

УДК 665.753.4:665.658.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ГИДРООЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА

**Баклашкина Ксения Андреевна,**  
ksenija.baklashkina@gmail.com

**Самборская Марина Анатольевна,**  
sma@tpu.ru

**Дукарт Сергей Александрович,**  
dukart@mail.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Баклашкина Ксения Андреевна**, студент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Самборская Марина Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент отделения химической инженерии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

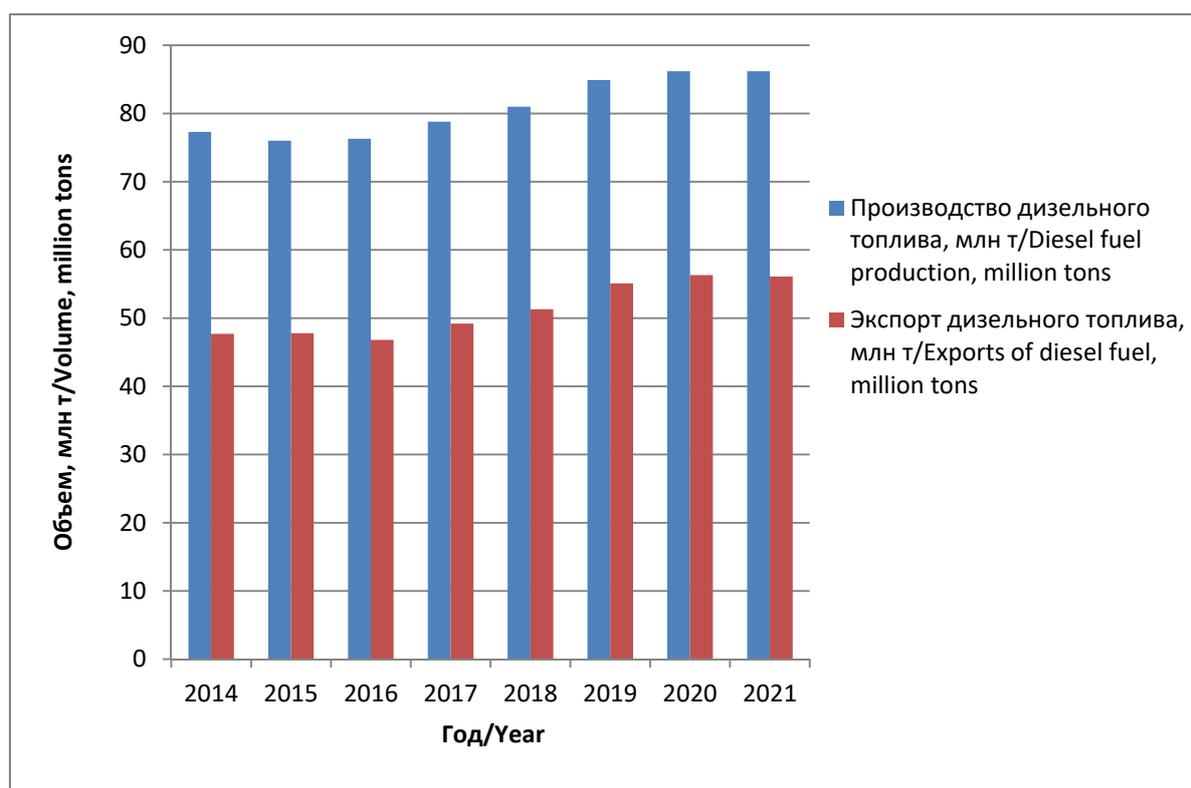
**Дукарт Сергей Александрович**, кандидат исторических наук, доцент отделения социально-гуманитарных наук Института социально-гуманитарных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

*Ужесточающиеся экологические требования к качеству моторных топлив приводят к необходимости повышения эффективности процессов обессеривания. Гидроочистка – наиболее распространенный процесс облагораживания дизельного топлива, направленный на удаление серосодержащих соединений. Это связано с тем, что в ходе данного процесса достигается улучшение качества топлива, увеличение ресурса двигателей, происходит снижение или устранение коррозии аппаратуры при переработке дизельной фракции и ее транспортировке, увеличивается резистентность к смолообразованию при хранении. Использование малосернистых топлив предотвращает загрязнение окружающей среды и способствует снижению выбросов диоксида серы. Недостатки процесса – относительно низкая степень обессеривания, высокая стоимость катализаторов и высокий расход водосодержащего газа ВСГ, зависимость от зарубежных производителей катализаторов. Чтобы получить топливо, отвечающее требованиям экологических стандартов, необходима модернизация действующих установок гидроочистки, использование новых технологий, повышающих эффективность процесса. **Целью** исследования является разработка рекомендаций для совершенствования процесса десульфуризации дизельного топлива путем оценки эффективности процесса гидроочистки и модернизации технологической схемы. Для достижения поставленной цели были использованы следующие методы исследования: метод сравнительного экономического анализа, метод оценки экономической эффективности, синтез, метод прогнозирования. **Результатом** исследования данной работы стал расчет экономической эффективности введения дополнительного блока обессеривания дизельной фракции, представленного окислительным обессериванием, в сравнении с другими методами модернизации действующих установок облагораживания дизельного топлива. Был рассчитан срок окупаемости блока окислительного обессеривания, который составил 0,9 года.*

**Ключевые слова:** Гидроочистка, окислительное обессеривание, дизельное топливо, малосернистое дизельное топливо, глубина обессеривания, экономическая эффективность.

### Введение

Производство дизельного топлива уверенно растет: на территории Российской Федерации с 2010 по 2017 год количество потребляемого дизельного топлива возросло на 9 % и составляет 76,831 млн т (рис. 1) [1]. Известно, что дизельное топливо завоевало европейский рынок. Однако рост экспорта в страны Европы сдерживается тем, что качество топлива не соответствует экологическим нормам, принятым в Европе (Евро-6) [2]. Чтобы экспортировать топливо, повысить эффективность работы двигателей и способствовать сохранению окружающей среды, необходимо повысить качество продукции.



**Рис. 1.** Динамика и прогноз производства и экспорта дизельного топлива с 2014 по 2021 гг. [1]

**Fig. 1.** Dynamics and forecast of production and export of diesel fuel from 2014 to 2021 [1]

Страны Азиатско-Тихоокеанского региона (Китай, Индия, Япония, Индонезия, Таиланд и другие) являются лидерами по потреблению нефтепродуктов, и спрос продолжает увеличиваться. По прогнозам ОПЕК, доля транспортных средств, использующих дизельный двигатель, достигнет 45 % к 2021 году [3, 4].

Россия начала сокращать объемы поставок дизельного топлива на внутренний рынок, увеличивая при этом поставки на экспорт. Так, в 2017 году произошло сокращение поставок на территории страны на 0,3 % с одновременным ростом экспорта на 5 % (рис. 1) [5].

В связи с ухудшением экологической обстановки ужесточаются требования к качеству моторных топлив. Кроме того, снижается качество нефтяного сырья, поступающего на переработку. С 1 января 2017 года на территории Российской Федерации разрешен выпуск дизельного топлива только 5-го класса экологической опасности, поэто-

му необходимо разрабатывать и совершенствовать процессы повышения его качества. Показатели качества декларируются на соответствие Техническому регламенту Таможенного союза (ТР ТС 013/2011 от 18.10.2011 № 826) [6].

Основными компонентами, ухудшающими качество дизельного топлива, являются сера и полициклические ароматические углеводороды. Серосодержащие соединения вызывают коррозию трубопроводов и насосного оборудования промышленных установок, преждевременный износ двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации, приводят к отравлению катализаторов, используемых при производстве топлива [7]. Полициклические арены влияют на работу двигателя, ухудшая приемистость и дымность [8]. Процессы облагораживания (в частности, обессеривания) представлены гидрогенизационными (гидроочистка, риформинг и др.) и негидрогенизационными технологиями (экстракция, озонирование, алкилирование, электрохимическое, ультразвуковое, окислительное обессеривание и др.).

Гидроочистка – самый крупнотоннажный каталитический процесс, направленный на облагораживание дизельных фракций [9]. В данном процессе происходит конверсия серосодержащих соединений, представленных меркаптанами, алкилсульфидами, тиоцикланами и производными тиофена, и гидрирование полиароматических соединений на алюмокобальтмолибденовых или алюмоникельмолибденовых катализаторах при температуре 300–420 °С. Процесс гидроочистки позволяет удалять 55–58 % соединений серы, содержащихся в топливе [10]. Для повышения глубины обессеривания необходимо снижение производительности установки [11]. К тому же после процесса гидроочистки дизельное топливо имеет плохие смазывающие характеристики и повышенную коррозионную активность [6, 12].

В составе дизельной фракции находятся азотсодержащие соединения, представленные производными хинолина, индола, пиридина и карбазола. Эти соединения оказывают отравляющее воздействие на катализаторы гидроочистки, поэтому предварительное снижение концентрации азотсодержащих соединений положительно скажется на сроке службы катализатора и степени десульфуризации топлива.

Практика НПЗ на территории нашей страны показывает, что соответствие нормам экологического стандарта возможно при использовании сырья с более «легким» фракционным составом. Вовлечение в переработку газойля каталитического крекинга, используемого в качестве сырья на установке гидроочистки, приводит к низким показателям глубины обессеривания, снижению цетанового числа и повышению содержания полициклических ароматических углеводородов.

Производство дизельного топлива, соответствующего требованиям европейских экологических стандартов, на отечественных нефтеперерабатывающих заводах возможно только после модернизации действующих установок гидроочистки.

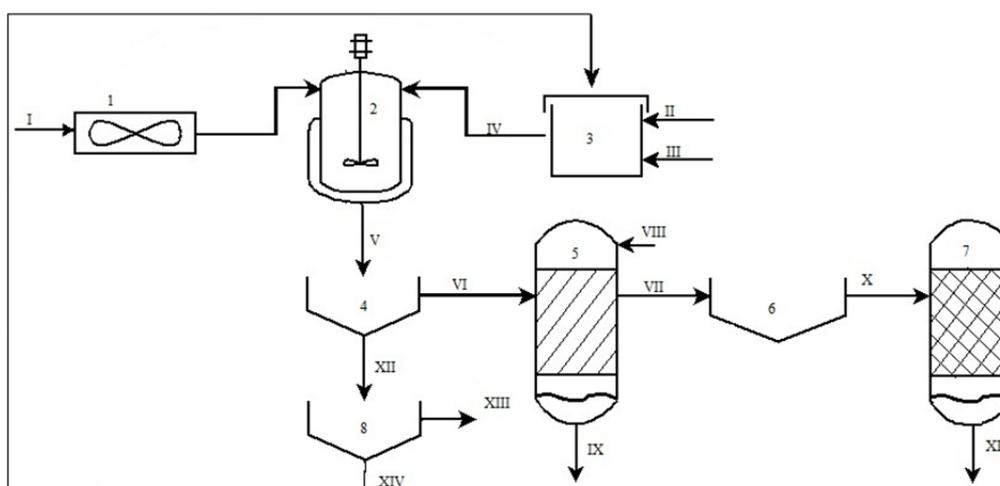
В связи с этим особую актуальность приобретает поиск инновационных методов десульфуризации или высокоэффективных катализаторов для гидрогенизационных процессов.

Решением проблемы может стать предварительное обессеривание дизельной фракции. Удаление серосодержащих соединений возможно в результате окислительного обессеривания, адсорбции, экстракции, озонирования, ультразвукового воздействия [13]. Перспективным методом десульфуризации является процесс окислительного обессеривания [14, 15]. Наибольшей популярностью в качестве окислительного агента пользуется пероксид водорода, так как он является дешевым, не загрязняющим окружающую среду и коммерчески доступным. Данный процесс протекает при атмосферном давлении и температуре до 100 °С, с высокой конверсией ароматических соедине-

ний и без использования водорода. Основной недостаток – протекание процесса в жидкой фазе. При разделении продуктов реакции происходит незначительное снижение содержания дизельного топлива, в связи с тем, что отделяемый комплекс содержит продукты окисления его компонентов.

Экспериментальные исследования показали, что процесс окислительного обессеривания может быть как альтернативой, так и дополнением к процессу гидроочистки [16–21]. Он позволяет удалить до 98 % мас. серы, снизить содержание полиароматических соединений на 1–2,7 % мас. Доказано, что в ходе данного процесса протекают реакции деазотирования, причем средняя степень удаления азота равна 23 %, при гидроочистке этот показатель составляет всего 7 %. Данный негидрогенизационный процесс позволяет перерабатывать газойль каталитического крекинга в дизельное топливо, соответствующее экологическим требованиям [16].

Разработанная авторами технологическая схема блока окислительного обессеривания представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Технологическая схема процесса окислительного обессеривания [16]:

1 – аппарат воздушного охлаждения (АВО); 2 – реактор с мешалкой и рубашкой; 3 – емкость; 4, 6, 8 – отстойник; 5 – абсорбер; 7 – адсорбер. I, VI, VII, X – дизельное топливо (частично содержит комплекс и воду); II – перекись водорода; III – муравьиная кислота; IV – окислительная смесь; V – продукты реакции; VIII – вода; IX – вода на очистку; XI – осушенное дизельное топливо; XII – комплекс и окислительная смесь; XIII – серосодержащий комплекс; XIV – окислительная смесь на рецикл

**Fig. 2.** Process flow diagram of oxidative desulfurization [16]:

1 is the air cooler unit (ACU); 2 is the reactor with a stirrer and jacket; 3 is the capacity; 4, 6, 8 is the sump; 5 is the absorber; 7 is the adsorber. I, VI, VII, X is the diesel fuel; II is the hydrogen peroxide; III is the formic acid; IV is the oxidative mixture; V are the reaction products; VIII is the water; IX is the water per refining; XI is the dried diesel fuel; XII is the complex and oxidizing mixture; XIII is the sulfur-containing complex; XIV is the recycling mixture

Промышленное внедрение технологии требует предварительной оценки экономической целесообразности ее разработки и сравнения технико-экономических показателей различных вариантов ее реализации.

В диссертационной работе Монолова Д.Д. выполнена оценка следующих вариантов модернизации работы установок гидроочистки [22]:

- введение комплекса по переработке тяжелых остатков при использовании собственного сырья;
- введение комплекса по переработке тяжелых остатков при покупке сырья;
- строительство более мощной новой установки гидроочистки;
- реконструкция гидроочистки без увеличения мощности;
- реконструкция гидроочистки при увеличении мощности одного реактора и отключении второго.

Стратегическим важным решением при получении дизельного топлива в соответствии со стандартами, по мнению автора, являются первый и второй варианты, так как они определяют перспективу развития нефтеперерабатывающей отрасли. В них основным нюансом является повышение мощности за счет переработки тяжелых остатков, энергетической и экономической эффективности нефтеперерабатывающих заводов.

Третий, четвертый и пятый варианты предусматривают улучшение энергетической и экономической эффективности нефтеперерабатывающих заводов за счет освоения производства дизельного топлива класса Евро-5.

В рамках данной работы был произведен расчет инвестиционных и операционных расходов, доход, прибыль по налогообложению, прибыль после налогообложения, экономический эффект, коэффициент дисконтирования, интегральный экономический эффект, индекс прибыльности и срок окупаемости.

При расчете показателей экономической эффективности были использованы следующие допущения: практически все капитальные вложения (инвестиции) осуществляются в начале проекта на 0-м шаге (годе) и на протяжении срока жизни проекта результаты (доходы и поступления), а также текущие издержки (затраты) поддерживаются на некотором среднем уровне. Расчеты такого рода основаны на понятии дисконтирования и дают возможность оценить затраты и доходы в текущий момент времени.

Показатели экономической эффективности для предложенных вариантов были взяты из диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук Монолов Д.Д. [22] и представлены в табл. 1 (с 1-го по 5-й вариант).

При введении комплекса по переработке тяжелых остатков инвестиционные затраты составят 91 733,5 млн руб., операционные – 5212,9 млн руб. При отсутствии на данном предприятии сырья добавится также стоимость мазута, которая составляет 48 744 рублей за тонну [22].

В случае строительства новой более мощной установки гидроочистки инвестиционные затраты составят 14 894 млн руб., а операционные – 2369,5 млн руб. Стоимость прямогонной дизельной фракции за 1 т равна 55 514 руб.

Реконструкция установки блока каталитической гидроочистки без увеличения мощности позволит снизить энергопотребление на 270,8 млн руб. Инвестиционные затраты составят 2369,5 млн руб. Также необходимо учитывать стоимость прямогонной дизельной фракции. Но при увеличении мощности одного из реакторов и отключении другого инвестиционные затраты повысятся на 7785,5 млн руб., а снижение энергопотребления достигнет 1692,5 млн руб. [22].

Основываясь на предложенной в диссертационной работе Маноловым Д.Д. методологии, авторами произведена оценка эффективности еще одного способа облагораживания дизельного топлива, представленного блоком окислительного обессеривания. Это позволило выполнить сравнение таких показателей, как индекса прибыльности, интегрального экономического эффекта, срока окупаемости, количества операционных и инвестиционных затрат.

Нами был произведен аналогичный расчет на основе допущений принятых в работе Монолова Д.Д. для того, что произвести сравнение индекса прибыльности, инте-

грального экономического эффекта, срока окупаемости, количества операционных и инвестиционных затрат в предложенных автором вариантах и варианте, предложенном нами.

По нашему мнению, для развития нефтеперерабатывающей отрасли, в частности производства дизельного топлива в соответствии с требованиями экологической опасности, важным решением является внедрение новых и эффективных методов облагораживания дизельных фракций. Основными нюансами являются повышение мощности, энергетической, экономической и экологической эффективности обессеривающего комплекса нефтеперерабатывающих заводов.

При строительстве блока окислительного обессеривания инвестиционные затраты составят 7554 млн руб., а операционные – 2266 млн руб. Стоимость прямогонной дизельной фракции за 1 т была принята 55 514 руб. Прибыль от введения блока окислительного обессеривания формируется из-за повышения класса экологической опасности и соответственно стоимости дизельного топлива, также в этом случае по отношению к производству не применяют за штрафные санкции.

Основные показатели экономической эффективности представлены в табл. 1, расчет показателей для процесса окислительного обессеривания представлен в варианте под номером 6.

**Таблица 1. Показатели экономической эффективности [22]**

**Table 1. Indicators of economic efficiency [22]**

Показатели Characteristics	Варианты/Options										
	1 и 2				3	4	5	6			
Время строительства Construction time	3,5	4,0	4,5	Критические показатели Critical value	1,5	2,0	1,0	1,5	1,5	2,0	4,0
Интегральный экономический эффект, млн долл США Cumulative benefits, million US dollars	1727,39	1460,18	1245,06	234,23	261,14	221,64	18,46	17,98	28,08	10,65	308,49
Права интеллектуальной собственности, % Intellectual property rights, %	38,92	35,62	37,87	19,16	42,76	37,20	27,91	29,83	20,24	16,87	32,98
Индекс прибыльности IR (Index of return)	2,36	2,17	2,10	1,19	2,51	2,04	1,53	1,67	1,22	1,07	1,79
Срок окупаемости инвестиций, год Payback period, year	6,9	7,3	7,9	9,9	5,5	6,1	5,1	5,1	7,1	9,2	0,9

Исходя из представленных результатов расчета, можно увидеть, что наименьшие инвестиционные затраты будут при реконструкции установки блока каталитической гидроочистки без увеличения мощности, наименьшие операционные – при строительстве более мощной установки гидроочистки.

Наилучшие показатели интегрального экономического эффекта наблюдаются при введении комплекса по переработке тяжелых остатков и при введении блока окислительного обессеривания, наихудший – при реконструкции гидроочистки в течение 2 лет при увеличении мощности одного реактора и отключении второго. Данный показатель позволяет судить о результативности принятых мер по модернизации процесса.

Индекс прибыльности помогает в оценке перспектив проекта, так наиболее перспективным является строительство более мощной новой установки гидроочистки.

Показатели по сроку окупаемости производимых мер модернизации в 5 и более раз ниже при введении процесса окислительного обессеривания, чем при введении остальных процессах.

В ходе сравнения был выбран наиболее дешевый метод облагораживания дизельной фракции: им является реконструкция гидроочистки без увеличения мощности. Но из представленных таблиц можно оценить значения, показывающие экономическую эффективность от внедрения блока окислительного обессеривания: срок окупаемости составляет менее 1 года, а также большим плюсом является соблюдение экологических требований к данному виду нефтепродуктов и возможность его экспорта в страны Европы.

### Выводы

1. Показано, что экономически рентабельным является строительство новых установок гидроочистки дизельного топлива взамен морально устаревших, что позволит более гибко вести производственный процесс.

2. Процесс окислительного обессеривания позволяет соблюдать экологические требования к качеству дизельного топлива, экспортировать дизельное топливо в страны Европы, является стратегически важным процессом для нефтеперерабатывающей отрасли России, так как не имеет аналогов в мире.

3. Процесс окислительного обессеривания можно реализовать как самостоятельный процесс, так и при совмещении с процессом гидроочистки.

4. Основные показатели, доказывающие экономическую эффективность при введении процесса окислительного обессеривания, – это индекс прибыльности и интегральный экономический эффект, которые равны 1,79 и 308,49 млн долл США соответственно.

5. Показано, что процесс окислительного обессеривания является экономически эффективным процессом и сроки окупаемости составляют менее 1 года.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство дизельного топлива в России – итоги 2016 года. Обзор // Российский бизнес-журнал. URL: <https://is.gd/7DyCb7> (дата обращения 10.10.2018).
2. ГОСТ 32511-2013 (ЕН 590:2009). Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 2014. – 16 с.
3. Russell C. Refinery wars: China, India win; South Korea, Japan, Singapore lose. URL: <http://www.reuters.com/article/us-column-russell-refineries-asia-idUSKCN1140JN> (дата обращения: 18.02.2018).
4. World oil outlook 2015 / J. Ban, J.L.Arellano, R.F. Aguilera, M. Tallett // Organization of the Petroleum Exporting Countries. – 2015. – V.1. – 406 p.
5. Давыдов И.А. Экологический аспект развития мирового рынка дизельного топлива // Вестник университета. – 2016. – № 9. – С. 75–78.
6. Булгаков С.В. Особенности производства гидроочищенного дизельного топлива стандарта ЕВРО-5 // Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2017). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30530713> (дата обращения 20.02.2018).
7. Багрий Е.И., Нехаев А.И. Нефтехимия и защита окружающей среды (обзор) // Нефтехимия. – 1999. – Т. 39. – № 2. – С. 83–97.
8. Ганжа В.Л. Основы эффективного использования энергоресурсов: теория и практика энергосбережения. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 450 с.
9. Jianghua Qiu, Guanghui Wang. Oxidative desulfurization of diesel fuel using amphiphilic quaternary ammonium phosphomolybdate catalysts // Fuel Processing Technology. – 2009. – V. 90. – Iss. 12. – P. 1538–1542.
10. Солодова Н.Л., Терентьева Н.А. Гидроочистка топлив. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2008. – 63 с.
11. Перекрестов А.П., Клыканова А.А. Улучшение смазочной способности экологически чистого дизельного топлива с помощью магнитно-мицеллярной противно-износной присадки // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2012. – № 5. – С. 5–8.

12. Жилина В.А., Самойлов Н.А. Направления модернизации установок гидроочистки дизельного топлива // Нефтегазовое дело. – 2017. – № 2. – С. 90–109.
13. Oxidative desulfurization of diesel using promising heterogeneous tungsten catalysts and hydrogen peroxide / J.L. García-Gutiérrez, G.C. Laredo, P. García-Gutiérrez, F. Jiménez-Cruz // Fuel. – 2014. – V. 138. – P. 118–125.
14. Pawelec B. et al. Toward near zero-sulfur liquid fuels: a perspective review // Catalysis Science & Technology. – 2011. – № 1. – P. 23–42.
15. Иовик Ю.А., Кривцов Е.Б., Головкин А.К. Окислительное обессеривание вакуумного газойля Новокуйбышевского нефтеперерабатывающего завода // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. Т. 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 317–318.
16. Баклашкина К.А. Гидроочистка дизельной фракции с предварительным окислительным обессериванием. – Томск, Изд-во ТПУ, 2018. – 122 с.
17. Баклашкина К.А. Исследование изменения группового состава дизельной фракции в процессе окислительного обессеривания // Химия и химическая технология в XXI веке: Материалы XIX Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых им. профессора Л.П. Кулёва. – Томск, 21–24 мая 2018 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 346–347.
18. Баклашкина К.А. Удаление серосодержащих соединений из дизельной фракции в процессе окислительного обессеривания // Проблемы геологии и освоения недр: Материалы XXII Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова. – Томск, 2–7 апреля 2018 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 379–381.
19. Баклашкина К.А. Исследование изменения группового состава гетероатомных серосодержащих соединений дизельной фракции в процессе гидроочистки в сочетании с процессом окислительного обессеривания // Материалы XXVIII Менделеевской конференции молодых ученых. – Новосибирск, 13–18 мая 2018 г. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – С. 63–64.
20. Баклашкина К.А. Исследование зависимости изменения содержания ароматических и гетероатомных групп соединений в дизельной фракции в процессе окислительного обессеривания // Достижения молодых ученых: химические науки: Материалы IV Всероссийской молодежной конференции. – Уфа, 16–19 мая 2018 г. – Уфа: Диалог, 2018. – С. 67–68.
21. Ахметов С.А. Лекции по технологии глубокой переработки нефти в моторные топлива. – СПб.: Недра, 2007. – 312 с.
22. Манолов Д.Д. Экономическая эффективность современных технологий производства дизельного топлива класса Евро-5 и их реализация в Республике Болгария: дис. ... канд. экон. наук. – М., 2013. – 190 с.

*Поступила 28.10.2018 г.*

UDC 665.753.4:665.658.2

**COMPARATIVE STUDY OF THE METHODS FOR IMPROVING DIESEL  
HYDROTREATING EFFICIENCY****Kseniya A. Baklashkina,**  
kseniya.baklashkina@gmail.com**Marina A. Samborskaya,**  
sma@tpu.ru**Sergey A. Dukart,**  
dukart@tpu.ruNational Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.**Kseniya A. Baklashkina**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.**Marina A. Samborskaya**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.**Sergey A. Dukart**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

*Stringent environmental restrictions for the motor fuels quality necessitate the desulfurization efficiency improvement. Hydrotreating is the conventional process of diesel fuel refining, aimed at removal of sulfur-containing compounds. This is due to the fact that hydrotreating results in higher fuel quality, engine life prolongation, equipment corrosion reduction or elimination during the storage, transportation and processing of diesel fractions. The use of low-sulfur fuels prevents environmental pollution and decreases sulfur dioxide emissions. Lower desulfurization extent, higher hydrogen bearing gas (HBG) consumption, expensive catalysts as well as foreign manufacturers dependence are the main drawbacks of the process. To produce the fuel adequate to the environmental standards, operating hydrotreating units revamp as well as innovative productivity-enhancing technologies are necessarily demanded. **The aim** of the study is to evaluate new oxidative desulfurization efficiency along with other hydrotreating flow diagram revamps and specify more economically and technologically efficient process. To achieve this goal, the following research methods were used: the method of comparative economic analysis, the method of evaluating economic forecasting, synthesis. **The results** of the study demonstrate the benefits of oxidative desulfurization in comparison with other hydrotreating revamps. The payback period of the oxidative desulfurization unit was calculated, it is equal to 0,9 of a year.*

**Key words:** Hydrotreating, oxidative desulfurization, diesel fuel, low-sulfur diesel fuel, desulfurization extent, economic efficiency.

**REFERENCES**

1. Proizvodstvo dizelnogo topliva v Rossii – itogi 2016 goda. Obzor [Production of diesel fuel in Russia. Review]. *Russian Business Journal*. Available at: <https://is.gd/7DyCb7> (accessed 10 October 2018).
2. GOST 32511-2013 (EN 590:2009). *Topливо dizelnoe EVRO. Tekhnicheskie usloviya* [State Standard 32511-2013 (EN 590:2009). Diesel fuel EURO. Technical conditions]. Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 2014. 16 p.
3. Russell C. *Wars refineries: China, India win; South Korea, Japan, Singapore are losing*. Available at: <http://www.reuters.com/article/us-column-russell-refineries-asia-idUSKCN1140JN> (accessed at 18 February 2018).

4. Ban J., Arellano J.L., Aguilera R.F., Tallett M. World oil forecast 2015. *Organization of the Petroleum Exporting Countries*, 2015, vol. 1, 406 p.
5. Davydov I.A. Ekologicheskiy aspekt razvitiya mirovogo rynka dizelnogo topliva [Ecological aspect of development of the global diesel fuel market]. *Vestnik Universiteta*, 2016, no. 9, pp. 75–78.
6. Bulgakov S.V. Osobennosti proizvodstva gidroochishchennogo dizelnogo topliva standarta EVRO-5 [Features of production of hydrotreated diesel fuel of EURO-5 standard]. *Sovremennye avtomobilnye materialy i tekhnologii (SAMIT-2017)*. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30530713> (accessed 20 February 2018).
7. Bagriy E.I., Nekhaev A.I. Neftekhimiya i zashchita okruzhayushchey sredy (obzor) [Petrochemistry and environmental protection (review)]. *Neftekhimiya*, 1999, vol. 39, no. 2, pp. 83–97.
8. Ganzha V.L. *Osnovy effektivnogo ispolzovaniya energoresurosov: teoriya i praktika energosberezheniya* [Fundamentals of energy efficiency: the theory and practice of energy saving]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2007. 450 p.
9. Jianghua Qiu, Guanghui Wang. Oxidative desulfurization of diesel fuel using amphiphilic catalysts based on quaternary ammonium molybdenate phosphate. *Fuel reprocessing technology*, 2009, vol. 90, Iss. 12, pp. 1538–1542.
10. Solodova N.L., Terenteva N.A. *Gidroochistka topliv* [Hydrofining of fuels]. Kazan, NITU Press, 2008. 63 p.
11. Perekrestov A.P., Klykanova A.A. Uluchshenie smazochnoy sposobnosti ekologicheski chistogo dizelnogo topliva s pomoshchyu magnitno-mitsellyarnoy protivno-iznosnoy prisadki [Improving the lubricating ability of environmentally friendly diesel fuel using a magnetic-micellar anti-wear additive]. *Zashchita okruzhayushchey sredy v neftegazovom komplekse*, 2012, no. 5, pp. 5–8.
12. Zhilina V.A., Samoilov N.A. Directions of modernization of diesel fuel hydrotreating plants. *Oil and gas business*, 2017, no. 2, pp. 90–109. In Rus.
13. García-Gutiérrez J.L., Laredo G.C., García-Gutiérrez P., Jiménez-Cruz F. Oxidative desulfurization of diesel using promising heterogeneous tungsten catalysts and hydrogen peroxide. *Fuel*, 2014, vol. 138, pp. 118–125.
14. Pawelec B. Toward near zero-sulfur liquid fuels: a perspective review. *Catalysis Science & Technology*, 2011, no. 1, pp. 23–42.
15. Iovik Yu.A., Krivtsov E.B., Golovko A.K. Okislitelnoe obesserivanie vakuumnogo gazoylya Novokuybyshevskogo neftepererabatyvayushchego zavoda [Oxidative Desulfurization of Vacuum Gas Oil at the Novokuibyshevsk Refinery]. *Problemy geologii i osvoyeniya nedr. Trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina* [Problems of Geology and Subsoil Development. Proc. of the XXI International Symposium named after Academician M.A. Usov for students and young scientists dedicated to the 130<sup>th</sup> anniversary of the birth of Professor M.I. Kuchin]. Tomsk, TPU Press, 2017. Vol. 2, pp. 317–318.
16. Baklashkina K.A. *Gidroochistka dizelnoy fraktsii s predvaritelnyim okislitelnyim obesserivaniem* [Hydrotreating diesel fraction with preliminary oxidative desulfurization]. Tomsk, TPU Publishing house, 2018. 122 p.
17. Baklashkina K.A. Issledovanie izmeneniya gruppovogo sostava dizelnoy fraktsii v protsesse okislitel'nogo obesserivaniya [Study of changes in the group composition of the diesel fraction in oxidative desulfurization]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya v XXI veke. Materialy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh imeni professora L.P. Kulova* [Chemistry and chemical technology in the XXI century. Materials of the XIX International Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists named after Professor L.P. Kuliev]. Tomsk, May 21–24, 2018. Tomsk, TPU Publ. house, 2018. pp. 346–347.
18. Baklashkina K.A. Udalenie serosoderzhashchikh soedineniy iz dizelnoy fraktsii v protsesse okislitel'nogo obesserivaniya [Removal of sulfur-containing compounds from the diesel fraction at oxidative desulfurization]. *Problemy geologii i osvoyeniya nedr. Materialy XXII Mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma studentov i molodykh uchenykh imeni akademika M.A. Usova* [Proc. of the XXII International Scientific Symposium of students and young scientists named after Academician M.A. Usov. Problems of geology and exploration of mineral resources]. Tomsk, April 2–7, 2018. Tomsk, TPU Publ. house, 2018. pp. 379–381.
19. Baklashkina K.A. Issledovanie izmeneniya gruppovogo sostava geteroatomnykh serosoderzhashchikh soedineniy dizelnoy fraktsii v protsesse gidroochistki v sochetanii s protsessom okislitel'nogo obesserivaniya [Study of changes in group composition of heteroatomic sulfur-containing compounds of diesel fraction at hydrotreating in combination with oxidative desulfurization]. *Materialy XXVIII Mendeleevskoy konferentsii molodykh uchenykh* [Proc. of the XXVIII Mendeleev Conference of Young Scientists]. Novosibirsk, May 13–18, 2018. Novosibirsk, CPI NSU Press, 2018. pp. 63–64.
20. Baklashkina K.A. Issledovanie zavisimosti izmeneniya sodержaniya aromatischeskikh i geteroatomnykh grupp soedineniy v dizelnoy fraktsii v protsesse okislitel'nogo obesserivaniya [Study of dependence of

changes in the content of aromatic and heteroatomic groups of compounds in diesel fraction at oxidative desulfurization]. *Dostizheniya molodykh uchenykh: khimicheskie nauki. Materialy IV Vserossiyskoy molodezhnoy konferentsii* [Proc. of the IV All-Russian Youth Conference. Achievements of Young Scientists: Chemical Sciences]. Ufa, May 16–19, 2018. Ufa, Dialog Publ., 2018. pp. 67–68.

21. Akhmetov S.A. *Lektsii po tekhnologii glubokoy pererabotki nefii v motornye topliva* [Lectures on the technology of deep processing of oil into motor fuels]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2007. 312 p.
22. Manolov D.D. *Ekonomicheskaya effektivnost sovremennykh tekhnologiy proizvodstva dizelnogo topliva klassa Evro-5 i ikh realizatsiya v Respublike Bolgariya*. Dis. Kand. nauk [Economic efficiency of modern technologies for production of diesel fuel of Euro-5 class and their implementation in the Republic of Bulgaria. Cand. Diss.]. Moscow, 2013. 190 p.

*Received: 28 October 2018.*