TIRES IN THE PROCESS OF THERMAL CRACKING OF VACUUM GAS OIL

T.A. MAMMADOVA[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
mammadova.tarana63@gmail.com

R.T. SAMADOV[2], PhD Candidate, *rafaellsamedov@gmail.com*

[1]INSTITUTE OF PETROCHEMICAL PROCESSES NAMED AFTER ACAD. Y.G. MAMMADALIYEV OF MINISTRY OF SCIENCE AND EDUCATION OF AZERBAIJAN,
30 Khojaly Avenue, Baku, Azerbaijan

[2]BAKU HIGHER OIL SCHOOL,
New Salyan Highway 25, Baku, Azerbaijan

The process of thermal cracking of vacuum gas oil (VGO) with the addition of 10% tire crumb at a temperature of 500 °C and feed rate of 1 h^{-1} was studied. In the course of the study experiments were carried out, which showed that the introduction of tire crumb into the composition of VG promotes the acceleration of conversion of the heavy fraction of VG. Addition of 10% of tire crumb has a positive effect on the cracking process, which is expressed in the increase in the yield of diesel fraction by weight by 2%.

Analysis of the material balance of the thermal cracking process of crushed tire crumb shows that under these conditions tire crumb was poorly subjected to thermal transformation. The yield of gasoline fraction and light gas oil fraction in the catalyst composition was only 1% and 7.4% by weight, respectively. The conversion of tire crumb into light fractions including gas oil reached 20.5%.

Addition of 10% by weight of tire crumb to the composition of vacuum gas oil increases the yield of gasoline and diesel fractions (light gas oil fractions), while reducing the amount of heavy gas oil. The increase in the yield of diesel fraction is 4% by weight, and the total conversion of blended feedstock reaches 59.5%. Thus, the addition of tire crumb to the composition of vacuum gas oil practically does not affect the total conversion, but increases the yield of light gas oil. This allows us to conclude that the introduction of tire crumb contributes to a more efficient conversion of heavy fractions of vacuum gas oil.

After hydrotreating process the obtained diesel and gasoline fractions can be successfully used as components of automotive fuels. Thus, the addition of tire crumb to the thermal cracking process of vacuum gas oil not only improves the conversion of heavy fractions, but also increases the yield of valuable products such as diesel fuel, which is important for the refining industry.

KEY WORDS: *green fuel, thermal cracking, tire crumbs, vacuum gas oil, vegetable oil waste.*

Введение. Для решения проблемы растущего потребления энергии и необходимости соответствовать все более строгим экологическим нормам в современном мире были проведены значительные исследования по извлечению энергии из различных органических отходов. Эти органические отходы включают отходы лесного хозяйства, сельскохозяйственные, муниципальные отходы и другие [1,2]. Благодаря своей высокой теплотворной способности шины имеют самый большой потенциал для извлечения энергии из них. Из-за того, что процесс биодеградации шин обычно занимает до ста лет, захоронение их вызвает серьезные экологические проблемы [3]. Современные методы переработки шин включают утилизацию, переработку их в процессах пиролиза с целью получения более ценных конечных продуктов. [4,5].

Мировое производство шин растет на 3% в год, а мировой шинный бизнес в 2019 году оценивается в 112.16 млрд долларов и, как ожидается, достигнет 154.40 млрд долларов к 2027 году [6]. Согласно последним статистическим данным, ежегодно производится более 1.6 млрд шин, в результате чего в мире образуется около 1.0 млрд отработанных шин от легковых автомобилей, грузовиков, фургонов, мотоциклов, промышленных машин, внедорожников и самолетов [7]. Можно утверждать, что с увеличением мирового производства шин постоянно растет глобальное образование отходов шин.

Повторное использование или переработка очень приветствуется, но, учитывая, что в мире ежегодно образуется более 1 млн шин, это может быть недостаточным для утилизации большого количества отработанных шин [7,8]. В последние несколько десятилетий большое внимание уделяется возможности извлечению энергии из продуктов переработки шин с помощью различных термохимических технологий, включая сжигание, газификацию, гидротермальное сжижение, и пиролиз [9-17]. Этитермохимические процессы позволяют добиться значительного сокращения объема иизвлечь энергию из отработанных шин, что способствует сокращению потребления ископаемого топлива и выбросов углерода (CO_2).

Среди существующих термохимических процессов пиролиз считается эффективным методом переработки отработанных шин в высококачественное пиролизное масло [5]. Распределение продуктов пиролиза при различных условиях реакции, таких как температура, скорость нагрева, время пребывания и тип реактора, уже широко исследовано. Известно, что значительный выход пиролизного масла может быть достигнут при температуре 450-550 °C [18]. Для улучшения качества пиролизного масла необходим процесс очистки, поскольку оно содержит примеси, такие как нежелательная сера и неорганические вещества (например, Zn, Pb, Fe), которые являются основной проблемой для его применения. Для улучшения качества пиролизного масла из отработанных шин применялись различные методы сероочистки, такие как гидродесульфуризация, окисление и алкилирование [19,20].

Несмотря на достижения в области управления отходами шин за последние десять лет, требуется глубокое понимание технологий, определяющих приоритетность сбора шин, предварительной обработки и устойчивости процесса, учитывая социальные, экономические и экологические аспекты [1,19]. Несмотря на то, что в последнее время в научной литературе появились статьи, посвященные использованию жидких, твердых и газообразных продуктов пиролиза отработанных шин, крайне желательно общее понимание химических реакций, включая механизмы образования первичных и вторичных продуктов [21,22].

Материалы и методы исследования. Принимая во внимание вышесказанное, были проведены процессы термического крекинга вакуумного газойля (ВГ) и отработанных шин в чистом виде, а также при добавлении шинной крошки в состав тяжелого вакуумного газойля в количестве 10% масс.

Показатель качества использованного вакуумного газойля приведен в *таблице 1*.

Таблица 1 – **Физико-химические свойства использованного вакуумного газойля**

Показатели	Вакуумный газойль
Плотность, кг/м^3	900.5
Содержание:	
сера, м.ч.	800
азот, м.ч.	1053
водород, % масс.	11.94
углерод, % масс.	83.67
кислород, % масс.	1.94
Фракционный состав, °	
начало кипения	280.0
10 %	348.5
50 %	410.0
90 %	485.5
конец кипения	504.0
Йодное число, г I_2/100 г	-
Кислотное число, мг КОН/г.	-
Кинематическая вязкость при 40 °	7.1
Температура вспышки, °	175
Температура застывания, °	10
Средняя молекулярная масса, г/моль	205
Углеводородный состав:	
непредельные	-
ароматические	36.0
парафины + нафтены	64.0

Термический крекинг приведенного выше сырья проведен на лабораторной проточной установке, схема которой приведена ниже: (*рисунок 1*).

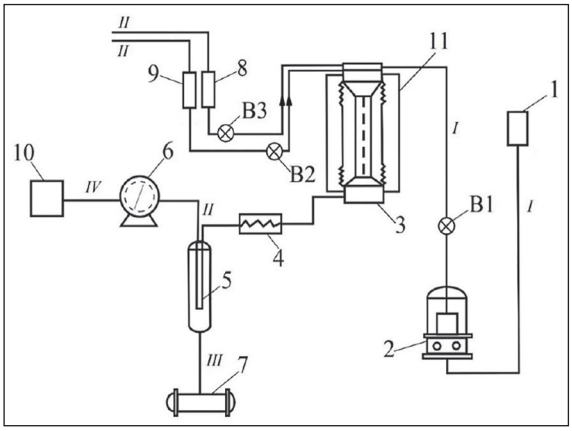

Рисунок 1 – **Технологическая схема проточной установки для проведения процесса термического крекинга**

В реактор 3 загружается кварцевая крошка, измельченная шинная крошка, поверх которой вновь загружается кварцевая крошка. Реактор помещается в нагревательную печь 11 и начинается нагрев с одновременной подачей азота через осушитель 8 с верха реактора. Температура печи и реактора поддерживается с помощью термопары ТХК.

Газовая фаза и жидкий катализат, образующиеся в ходе процесса, с низа реактора 3 поступают в конденсатор-холодильник 4, затем направляются в дегазатор 5, откуда, после прохождения газового счетчика, газовая фаза может быть отобрана для дальнейшего анализа посредством газометра. По линии III жидкий катализат поступает в приемник жидких продуктов 7.

При использовании жидкого сырья – вакуумного газойля в чистом виде или его смеси с 10% шинной крошки (мелко измельченная шинная крошка в требуемом количестве была выдержана в смеси с вакуумным газойлем в течении 3 суток), термический крекинг данных видов сырья проведен при 500 ^{0}С, массовой скорости подачи сырья 1 ч$^{-1}$.Для этого сырье из сырьевой емкости 1 с помощью сырьевого микронасоса 2 поступает в реактор 3, помещенный в нагреваельную печь 11 и начинается нагрев с одновременной подачей азота через осушитель 8 с верха реактора. Температура печи и реактора поддерживается с помощью термопары ТХК. Массовая скорость потока жидкого сырья или его смеси с шинной крошкой регулируется дроссельным вентилем В1.

Результаты и обсуждение. Материальный баланс процесса термического крекинга ВГ, шинной крошкиа также ВГ при содержании в нем 10% шинной крошки приведен в *таблице 2*.

Таблица 2 – **Материальный баланс процесса термического крекинга шинной крошки, а также ВГ при содержании в нем 10% шинной крошкой**

Показатели	Сырье		
	ВГ	Шинная крошка	ВГ + 10% шинная крошка
Взято, % масс.:			
Вакуумный газойль	100	0	90
Шинная крошка	0	100	10
Получено, % масс.:			
Газы до C_4	16.5	12.1	14.1
Бензиновая фракция н.к.-180°	18.2	1.0	16.6
Легкий газойль 180-350°	24.8	7.4	28.8
Тяжелый газойль	32.7	44.7	28.8
Кокс	5.7	30.4	10.1
Потери	2.1	4.4	1.6
Конверсия, % масс	59.9	20.5	59.5

Анализ материального баланса процесса термического крекинга измельченной шинной крошки показывает, что шинная крошка в данных условиях плохо подверглась термическому превращению, при этом выход бензиновой и фракции легкого газойля в составе катализата составил всего 1% масс. и 7.4% масс. соответственно. Конверсия шинной крошки в легкие фракции, включая газовую, составила 20.5%.

Как видно из представленных в *таблице 2* результатов, добавление в состав вакуумного газойля 10% масс. шинной крошки способствует увеличению бензиновой и дизельной фракций (фракции легкого газойля) с одновременным уменьшением количества фракции тяжелого газойля. При этом прирост в выходе дизельной фракции составляет 4.0% масс., а конверсия смесевого сырья составляет 59.5%, то есть добавление в состав вакуумного газойля шинной крошки практически не влияет на конверсию в целом, а увеличивает только выход легкого газойля, из чего можно сделать вывод о том, что введение в состав вакуумного газойля шинной крошки способствует большей конверсии тяжелой части вакуумного газойля. Качественные показатели полученных в процессе бензиновых и дизельных фракций представлены в *таблицах 3, 4.*

Таблица 3 – **Качественные показатели бензиновой фракции от процесса термического крекинга вакуумного газойля и его смеси с 10% шинной крошки**

Показатели	Сырье	
	ВГ	ВГ+10% шинная крошка
Плотность при 20°	739.4	741.0
Фракционный состав, °		
начало кипения,	35	32
10% перегоняется при тем-ре	68	41
50% ----	109	121
90% ----	195	175
конец кипения,	203	181
Йодное число I_2/ г	43.9	60.4
Кислотность мг КОН/ 100 см^3	0.56	0.15
Концентрация фактических смол, мг/100 см^3	1.19	1.27
Содержание серы, % масс.	0.010	0.0251
Испытание на медной пластине	+	+
Углеводородный состав, % масс.:		
н-парафины	16.5	18.4
изо-парафины	22.7	21.7
нафтены	6.5	10.6
олефины	18.3	22.7
ароматика, в т.ч.	36.0	26.6
бензол	1.7	2.3
Октановое число (и.м.)	78	79

Анализ данных *таблицы 3* показывает, что в составе бензина, полученном при каталитическом крекинге вакуумного газойля с добавлением в его состав 10% шинной крошки содержится несколько меньше изо-парафиновых, и больше (на 4.1% масс. и 4.4% масс. соответственно) нафтеновых и олефиновых углеводородов. Для использования полученной бензиновой фракции в качестве компонента товарных бензинов рекомендуется стадия предварительной гидроочистки.

Сравнение качественных показателей полученных дизельных фракций показывает, что при переработке вакуумного газойля в смеси с шинной крошкой получаемые дизельные фракции содержат в своем составе значительное количество ароматических углеводородов (28.1% масс.), достаточно высокое количество непредельных соединений (20.2% масс.) и высокое содержание серосодержащих углеводородов, в связи с чем могут быть использованы в качестве компонента дизельных топлив только после предварительной гидроочистки.

Таблица 4 – **Качественные показатели дизельной фракции от процесса термического крекинга вакуумного газойля и его смеси с 10% шинной крошки**

Показатели	Сырье	
	ВГ	ВГ+10% шинная крошка
Цетановое число	40	41
Плотность при 20°	856.5	842.4
Фракционный состав, °		
начало кипения	197	184
10% перегоняется при	230	212
50% перегоняется при	245	280
95% перегоняется при	332	350
конец кипения	347	355
Углеводородный состав, %:		
ароматические	29.2	28.1
парафино-нафтеновые	60.0	51.7
непредельные	10.8	20.2
Кинематическая вязкость при 20°	3.24	3.55
Кислотность, мг КОН/100 см^{3}топл.	2.7	3.2
Йодное число, г I/100 гтопл	6.4	11.9
Температура вспышки °	71	73
Температура застывания, °С	-21	-33
Общее содержание серы, % масс.	0.1180	0.1825
Коксуемость 10 %-го остатка % масс.	0.021	0.024
Зольность, % масс.	0.0011	0.0020

Заключение и выводы. Результаты экспериментов подтвердили возможность одновременного получения "зеленого дизеля" и "зеленого бензина" путем обработки вакуумного газойля с добавлением шинной крошки в процессе термического крекинга при температуре 500 °С и массовой скорости подачи сырья 1 ч$^{-1}$. Эксперименты показали, что введение шинной крошки в состав вакуумного газойля способствует эффективному разложению тяжелых углеводородных фракций, что приводит к образованию более легких фракций, таких как дизельное и бензиновое топливо.

Полученные фракции бензина и дизеля требуют дальнейшей обработки для улучшения их качества. После предварительной гидроочистки, которая удаляет серу и другие нежелательные примеси, полученные фракции бензина и дизеля могут быть использованы как компоненты для двигательных топлив. Гидроочистка играет ключевую роль в обеспечении высокого качества и экологической чистоты получаемых топлив, делая их пригодными для использования в современных двигателях внутреннего сгорания.

Таким образом, эксперименты продемонстрировали, что добавление шинной крошки в процесс термического крекинга вакуумного газойля не только повышает выход полезных продуктов, но и способствует получению экологически чистых топлив, что является важным шагом в развитии устойчивых и эффективных технологий переработки нефти.

ЛИТЕРАТУРА

1 Bridgwater, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading // Biomass and Bioenergy. – 2012. – № 38. – P. 68−94

2 Rahman, M. M.; Liu, R.; Cai, J. Catalytic fast pyrolysis of biomass over zeolites for high quality bio-oil − A review // Fuel Process. Technol. – 2018. – № 180. – P. 32−46

3 Gamboa, A. R.; Rocha, A. M. A.; dos Santos, L. R.; de Carvalho, J. A. Tire pyrolysis oil in Brazil: Potential production and quality of fuel // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2020. – № 120. – P. 109-117

4 Martínez, J. D.; Puy, N.; Murillo, R.; García, T.; Navarro, M. V.; Mastral, A. M. Waste tyre pyrolysis − A review // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2013. – № 23. – P. 179−213

5 Antoniou, N.; Zabaniotou, A. Features of an efficient and environmentally attractive used tyres pyrolysis with energy and material recovery // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2013. – № 20. – P. 539−558

6 Automotive Tire Market by Season Type, Vehicle Type, Rim Size, and Distribution Channel: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2020−2027.https://www.researchandmarkets.com/reports/5118790/automotive-tire-market-by-season-type-vehicle (accessed 6-May-2024)

7 Global Tire Recycling Industry Analysis 2025: Opportunity, Demand, Growth And Forecast 2017−2025. Goldstein Research, April 24, 2020.https://www.goldsteinresearch.com/report/global-tire-recyclingindustry-market-trends-analysis(accessed 6-May-2024)

8 Machin, E. B.; Pedroso, D. T.; de Carvalho, J. A. Energeticvalorization of waste tires // Renewable Sustainable Energy Rev. – 2017. – № 68. – P. 306−315

9 Carmo-Calado, L.; Hermoso-Orzaez, M. J.; Mota-Panizio, R.; Guilherme-Garcia, B.; Brito, P. Co-Combustion of Waste Tires and Plastic-Rubber Wastes with Biomass Technical and Environmental Analysis // Sustainability – 2020. – № 12. – P. 1036-1044

10. Pote, R. N.; Patil, R. K. Combustion and emission characteristics analysis of waste tyre pyrolysis oil // SN Appl. Sci. – 2019. – № 1. – P. 1−17

11 Ongen, A.; Ozcan, H. K.; ElmaslarOzbas, O. E.; Pangaliyev, Y. Gasification of waste tires in a circulating fixed-bed reactor within the scope of waste to energy // Clean Technol. Environ. Policy – 2019. – № 21. – P. 1281−1291

12 Oboirien, B. O.; North, B. C. A review of waste tyre gasification // J.Environ. Chem. Eng. – 2017. – № 5. – P. 5169−5178

13 Quek, A.; Balasubramanian, R. Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals-A review // J. Anal. Appl. Pyrolysis – 2013. – № 101. – P. 1−16

14 Zhang, L.; Zhou, B.; Duan, P.; Wang, F.; Xu, Y. Hydrothermal conversion of scrap tire to liquid fuel // Chem. Eng. J. – 2016. – № 285. – P. 157−163

15 Hoang, A. T.; Nguyen, T. H.; Nguyen, H. P. Scrap tire pyrolysis as a potential strategy for waste management pathway: a review // Energy Sources A: Recovery, Util. Environ. Eff. – 2020. – № 14. – P. 234-251

16 Ding, K.; Zhong, Z.; Zhang, B.; Song, Z.; Qian, X. Pyrolysis Characteristics of Waste Tire in an Analytical Pyrolyzer Coupled with Gas Chromatography/Mass Spectrometry // Energy Fuels – 2015. – № 29. – P. 3181−3187

17 Nkosi, N.; Muzenda, E.; Mamvura, T. A.; Belaid, M.; Patel, B. The Development of a Waste Tyre Pyrolysis Production Plant for the Gauteng Region, South Africa // Processes – 2020. – № 8. – P. 766-782

18 Alsaleh, A.; Sattler, M. L. Waste Tire Pyrolysis: Influential Parameters and Product Properties // Current Sustainable/Renewable Energy Reports – 2014. – № 1. – P. 129−135

19 Al-Lal, A. M.; Bolonio, D.; Llamas, A.; Lapuerta, M.; Canoira, L. Desulfurization of pyrolysis fuels obtained from waste: Lube oils, tire sand plastics // Fuel – 2015. – № 150. – P. 208−216

20 Hossain, M. N.; Choi, M. K.; Park, H. C.; Choi, H. S. Purifying of Waste Tire Pyrolysis Oil Using an S-ZrO2/SBA-15-H2O2 Catalytic Oxidation Method // Catalysts – 2020. – № 10. – P. 368-388

21 Zhang, G.; Chen, F.; Zhang, Y.; Zhao, L.; Chen, J.; Cao, L.; Gao, J.; Xu, C. Properties and utilization of waste tire pyrolysis oil: A mini review // Fuel Process. Technol. – 2021. – № 211. – P. 106-117

22 Xu, J.; Yu, J.; Xu, J.; Sun, C.; He, W.; Huang, J.; Li, G. High-value utilization of waste tires: A review with focus on modified carbon black from pyrolysis // Sci. Total Environ. – 2020. – № 742. – P. 140-155