

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и инженерной экологии

(наименование института полностью)

Кафедра «Рациональное природопользование и ресурсосбережение»

(наименование кафедры полностью)

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль)/специализация)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему Разработка технологии извлечения ценных компонентов из
отработанных масел автомобильного цеха

ПАО «КуйбышевАзот»

Студент

А.В. Клещук

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.В. Чариков

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

В.В. Петрова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.п.н., доцент М.В. Кравцова

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 2019 г.

Тольятти 2019

АННОТАЦИЯ

Цель бакалаврской работы – снижение влияния негативных последствий нерационального использования отработанного моторного масла ПАО «КуйбышевАзот»

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести исследование составов и свойств различных типов моторных масел
2. Определить количество и состав моторных масел используемых на ПАО «КуйбышевАзот»
3. Провести анализ существующих технологий
4. Выбрать оптимальный способ переработки
5. Доказать применимость метода при помощи технологических расчетов.

В работе были проанализированы существующие методы переработки отработанного и разработана технологическая схема установки для переработки отработанного масла.

Во введении описывается существующая проблема, обосновывается ее актуальность, формулируется цель работы и задачи решение которых приведет к ее достижению. В первом разделе дан обзор состава моторных масел выделены основные группы компонентов, приведен обзор существующих методов переработки выделены их сильные и слабые стороны. Во втором разделе изложены технологические сведения о новом способе переработки отработанного масла. В третьей выполнены расчеты основного оборудования.

Бакалаврская работа состоит из введения, 3-х разделов, заключения, списка используемых источников - 34. Общий объем работы 69 страниц машинописного текста, в том числе таблиц - 13, рисунков – 16.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Теоретические основы технологии переработки масел	6
1.1 Состав, свойства, области применения и жизненный цикл смазочных масел.....	6
1.2 Технологии переработки отработанных масел	21
1.3 Регенерация моторных топлив более подробно сам принцип повторного использования.....	27
2 Разработка технологии и аппаратурного оформления процесса переработки отработанных автомобильных масел	36
2.1. Образование отработанного масла как отхода на ПАО «КуйбышевАзот».	36
2.2 Описание предлагаемого технологического принципа переработки	37
3 Технологические расчеты	47
3.1 Материальный баланс процесса	47
3.2 Расчет роторно-пленочного испарителя	48
3.3 Мощность привода роторной мешалки	53
3.4 Расчет подогревателя масла	54
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	65

ВВЕДЕНИЕ

Мировая химическая промышленность ежегодно производит более 50 миллионов тонн смазочных моторных масел каждый год. Далеко не все масло, теряющее потребительские свойства подвергается вторичной переработки. По разным данным его доля составляет от четверти до трети общего выпуска. Остальное в лучшем случае сжигается. В худшем загрязнет почву, водоемы и атмосферу. Если смотреть на эту проблему в мировом масштабе, то по сути она касается каждого человека [1].

Так всего один литр отработанного масла, оказавшегося в почве, загрязняет от ста до тысячи кубометров грунтовых вод. По данным исследований до 40% мировой поверхности водоемов покрыта масляной пленкой различной толщины. А ведь большинство видов отработанного масла относится к отходам как минимум третьего класса опасности. При этом ввести с отравляющим действием непосредственно компонентов отработанного масла оно является благоприятной средой для развития бактерий [2].

Ситуация с переработкой масел в России уступает общемировой. Так годовое потребление составляет восемь миллионов тонн в год, тогда как экологически приемлемая переработка и регенерация составляет 4% от этого количества [3].

Утилизация отработанных смазочных масел представляет большую проблему для предприятий его вырабатывающих. Любой процесс переработки требует финансовых вложений. Малые и даже средние предприятия не могут себе этого позволить. Этим и обусловлен низкий процент переработки. Это создает предпосылки для незаконного захоронения отработанного масла. Отработанное масло можно использовать в качестве топлива, но с использованием специальных систем, обеспечивающих безопасность. Прямое сжигание запрещено. Помимо этого, существуют

достаточно эффективные технологии вторичного использования, но они не развиты по разным причинам, в том числе и субъективным.

Отработанное масло является ценным источником нефтехимического сырья, при этом получаем в крупнотоннажном масштабе, если брать объем страны в целом. Рациональная его переработка позволит получать совокупный доход порядка 200-300 миллиардов рублей в год [4].

Целью бакалаврской работы является снижение влияния негативных последствий нерационального использования отработанного моторного масла ПАО «КуйбышевАзот». Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести исследование составов и свойств различных типов моторных масел
2. Определить количество и состав моторных масел, используемых на ПАО «КуйбышевАзот»
3. Провести анализ существующих технологий
4. Выбрать оптимальный способ переработки
5. Доказать применимость метода при помощи технологических расчетов

1 Теоретические основы технологии переработки масел

1.1 Состав, свойства, области применения и жизненный цикл смазочных масел

«Моторные масла — масла, применяемые для смазывания поршневых и роторных двигателей внутреннего сгорания.

Все современные моторные масла состоят из базовых масел и улучшающих их свойства присадок. В качестве базовых масел обычно используют дистиллятные и остаточные компоненты различной вязкости (углеводороды), их смеси, углеводородные компоненты, полученные гидрокрекингом и гидроизомеризацией, а также синтетические продукты (высокомолекулярные углеводороды, полиальфаолефины, сложные эфиры и другие). Большинство всесезонных масел получают путём загущения маловязкой основы макрополимерными присадками» [5].

Базовые масла для моторных масел служат их основой, к которой в дальнейшем производители добавляют необходимые присадки для придания им нужных свойств и характеристик. Поэтому базовые автомобильные масла можно рассматривать как некий «фундамент», на котором в дальнейшем основываются все характеристики моторных масел.

Базовые масла подразделяются на пять групп, которые отличаются между по химическому составу, а значит, и свойствам. От этого (и их смешения) зависит, каким будет итоговое моторное масло, продающееся на полках магазинов. А самое интересное, так это тот факт, что их производством, как и самих присадок занимаются лишь 15 мировых нефтяных компаний, в то время как марок итогового масла намного больше. Классификация базовых масел подразумевает деление их на пять групп. Это прописано в стандарте API 1509, приложение E [6].

В таблице 1 приведена классификации базовых масел по API.

Таблица 1 – Классификации базовых масел по API

Группа базового масла	Содержание серы, %	Содержание предельных углеводов, %	Индекс вязкости
Группа I	>0,03	< 90	80-120
Группа II	≤0,03	≥90	80-120
Группа III	≤0,03	≥90	>120
Группа IV	Поли-альфа-олефины		
Группа V	Другие, не вошедшие в группы I-IV (сложные спирты и эфиры)		

Масла 1 группы. Эти составы получают путем очистки нефтепродуктов, оставшихся после получения бензина или других ГСМ с помощью химических реагентов (растворителей). Еще их называют маслами грубой очистки. Существенным недостатком таких масел является наличие в них большого количества серы, более 0,03%. Что касается характеристик, то такие составы обладают слабыми показателями индекса вязкости (то есть, вязкость очень зависит от температуры и может нормально работать лишь в узком температурном диапазоне). В настоящее время 1 группа базовых масел считается устаревшей и из них производится лишь минеральное моторное масло. Индекс вязкости таких базовых масел составляет 80...120. А температурный диапазон — 0°С...+65°С. Единственное их преимущество — низкая цена.

Масла 2 группы. Базовые масла 2 группы получают в результате выполнения химического процесса под названием гидрокрекинг. Другое их название — масла высокой степени очистки. Это также очищение нефтепродуктов, однако с использованием водорода и под высоким давлением (на самом деле процесс многоступенчатый и сложный). В результате получается почти прозрачная жидкость, которая и является базовым маслом. Содержание серы в нем менее 0,03%, и они обладают

антиокислительными свойствами. Благодаря своей чистоте срок службы полученного на его основе моторного масла значительно увеличивается, а отложения и нагар в двигателе уменьшаются. На основе гидрокрекингвого базового масла делают так называемую «НС-синтетику», которую некоторые специалисты относят к полусинтетике. Индекс вязкости в данном случае также находится в диапазоне от 80 до 120. Эту группу называют английской аббревиатурой HVI (High Viscosity Index), что дословно переводится как высокий индекс вязкости.

Базовые масла III группы имеют более высокое содержание парафинов, обеспечивающее более высокий индекс вязкости и более низкое значение точки застывания

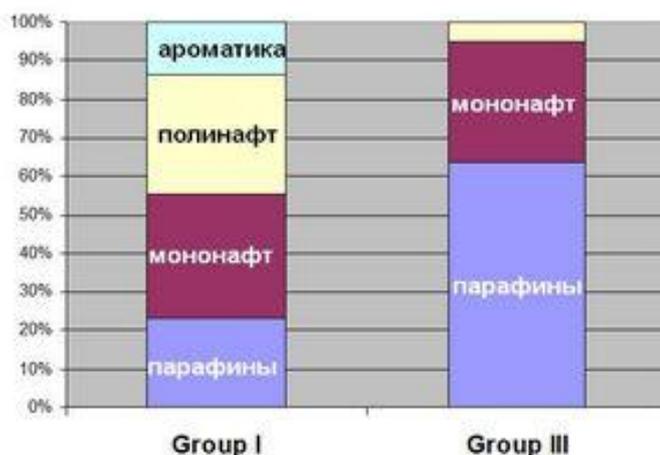


Рисунок 1 - Сравнение составов масел 2-ой и 3-ей группы

Масла 3 группы. Эти масла получают аналогичным образом, как и предыдущие, из нефтепродуктов. Однако особенностями 3 группы является увеличенный индекс вязкости, его значение превышает 120. Чем выше этот показатель — тем в более широком температурном диапазоне может работать полученное моторное масло, в частности, в сильный мороз. Зачастую на основе базовых масел 3 группы делают синтетические моторные масла. Содержание серы здесь менее 0,03%, а сам состав состоит на 90% из химически стабильных, насыщенных водородом, молекул. Другое его название — синтетика, однако по факту ею не является. Название группы

иногда звучит как VHVI (Very High Viscosity Index), что переводится как очень высокий индекс вязкости.

Иногда отдельно выделяют группу 3+, базу для которой получают не из нефти, а из природного газа. Технология ее создания называется GTL (gas-to-liquids), то есть превращение газа в жидкие углеводороды. В результате получается очень чистое, похожее на воду, базовое масло. Его молекулы обладают прочными связями, устойчивыми к воздействию агрессивных условий. Масла, созданные на такой базе, считаются полностью синтетическими, несмотря на то, что в процессе их создания используется гидрокрекинг.

«Сырьевые компоненты 3-й группы отлично подходят для разработки рецептур топливосберегающих, синтетических, универсальных моторных масел в диапазоне от 5W-20 до 10W-40» [6].

Масла 4 группы. Эти масла создаются на основе полиальфаолефинов, и являются основой для так называемой «настоящей синтетики», которая отличается своим высоким качеством. Это так называемые базовое полиальфаолефиновое масло. Производится оно с помощью химического синтеза. Однако особенностью моторных масел, полученных на такой базе, является их высокая стоимость, поэтому они используются зачастую лишь в спортивных машинах и в машинах премиум-класса.

Масла 5 группы. Существует отдельные типы базовых масел, куда входят все другие составы, не вошедшие в перечисленные выше четыре группы (грубо говоря, сюда входят все смазывающие составы, даже не относящиеся к автомобильной технике, которые не вошли в первые четыре). В частности, силикон, фосфатный эфир, полиалкиленгликоль (PAG), полиэфиры, биосмазки, вазелиновые и белые масла и так далее. Они, по сути, являются добавками к другим составам. Например, эфиры служат добавками к базовому маслу для улучшения его эксплуатационных свойств. Так, смесь эфирного масла и полиальфаолефинов нормально работает при высоких температурах, обеспечивая тем самым повышенную моющую способность

масла и увеличивая срок его эксплуатации. Другое название таких составов — эфирные масла. Они в настоящее время являются самыми качественными и обладающими самыми высокими характеристиками. К ним относятся эстеровые масла, которые однако производятся в очень малых количествах из-за своей дороговизны (около 3% мирового объема производства).[3]

Таким образом, характеристики базовых масел зависят от способа их получения. А это, в свою очередь, влияет на качество и характеристики уже готовых моторных масел, использующихся в автомобильных двигателях. Еще на масла, полученные из нефти, влияет ее химический состав. Ведь он зависит от того, где (в каком регионе на планете) и каким образом была добыта нефть.

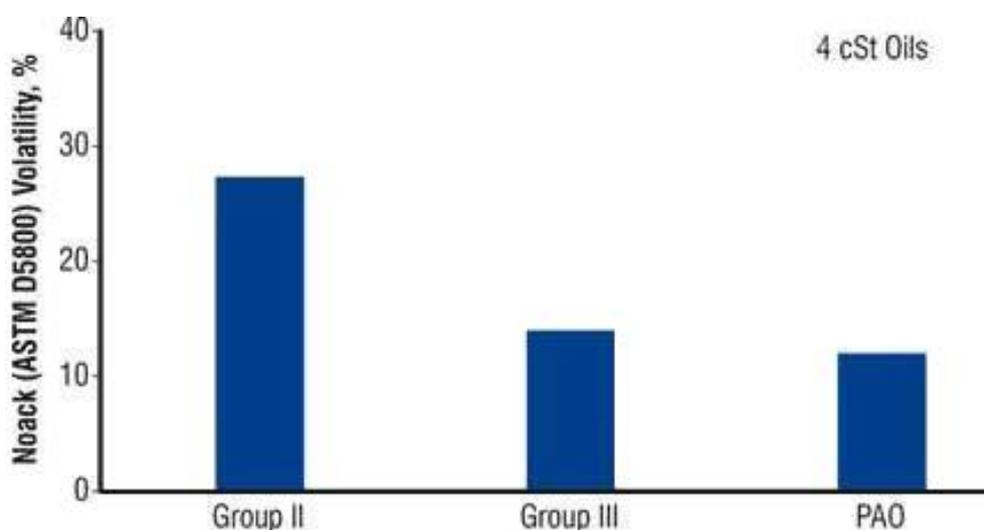


Рисунок 2 - Испаряемость базовых масел по Noack

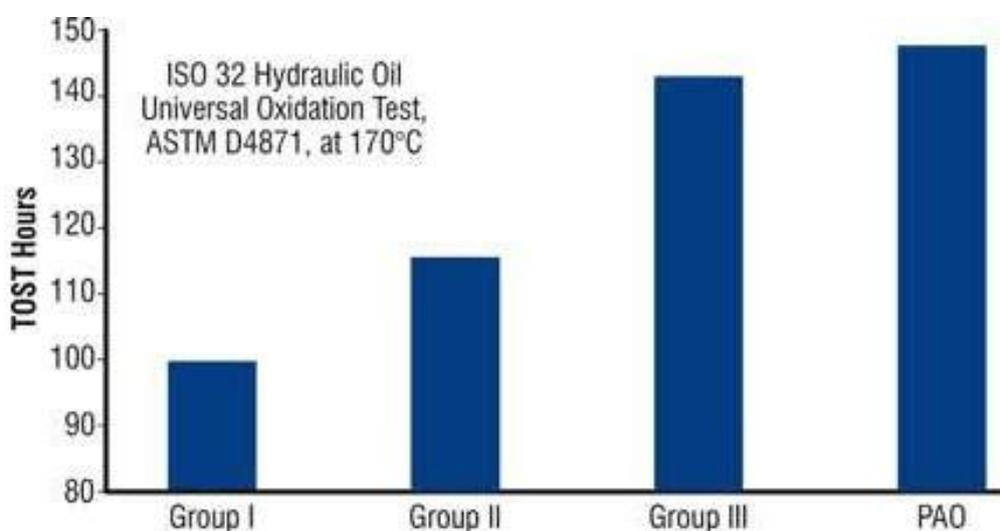


Рисунок 3 - Устойчивость к окислению

Вопрос о том, какие базовые масла являются лучшими не совсем корректный, поскольку все зависит от того, какое масло нужно получить и использовать в итоге. Для большинства бюджетных машин вполне подходит «полусинтетика», созданная на основе смешения масел 2, 3 и 4 групп. Если же речь о хорошей «синтетике» для дорогих иномарок премиум-класса, то лучше покупать масло на основе базы 4 группы.

До 2006 года производителям моторных масел можно было называть «синтетическими» масла, полученные на основе четвертой и пятой групп. Которые считаются лучшими базовыми маслами. Однако в настоящее время разрешается это делать даже в случае, если использовалось базовое масло второй или третьей группы. То есть, «минеральными» остались лишь составы на основе первой базовой группы.

Допускается смешение отдельных базовых масел, относящихся к разным группам. Так можно регулировать характеристики итоговых составов. Например, если смешать базовые масла 3 или 4 группы с аналогичными составами из 2 группы, то получится «полусинтетика» с повышенными эксплуатационными характеристиками. Если же упомянутые масла смешать с 1 группой, то получится также «полусинтетика», однако с уже более низкими характеристиками, в частности, высоким содержанием серы или другими примесями (зависит от конкретного состава). Интересно, что масла пятой группы в чистом виде не используют в качестве базы. К ним добавляют составы из третьей и/или четвертой групп. Связано это с их большой испаряемостью и дороговизной.

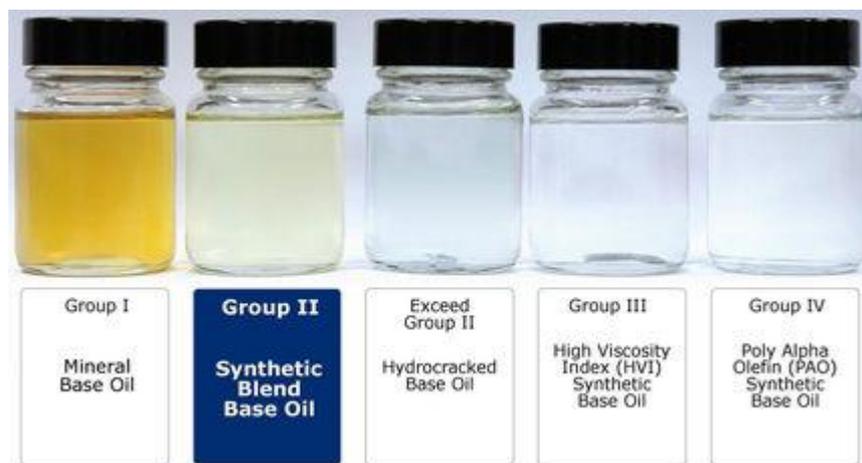


Рисунок 4 – Внешний вид масел различных групп

Отличительной особенностью масел на основе ПАО, является то, что невозможно сделать 100% ПАО состав. Причина заключается в их очень плохой растворимости. А она нужна для растворения присадок, которые добавляются в процессе изготовления. Поэтому всегда к ПАО-маслам добавляется некоторое количество средств из более низких групп (третьей - и/или четвертой) [7-11].

Строение молекулярных связей у масел, относящихся к разным группам, отличается. Так, у низких групп (первая, вторая, то есть, минеральные масла) молекулярные цепи похожи на разветвленную крону дерева с кучей «кривых» ветвей. Такой форме проще свернуться в шарик, что и происходит при замерзании. Соответственно, замерзать такие масла будут при более высокой температуре. И наоборот, у масел высоких групп углеводородные цепочки имеют длинную прямую структуру, и им сложнее «свернуться». Поэтому они и замерзают при более низких температурах.

«При производстве современных базовых масел можно независимо управлять коэффициентом вязкости, температурой предела текучести, испаряемостью и устойчивостью к окислению» [7]. Как указывалось выше, базовые масла производят из нефти или нефтепродуктов (например, мазута), а также есть производство и из природного газа методом конверсии в жидкие углеводороды.

Нефть сама по себе — сложное химическое соединение, в состав которого входят насыщенные парафины и нафтены, ненасыщенные ароматические олефины и так далее. Каждое такое соединение обладает положительными и отрицательными свойствами.

В частности, парафины обладают хорошей стабильностью к окислению, однако при низких температурах она сводится «на нет». Нафтеновые кислоты при высокой температуре образуют в масле осадок. Ароматические углеводороды отрицательно влияют на окислительную стабильность, а также смазывающую способность. Кроме этого, они образуют лаковые отложения.

Непредельные углеводороды являются неустойчивыми, то есть, они меняют свои свойства со временем и при разной температуре. Поэтому от всех перечисленных веществ в базовых маслах нужно избавляться. И делается это разными способами.

В таблице 2 представлено сравнение характеристик базовых масел различных групп.

Таблица 2 – Сравнение характеристик базовых масел различных групп

Название вещества	Индекс вязкости	Поведение при низкой температуре	Стойкость к окислению
Н-парафин	Очень высокий, более 175	Плохое	Хорошая
Циклопарафины с одним кольцом и длинными цепями	Хороший, около 130	Среднее	Средняя
Поликонденсированные нафтены	Низкий, около 60	Среднее	Средняя
Моноароматические соединения с длинными цепями	Низкий, около 60	Среднее	Средняя
Полиароматические соединения	Очень низкий, близкий к нулю	Хорошее	Очень плохая
Изопарафины с сильно разветвленными цепями (ПАО)	Хороший, более 130	Отличное	Отличная

Алканы в отличие от нефтяных имеют прочные молекулярными связи, и как следствие устойчивость к реакциям с серой и щелочью, не образуют осадков и лаковых отложений, но поддаются окислению при 200°C [12].

Основная трудность состоит именно в синтезировании жидких углеводородов, но конечным процессом является гидрокрекинг, где происходит разделение длинных цепей углеводородов на разные фракции, одной из которых и является абсолютно прозрачное базовое масло без сульфатной золы. Чистота масла составляет 99,5%.

Коэффициент вязкости значительно выше, чем у произведенных из ПАО, их используют для изготовления топливосберегающих автомобильных масел с большим сроком эксплуатации. Такое масло обладает очень низкой летучестью и отличной стабильностью как при сильно высоких, так и при крайне низких температурах

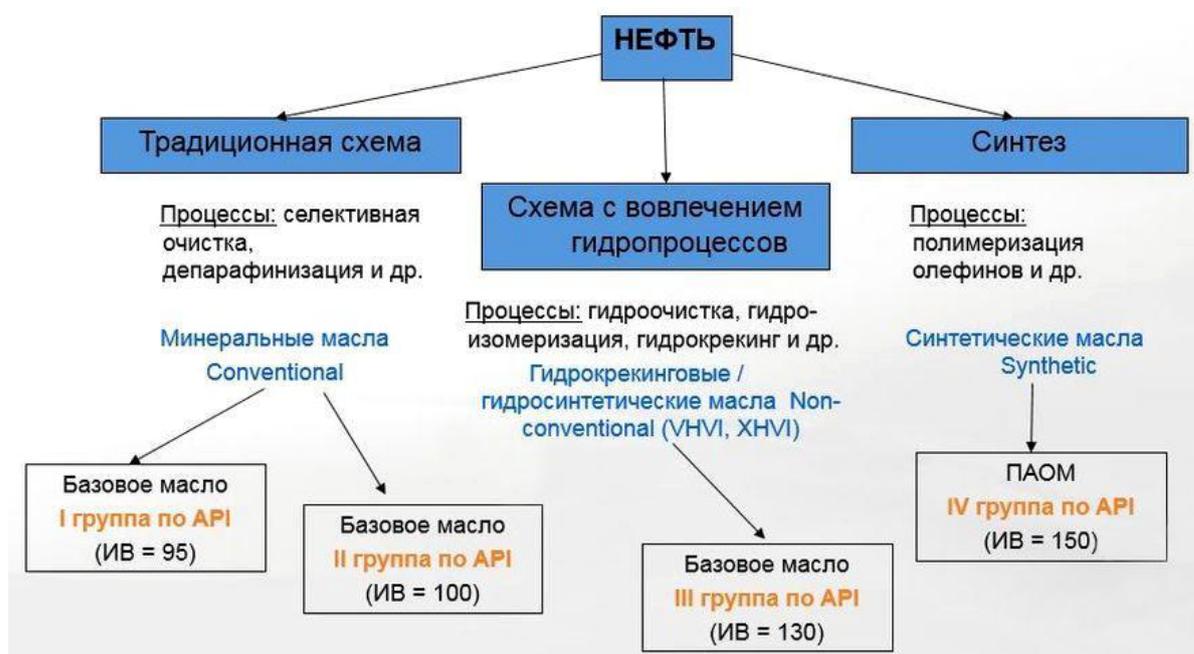


Рисунок 6 - Принципиальная схема производства базовых масел

Рассмотрим детальнее масла каждой перечисленной выше группы как они отличаются по технологии своего производства (рисунок 6).

Технология изготовления от группы к группе усложняется, а значит, и становится дороже. Именно поэтому минеральные масла имеют низкую цену, а ПАО-синтетические — дорого.

Интересно, что масла, относящиеся к пятой группе, имеют в своем составе поляризованные частицы, которые притягиваются к металлическим частям двигателя. Этим они обеспечивают самую лучшую защиту по сравнению с другими маслами. Кроме этого, они обладают очень хорошими моющими способностями, благодаря чему количество моющих присадок сводится к минимуму (или попросту исключается).

Масла на основе эстеров (пятая базовая группа) используются в авиации, ведь самолеты летают на высоте, где температура значительно ниже той, которая фиксируется даже на Крайнем Севере [13].

Современные технологии позволяют создавать полностью биологически разлагаемые эстеровые масла, поскольку упомянутые эстеры — экологически чистые продукты и легко разлагаются. Поэтому такие масла являются экологически чистыми. Однако из-за своей высокой стоимости автолюбители еще не скоро смогут пользоваться ими повсеместно.

Готовое моторное масло — это смесь базового масла и пакета присадок. Причем интересно, что в мире существует всего 5 компаний, производящие эти самые присадки — это Lubrizol, Ethyl, Infineum, Afton и Chevron. Все известные и не очень компании, занимающиеся выпуском собственных смазочных жидкостей, покупают присадки у них. Со временем их состав меняется, модифицируется, компании проводят исследования в химических областях, и стараются не только повысить эксплуатационные характеристики масел, но и сделать их более экологичными [9].

Что касается производителей базовых масел, то их на самом деле не так много, и в основном это крупные, известные на весь мир, компании, такие как ExxonMobil, занимающая первое место в мире по этому показателю (около 50% мирового объема базового масла четвертой группы, а также большая доля в 2,3 и 5 группах). Кроме нее в мире существует еще такие же

большие со своим исследовательским центром. Причем их производство разделяется по выше упомянутым пяти группам. Например, такие «киты», как ExxonMobil, Castrol и Shell не производят базовые масла первой группы. В таблице 3 и на рисунке 7 представлены данные по производителям масел.

Таблица 3 – Производители базовых масел по группам

Группа I	Группа II	Группа	Группа	Группа
«Лукойл» (Российская Федерация)	Exxon Mobil (ЕНС)	Petronas (ETRO)	ExxonMobil	Inolex
Total (Франция)	Chevron	ExxonMobil (VISOM)	Idemitsu Kosan Co	Exxon Mobil
Kuwait Petroleum (Кувейт)	Excell Paralubes	Neste Oil (Nexbase)	INEOS	DOW
Neste (Финляндия)	Ergon	Repsol YPF	Chemtura	BASF
SK (Южная Корея)	Motiva	Shell (Shell XHVI и GTL)	Chevron Phillips	Chemtura
Petronas (Малайзия)	Suncor Petro- Canada	British Petroleum (Burmah-Castrol)	-	INEOS
-	GS Caltex (Kixx LUBO)	Lukoil	-	Hatco
-	SK Lubricants	-	-	Nyco America
-	Petronas	-	-	Afton
-	H&R Chempharm GmbH	-	-	Croda
-	Eni	-	-	Synester
-	-	-	-	Motiva

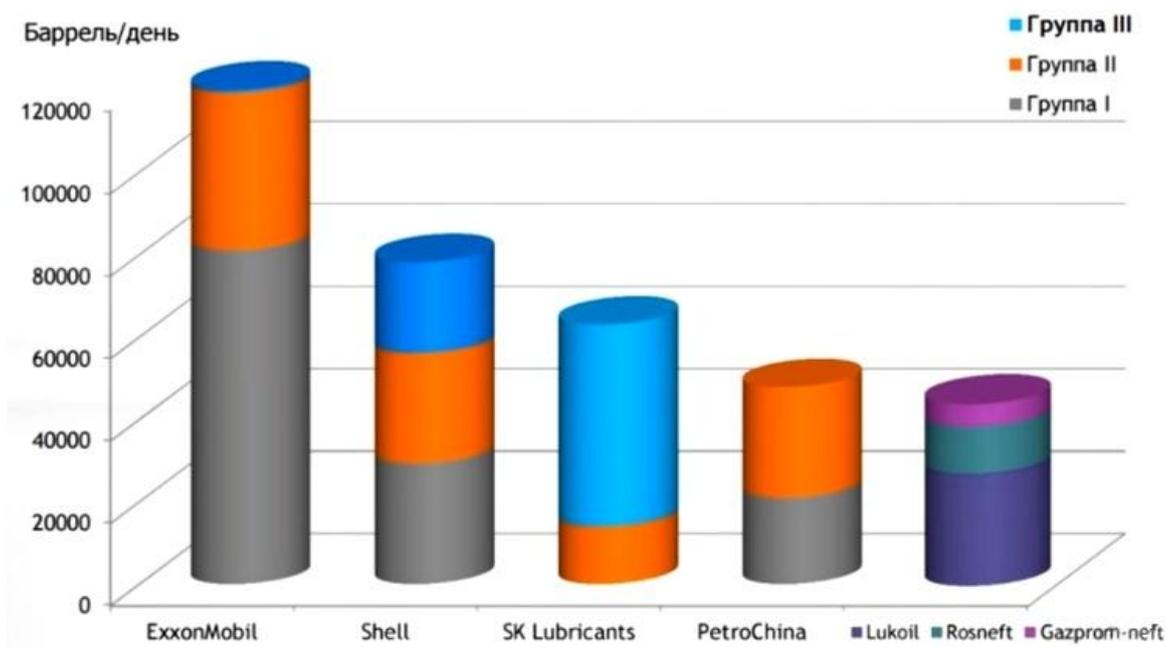


Рисунок 7 - Производственные мощности основных производителей масел

Перечисленные базовые масла изначально делятся по вязкости. И в каждой из групп имеются свои обозначения:

- Первая группа: SN-80, SN-150, SN-400, SN-500, SN-600, SN-650, SN-1200 и так далее.
- Вторая группа: 70N, 100N, 150N, 500N (хотя у разных производителей значение вязкости может отличаться).
- Третья группа: 60R, 100R, 150R, 220R, 600R (здесь также цифры могут отличаться в зависимости от производителя).

В зависимости от того, какими характеристиками должно обладать готовое автомобильное моторное масло, каждый производитель выбирает его состав и соотношение входящих в него веществ. Например, полусинтетическое масло, как правило, состоит из около 70% минерального базового масла (1 или 2 группы), или 30% гидрокрекингового синтетического (иногда 80% и 20%). Далее идет «игра» с присадками (они бывают антиокислительные, антипенные, антифрикционные, загущающие, дисперсионные, моющие, дисперенгующие, модификаторы трения), которые добавляют в получившуюся смесь. Присадки обычно низкого качества, поэтому и получившийся готовый продукт не отличается хорошими

характеристиками, и может быть использован в бюджетных и/или старых машинах.

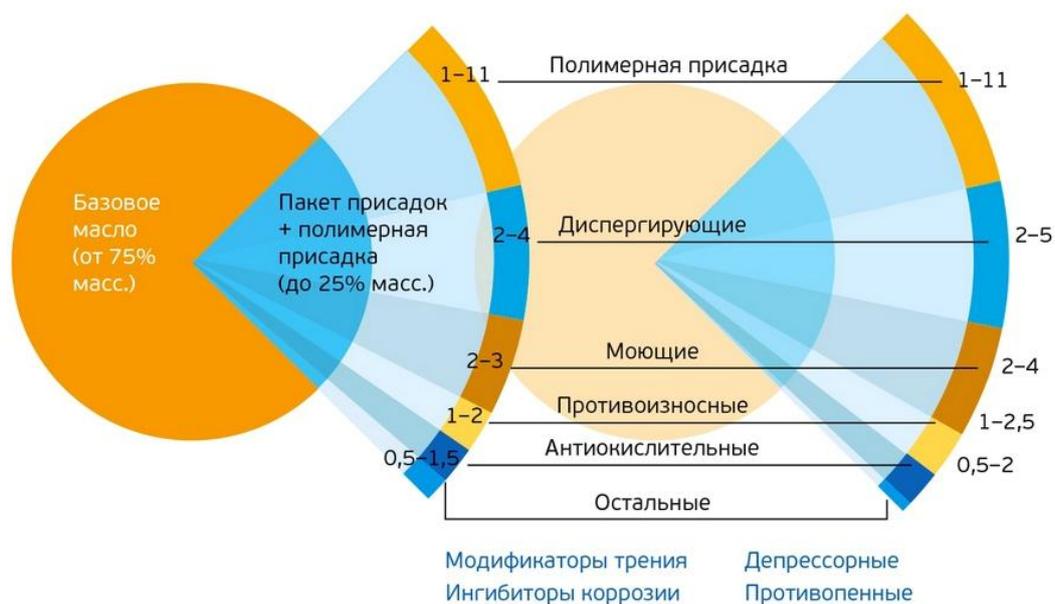


Рисунок 8 – Состав синтетических масел

Синтетические и полусинтетические составы на основе базовых масел 3 группы — самые распространенные в мире на сегодняшний день. Имеют английское обозначение Semi Syntetic. Технология их изготовления аналогична. Они состоят приблизительно из 80% базового масла (зачастую смешиваются разные группы базовых масел) и присадки. Иногда добавляют регуляторы вязкости [14].

Синтетические масла на основе базы 4 группы — это уже настоящая «синтетика» Full Syntetic, на основе полиальфаолефинов. Обладают очень высокими характеристиками и долгим сроком службы, однако они очень дорогие. Что касается редких эстеровых моторных масел, то они состоят из смеси базовых масел из 3 и 4 групп, и с добавлением эстерового компонента в объемном количестве от 5 до 30%.

Технология изготовления готового моторного масла — это не просто смешение отдельных компонентов, в частности, базы и присадок. На самом деле это смешение происходит поэтапно, при разных температурах, через разные промежутки времени. Поэтому для его производства нужно иметь информацию о технологии и соответствующее оборудование [15].

«В процессе работы в машинах и механизмах масло окисляется, загрязняется продуктами износа деталей, металлической стружкой, пылью. В него попадает вода, топливо. Загрязнение продолжается при сборе и транспортировке. Наиболее загрязненными и трудно поддающимся очистке оказываются масла, слитые из поршневых двигателей, содержащие продукты окисления и углеродистые частицы в мелкодисперсном состоянии. Эти частицы проходят через большинство фильтров, плохо отделяются в центробежных аппаратах. Коагуляции нерастворимых соединений препятствуют присутствующие в маслах остатки диспергирующих присадок.

Важным для выбора технологии переработки является состав и структура углеводородов отработанного масла. Состав углеводородной части отработанного масла близок к составу свежего, однако в отработанных маслах (с присадками и без присадок) содержится до 15-20 % растворимых продуктов окисления (смола, оксикислот), подлежащих окислению.

Переработку отработанных моторных масел затрудняют и содержащиеся в них присадки. Часть присадок, перешедших в нерастворимое состояние, а также часть присадок, адсорбированных на продуктах загрязнений, можно удалить из отработанного масла отстоем или фильтрацией с применением растворителя и коагулянтов. Растворимая часть присадок, которую часто называют «активной», может быть сохранена в масле при его вторичной переработке. Однако это требует сбора и переработки отработанных масел строго по сортам, разработки индивидуальной технологии для каждого сорта масла. Поэтому при массовом производстве регенерированного масла стабильного качества необходимо удаление всей присадки, в том числе остатков «активной» части» [16].

Отработанные масла образуются в различных источниках, к которым относятся:

- предприятия по переработке нефти и хранению нефтепродуктов (включая шламовые амбары, отстойники-ловушки), а также очистки резервуаров;

- металлообрабатывающие производства;
- автосервисы и другие предприятия сферы обслуживания;
- промышленные предприятия;
- сельскохозяйственные предприятия.
- энергетиков

Агрегатное состояние отработанного масла жидкое, средний компонентный состав [17]:

- нефтепродукты (углеводороды) – от 70,0 до 98,2%;
- присадки – от 0,0-12,0%;
- вода – до 2,0%;
- механические примеси – до 1,0%;

Исходя из данных исследователей [18], отработанные масла относятся к веществам третьего класса опасности. Анализ методом ИК-спектроскопии составов отработанных масел различных марок включая синтетические показывает, что потерявшее свои технологические свойства моторное масло по химическому составу содержит значительную долю веществ, входящих в состав товарного смазочного масла. Каких-либо кардинальных изменений структур веществ не происходит. Таким образом сохраняется потенциал отработанного масла как сырья вторичной производственного цикла.

1.2 Технологии переработки отработанных масел

К традиционным способам утилизации отработанных масел относятся:

1. Размещение на полигонах. В соответствии с законодательством отработанные масла в зависимости от состава могут приниматься в резервуары временного хранения на срок от полугода до трех в зависимости от состава. Как таковое захоронение запрещено. Поэтому размещение является промежуточным этапом для дальнейшего использования. Но данный способ оставляет возможность для злоупотребления пробелами в законодательстве. В рамках данной работы мы не уделим этому аспекту внимания.

2. Переработка и сжигание с целью получения энергии. Этот способ предусматривает удаление из состава отхода вредных частиц и воды. Далее его используют в качестве топлива. Ведь 1 литр переработанного отхода масла производит 40 МДж энергии.

3. Регенерация – самый предпочтительный для окружающей среды способ утилизации отработанного масла. Это такой вид обработки, при котором из отработанного масла удаляются все загрязнители. Результат регенерации используют для производства того же самого масла. Это позволяет продлить срок годности смазки до бесконечности. Такой способ помогает экономить сырье (для производства 1 л отличного моторного масла требуется 1,6 л отработанного), а также является экологически безопасным.

Регенерация моторных, гидравлических и промышленных отработанных масел может производиться разными методами. Среди них:

- физические – воздействие силовых полей, фильтрация через пористые перегородки, теплофизические и комбинированные технологии;

- физико-химические – экстракция, ионообменная очистка, коагуляция, сорбция;

- химические – обработка карбидами металлов, щелочами, кислотами, гидрогенизация.

Обычно технология регенерации включает комбинацию перечисленных методов в зависимости от требований к составу сырья и конечных продуктов.

В связи с неразвитостью промышленности переработки масел в нашей стране обратимся к европейскому опыту. Европейская регенерационная промышленность состоит из 28 заводов, обрабатывающих отработанное масло, и насчитывает около 1000-1200 наемных работников в сфере переработки и 2000-2500 работников в сфере сбора отработанного масла. 17 из этих заводов производят базовые масла. Отрасль имеет совокупную проектную мощность 1300000 тонн в год. Совокупное производство смазочного масла в размере 400000 тонн в год и производит 500000 тонн в

год других продуктов, включая топливо, асфальт, дизель, гудрон и пр. Суммарный ежегодный оборот составляет около 200-250 млн. евро в год. Регенерационная отрасль — важная часть европейского рынка производства ГСМ, занимающая 1/3 объема европейского рынка ГСМ (1,5-2 млн тонн ГСМ). Переработка отработанного масла играет важную роль в создании конкуренции основными производителям ГСМ, а также в сохранении работоспособности небольших независимых компаний, делающих ставку на вторичное использование масел. Европейская регенерационная промышленность получила серьезные инвестиции в размере около 250 млн евро для улучшения качества переработанных масел, повышения эффективности и сокращения влияния на окружающую среду. Старые системы больше не функционируют в Европе и переработанные масла по качеству сопоставимы с исходными. В отношении шести ключевых показателей экологической эффективности, регенерация приводит к снижению нагрузки на окружающую среду по сравнению с первичным производством, а также сжиганием. Помехи в развитии регенерации тесно связаны с поставками отработанного масла, которое часто используется в качестве дешевого топлива.

Регенерационные предприятия конкурируют за поставку отработанных масел с такими отраслями как цементная и известняковая промышленность, которые закупают отработку в качестве энергоресурсов. Это связано с низкой ценой отработанного масла в качестве топлива.

Экологическая эффективность регенерации часто сопоставляется со сжиганием в цементнообжигательных печах, как с другой альтернативой использования отработанного масла. Исследования показывают, что с точки зрения экологических индикаторов, регенерация оказывает более положительное влияние в перспективе. Если рассматривать вопрос о глобальном потеплении, то сжигание в цементнообжигательных печах более предпочтительно. Основная причина такого вывода заключается в замене использования угля и нефтяного кокса (которые имеют достаточно высокое

содержание углерода и низкую теплотворность) в качестве первичного топлива в печах. Тем не менее выбор топлива ограничивается не только техническими характеристиками, но и ценами на топливо на мировом рынке. В будущем может сложиться ситуация, когда другие виды топлива, используемые на цементных заводах (например, газ, при сжигании которого образуется сравнительно немного выбросов CO_2), будут также заменяться на отработку. В данном случае регенерация будет более предпочтительна с точки зрения глобального потепления [18].

Согласно исследованиям процесса сжигания отработанного масла в малогабаритных печах различных конструкций и производителей [19] можно привести следующие данные по полученным выбросам. Основная часть выбросов содержит характерные для всех процессов сжигания углеводородных топлив вещества такие как оксиды углерода, серы, азота, также присутствует сажа. Конкретный состав зависит от вида масла. Вместе с тем в продуктах горения содержатся аномальные количества крайне опасных токсинов. Были обнаружены полиароматические углеводороды (ПАУ), в том числе бензапирен (БП), полихлорированные бифенилы (ПХБ), полихлорированные дибензопарадиоксины(ПХДД), дибензофураны(ПХДФ).

«При сжигании минерального и синтетического масел содержание ПХДД и ПХДФ в газовых выбросах довольно велико. Оно составляет 1-4 нг/м³. Для сравнения укажем, что по нормам, принятым в Голландии, содержание ПХДД и ПХДФ в газовых выбросах мусоросжигательных печей не должно превышать 0,1 нг/м³. Следует отметить, что форсуночная печь DAB System дает несколько меньший выброс ПХДД и ПХДФ, чем печи с испарением топлива с открытой поверхностью, но не ниже названных норм. В странах ЕЭС нормы сжигания приняты едиными» [8]. Состав выбросов, обнаруженных в ходе эксперимента, приведён в таблицах 4 и 5, графы которых соответствуют следующим типам сжигающих устройств:

1 - печь фирмы Confoma Thermobile, модель AT-500 (Голландия); 2-4 - печь фирмы LENAN (США), модель Lanair-110, смесь различных масел,

минеральное масло CASTROL JTX3 15W40, синтетическое масло Mobile 1 SAE 5W40, соответственно графам 2,3,4; 5 - печь фирмы Confoma Thermobile, модель DAB System (Голландия).

Результаты данного эксперимента существенно отличаются от сертификационных показателей исследуемых печей тем, что концентрации выбросов, как оказалось, в десятки раз превышают нормы практически по всем показателям, допустимые в стране производителя [20].

Таблица 4 – Количество хлорсодержащих токсичных компонентов в выбросах при сжигании отработанного масла

Соединение	Малогобаритные печи (пг/м ³)				
	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5
№ пробы	1	2	3	4	5
Шифр	6	93	95	102	190
2,3,7,8-ТХДД	166,1	46,3	40,3	118,6	23,9
1,2,3,7,8-ПеХДД	327,8	961,7	87,6	750,7	207,2
1,2,3,4,7,8-ГкХДД	540,4	<20	148,4	105,3	254,1
1,2,3,6,7,8-ГкХДД	149,3	5725,1	1564,4	235,9	766,1
1,2,3,7,8,9-ГкХДД	327	3354,3	1348,3	<20	745,6
1,2,3,4,6,7,8-ГпХДД	5446,6	5373,3	6661,3	6315,5	4715,7
ОХДД	6079,1	6079	5929,4	10097,5	8755,3
2,3,7,8-ТХДФ	338,8	4	<20	109,1	235,4
1,2,3,7,8-ПеХДФ	146,8	746,1	210	395,9	323,3
2,3,4,7,8-ПеХДФ	507,5	1150,5	320,9	698,4	288,8
1,2,3,4,7,8-ГкХДФ	2152,3	1160,1	2634,3	8775,2	754,3
1,2,3,6,7,8,-ГкХДФ	682,3	10304,2	1387,5	4212,4	377
2,3,4,6,7,8,-ГкХДФ	625,5	3663,7	529,1	1681,3	387,4
1,2,3,7,8,9-ГкХДФ	176,3	1181,9	196,7	1593,8	127
1,2,3,4,6,7,8,-ГпХДФ	1753,8	4156	4516,2	7648,8	1821,4
1,2,3,4,7,8,9-ГпХДФ	162,2	95,2	<50	347,1	272,8
ОХДФ	2503,2	1801,3	1802,4	1680,4	2963,8
Сумма др. ТХДД	510,7	926,8	709,4	157,9	<25
Сумма др. ПеХДД	2382,5	4919,8	1133,4	1700,1	1100,5
Сумма др. ГкХДД	9009,8	19777,8	5805,9	65091,2	2959,2
Сумма др. ГпХДД	2849,6	3386,1	4405,6	6315,5	3139,9
Сумма др. ТХДФ	308,6	6447,5	180,7	50	1087,4
Сумма др. ПеХДФ	3602,5	8794,8	3246,8	3681,4	1640,9
Сумма др. ГкХДФ	577,4	3176	1928,3	22358,4	<30
Сумма др. ГпХДФ	305,3	713,3	1383,1	1504,4	781,6
ДЭ	1442	4112,2	1155,4	3031,4	811,4

Таблица 5 – Количество полиароматических токсичных компонентов в выбросах при сжигании отработанного масла

Соединение	Малогобаритные печи (пг/м ³)				
	1	2	3	4	5
№ пробы					
фенантрен	4486,4	8750	11294,1	21193	
антрацен	1659,7	75,7	1097,2	1268	131,9
флуорантен	15256,2	4231	7134,6	12476	109
пирн	8973,3	1827,6	4656,6	7853,2	
бенз(а)антрецен	1127,2	199,2	565,4	957,4	89,1
хризен	2198,3	283,1	889,5	1762	80,5
бенз(Ь)флоурантен	679,4	108	356,7	450,8	55,1
бенз(к)флоурантен	295,6	26,6	146,7	341,1	10,9
бенз(а)пирен	81	27,7	67,5	91,9	
бензо(г,н,і)пирулен	535,2	61,4	93,7	132,8	
индено(12,3-сd)пирен	805,6				

«Итак, что влияет на состав выбросов продуктов сгорания:

- исходный состав масел и примесей, их концентрации;
- состав материалов, соприкасающихся с маслом на всех стадиях его использования, с которыми масло могло войти в контакт, смешиваться и образовать химическое соединение (тара хранения, перелива и перевозки, материал оборудования его производства, эксплуатации, переработки и утилизации, и пр.);
- технологичность процессов переработки и утилизации (свойства процессов химизации, горения, катализа, массообмена, перемешивания, температуры, давления, влажность, конструкции аппаратов, наличие электромагнитных полей, гравитационные условия, присутствие вирусов и микроорганизмов, и пр.);
- наличие циклов предварительной очистки и подготовки отработанного масла к утилизации, технологичность этих процессов» [21].

1.3 Регенерация моторных топлив более подробно сам принцип повторного использования

Как отмечалось выше, основное экологическое влияние переработки отработанного масла заключается в снижении первичного производства ГСМ.

Регенерация положительно влияет на 6 важнейших индикаторов:

- «- истощение ресурсов,
- парниковый эффект,
- закисление среды,
- нутрификация (избыточное накопление биогенных веществ, которое может привести к нарушению биоразнообразия почвы и воды),
- потенциал канцерогенного риска и выброс мелкодисперсных частиц.

Более того, с растущим использованием синтетических масел нагрузка на экологию в связи с регенерацией по сравнению с первичным производством будет снижаться».

Из уровня техники известны методы регенерации отработанных смазочных материалов - кислотная очистка, вакуумная перегонка, дистилляция при повышенной температуре, демееталлизация, гидрогенизация, селективная очистка, термическая деасфальтизация, мембранная фильтрация, выпаривание, термический крекинг, молекулярная перегонка. При регенерации отработанных смазочных материалов часто не удается их полностью очистить, применяя какой-либо один из перечисленных методов. Поэтому для восстановления качества смазочных материалов используют различные комбинации нескольких методов очистки или загрязненные отработанные смазочные материалы на нефтеперерабатывающих заводах смешивают с нефтью и тяжелыми нефтяными фракциями, или в смеси со своими ловушечными продуктами используют как добавку к топочным мазутам [23].

Перечисленные способы помимо достоинств не лишены ряда недостатков:

- Использование смеси отработанных смазочных материалов как компонентов котельно-печного топлива запрещено Техническим регламентом Таможенного союза (ТР ТС 030/2012) «О требованиях к смазочным материалам, маслам и специальным жидкостям», утвержденным Постановлением Правительства РФ №59 от 20.07.2012.

- Существенная экологическая опасность при сжигании и утилизации отходов от регенерации отработанных смазочных материалов. Отработанные смазочные материалы нерастворимы, химически устойчивы, содержат токсичные химические соединения, тяжелые металлы и представляют собой сложные многокомпонентные смеси, включающие моторные, трансмиссионные, индустриальные и другие масла, содержащие в своем составе различные присадки или пакеты присадок.

- Устаревшие подходы и технологии, при которых очищенные смазочные материалы имеют невысокое качество и не обеспечивают современные потребительские, экологические свойства нефтепродуктов.

- Разнообразие способов регенерации отработанных смазочных материалов в большинстве случаев не ориентировано на регенерацию смазочных материалов различных групп и не предусматривает возможности утилизации отходов производства.

- Высокие производственные затраты и, как следствие, высокая стоимость очищенного базового по сравнению со свежим, а также недостаточное удаление канцерогенных полициклических ароматических углеводородов. Эксплуатационные осложнения при вовлечении очищенных базовых масел в состав моторных и других смазочных материалов.

Из патента №2123026 (RU, МПК⁶ C10G 9/00, C10G 11/00, опубл. 10.12.1998) известен способ переработки тяжелых нефтяных фракций (вакуумный газойль нефти) с содержанием серы 1,34 мас. %, плотностью 0,89 г/см³, вязкостью 28,4 сСт, имеющий следующий состав (мас. %):

предельные углеводороды 50,9; арены 48,1; гудрон, включающий смешение исходного сырья с добавкой, полученной путем обработки нефтепродуктов озонсодержащим газом, нагревание и последующее разделение продуктов на фракции.

Нефтепродукты для получения добавки содержат не менее 0,65% серосодержащих соединений в пересчете на серу и не менее 3,5% полиареновых соединений. Смешение добавки с исходным сырьем производят из расчета содержания 0,5-13 г поглощенного добавкой озона на 1 кг получаемой смеси. Обработку нефтепродуктов озонсодержащим газом ведут преимущественно при 20-60°C до насыщения взятого количества нефтепродуктов озоном. Для получения добавки можно использовать нефтепродукты, являющиеся исходным сырьем для переработки.

Данное изобретение позволяет экономично перерабатывать тяжелое нефтяное сырье, выход (67,9-69,9%) светлых фракций при каталитическом крекинге, коксообразование (выход 0,23%), дает возможность вести термический крекинг при более низких температуре и давлении.

Недостатками известного способа является необходимость использования термической переработки окисленного сырья и применение катализатора.

Общие признаки: нагревание нефтяного сырья и его окисление.

В патенте №2184761 (RU, МПК⁷ C10G 27/14, C10G 9/00, опубл. 10.07.2002) описан способ переработки тяжелых нефтяных остатков путем обработки исходного сырья озонсодержащим газом до поглощения озона в количестве 0,05-0,5 масс. % с последующим термическим крекингом при температуре 400-430°C, давлении 0,5-3,0 МПа и объемной скорости в реакторе термического крекинга 1-2 ч⁻¹.

Способ позволяет получать целевые продукты, подвергая переработке прямогонный мазут, при этом выход светлых

нефтепродуктов составляет 70% при коксообразовании 0,2%. При переработке нефтяного гудрона выход светлых продуктов составляет 65% при коксообразовании 0,25%.

Недостатки заключаются в небольшом выходе целевых продуктов и в необходимости использования термического крекинга, за счет чего получают технический результат.

Общим признаком является обработка окислителем.

Из (GB 1023528, 23.03.1966) известен способ переработки тяжелых нефтяных остатков путем их предварительного окисления при 20-200°C в присутствии кислорода до содержания кислот 0,01-2 вес. % или содержания асфальтенов 0,01-4 вес. % в течение 2-200 ч. Затем нефтепродукт нагревают до 370-540°C при давлении 7-20 ати.

Недостатком известного способа является повторная высокотемпературная обработка перерабатываемого сырья и значительная продолжительность окисления [24].

Общими признаками является нагревание нефтяных остатков, обработка окислителем.

Известен (заявка РСТ WO 93/19139) способ переработки тяжелого сырья, согласно которому часть исходного тяжелого нефтяного сырья и/или сырья, отличного по составу от исходного, подвергают модификации путем обработки воздухом при температуре 200-300°C и массовом соотношении воздух: сырье, равном соответственно 0,2:(0,6-1). После отделения и удаления газовой фазы жидкий продукт подвергают вакуумной перегонке с выделением дистиллята, выкипающего до температуры 540°C. Затем дистиллят смешивают с исходным нефтяным сырьем до достижения концентрации добавки 2,0-25 масс. %.

Способ позволяет увеличить выход светлых нефтепродуктов, не уменьшая продолжительность эксплуатации катализатора.

Его недостатком является необходимость проведения двухстадийного процесса получения активирующей добавки с

использованием более высокой температуры на первой стадии и вакуумной дистилляции оксиданта - на второй.

Общими признаками является нагревание нефтяных остатков и обработка окислителем - воздухом.

Из патента №2237700 (RU, МПК⁷ C10G 9/00, C10G 55/04, опубл. 10.10.2004) известен способ переработки тяжелых нефтяных остатков, который включает предварительную обработку всего исходного сырья или его части (предпочтительно 10-80 мас. %) атмосферным воздухом при температуре 50-250°C, давлении 0,5-1 МПа при объемной скорости подачи воздуха 0,1-10 ч⁻¹. Последующий термокрекинг полученного продукта ведут предпочтительно при температуре 300-450°C, давлении 0,1-5 МПа и объемной скорости 0,5-2 ч⁻¹. В качестве исходного тяжелого нефтяного сырья можно использовать любые нефтяные остатки различного происхождения, отработанные масла, нефтешламы и т.д.

Способ позволяет получать значительные количества (75 мас. %) светлых нефтепродуктов (бензиновых и дизельных фракций) при коксообразовании 0,15%.

Недостатки заключаются в том, что для достижения технического результата необходимо применение термокрекинга.

Общими признаками является нагревание нефтяных остатков и обработка окислителем - атмосферным воздухом.

В патенте №2288946 (RU, C10M 175/02, опубл. 10.12.2006) описан способ переработки отработанных масел экстракцией растворителями. Очистке подвергают отработанные нефтяные масла для повторного использования их в качестве базовых смазочных масел. Сущность: после экстракции и удаления алифатического растворителя проводят следующие стадии: а) непрерывное однократное испарение при атмосферном или близком к атмосферному давлении с целью отделения легких углеводородных фракций в присутствии небольших количеств основного соединения или восстанавливающего агента, или смеси того и

другого, б) непрерывную перегонку на фракционирующей колонне донной жидкости, получаемой на стадии (а), при умеренных вакууме и температурах в присутствии основного соединения или восстанавливающего агента, или смеси того и другого с применением рециркуляции донного продукта колонны в сырье, отделение в виде боковых экстрактивных потоков вакуумного газойля или веретенного масла и базовых масел, а также котельного топлива или асфальтового компонента со дна колонны.

Технический результат - улучшение цвета (1,5-3,0 по методу ASTM D 500) и снижение кислотности (0,1 мг КОН/г). Недостатки: для достижения технического результата необходимо использование дополнительных реагентов, вакуума и многостадийного осуществления способа. Общими признаками является нагревание, экстракция растворителями, применение рециркуляции продукта в сырье.

Из патента 969169 (SU, C10M 11/00, опубл. 23.10.1982) известен способ переработки «отработанных масел, включающий следующие стадии: нагревание масла для удаления легких углеводородных фракций и воды, экстракции масла насыщенными углеводородными растворителями, например пропаном, вакуумная разгонка с фракционированием и гидроочистка. Причем тяжелую фракцию подвергают термической обработке и повторно экстрагируют растворителем». Рабочие условия первичной экстракции варьируют в следующих пределах: температура экстракции от 30°C до критической температуры пропана, давление от 25 до 50 кг/см², отношение растворителя к маслу - в пределах от 5 до 20 объемов пропана. Остаточный продукт, полученный в этапе второй экстракции пропаном, рециркулируют в колонну первой экстракции. При осуществлении второго этапа экстракции допустимы различные температуры процесса и различные отношения растворителя к маслу. Технический результат

заключается в улучшении качества масел и в повышении экономичности процесса.

Аналог имеет следующие недостатки. При использовании для экстракции нормальных парафиновых углеводородов (однократная экстракция) очищенное масло содержит довольно значительное количество нежелательных примесей. Необходимость стадии гидроочистки усложняет и удорожает технологический процесс. Выбросы углеводородных газов в атмосферу приводят к экологическим проблемам.

Общими признаками являются: нагревание масел, отгонка воды и легких углеводородных фракций из регенерируемого масла, экстракция последнего ненасыщенным углеводородным растворителем, с рециркуляцией частично очищенного масла.

Из патента №2211240 (RU, МПК⁷ C10M 175/00, опубл. 27.08.2003) известен способ переработки отработанных смазочных материалов - моторных масел, который включает следующие стадии: из отработанного моторного масла удаляют механические примеси, «нагревают масло до температуры 100-120°C, отгоняют воду и легкие углеводородные фракции в вакуумной колонне, удаляют газойлевые фракции в насадочном эвапаторе при температуре 200-250°C и остаточном давлении от 10 до 50 мм рт. ст. Предварительно очищенное масло направляют на стадию экстракции селективным растворителем, которым может быть пропан. Процесс экстракции (деасфальтизации) при использовании пропана ведут в противоточной массообменной колонке при температуре 50-93°C, давлении 45 ати и объемном отношении растворителя и масла (5-15):1».

Показано, что перед экстракцией удаляют газойлевые фракции, а часть смолисто-асфальтеновых соединений, полученных на стадии экстракции, рециркулируют в экстракционный аппарат для создания внутреннего орошения.

«Технический результат: полученный деасфальтизат после отпарки растворителя имеет показатели на уровне товарных моторных масел: температура вспышки более 220°C, температура застывания ниже минус 32°C, индекс вязкости более 115, вязкость при 100°C 7-9 сСт, цвет 5-6 ед. ЦНТ. Значения показателей: щелочное число, содержание активных элементов Ca, Zn, P ниже требований на моторные масла, что связано с удалением части присадок и их фрагментов при экстракции. Для доведения качества деасфальтизата до уровня требований на моторные масла требуется значительно меньше присадок, чем при использовании регенерированных базовых масел».

Недостатками известного способа является: много стадийность и высокая материалоемкость технологического процесса, использование вакуума, большое количество технологического оборудования, более высокий расход растворителя, значительные затраты материальных средств.

Задача технологии переработки смазочных масел, которая должна быть разработана в рамках данной работы заключается в расширении ассортимента способов «переработки отработанных смазочных материалов различных групп, с получением нефтепродуктов, имеющих практическую значимость, при одновременном решении экологических проблем (безотходная технология), возникающих в процессе утилизации отработанных продуктов».

Технология регенерации масел должна обладать следующими качественными характеристиками:

- в «обеспечении достаточного уровня (соответствующего нормативам технических условий для базовой основы) очистки отработанных смазочных материалов от металлосодержащих производных, содержащихся в присадках, обессмоливания и деасфальтизации, при одновременном получении компонентов нефтяных битумов;

- в расширении ресурсной базы процессов вторичной переработки нефти - получение компонентов сырья установок каталитического крекинга и замедленного коксования;
- в сокращении вредных выбросов и сбросов в окружающую среду (предотвращение загрязнения окружающей среды);
- в удешевлении и упрощении процесса регенерации отработанных смазочных материалов».

2 Разработка технологии и аппаратного оформления процесса переработки отработанных автомобильных масел

2.1 Образование отработанного масла как отхода на ПАО «КуйбышевАзот»

Общий годовой объем потребления смазочных масел ПАО «КуйбышевАзот» составляет порядка 100 тонн в год. Соответственно тот же объем теряет за этот срок свои эксплуатационные свойства и должен быть каким-то образом утилизирован или переработан. С экономической точки зрения наиболее выгодным сырьем для переработки являются отработанные синтетические масла. В их составе содержится значительный объем базовых масел III, IV, V. Эти масла и будут целевым сырьем для разрабатываемой технологии.

ПАО «КуйбышевАзот» закупает следующие марки синтетических и полусинтетических масел: Масло Shell Helix HX 7 10W40, MOBIL SUPER 3000 10w40, Shell CORENA S4 R46, Лукойл люкс 15w40, SHELL TELLUS M46, SOLEST 220, TEXACO TEXATXERM 46, MOBIL RARUS 827, Shell OMALA 220, ADDINOL VDL 46 S, ADDINOL VDL 46 S, SOLEST 120, MOBILGLYGOIL 460, Масло Shell Spirax S4 TXM, SHELL RUMULA R5 E 10W40, М-о MOBIL SUPER 2000 10w40, THK Rewoluk D2 10W40, TransGipoid Super SAE 75w90, G-SPECIAL UTTO 10W30 Shell OMALA S4 GX460. Общий объем потребления этих марок порядка 30 тонн в год.

Таблица 6 – Данные масла имеют следующий усредненный состав

Компоненты	Состав, %масс
1	2
Масла базовые	88,86
Вода	2,0
Механическая примесь	1,0
Органические продукты деструкции	5,0
Окиси и сульфаты Ва, Са, Mg	2,8

Продолжение таблицы 6

1	2
Цинк	0,12
Фосфор	0,09
Барий	0,13
Итого	100

Из данных видно, что содержание продуктов деструкции масел и присадок в отработанном масле около 11%. Остальная часть может быть переработана с получение высокоценных продуктов.

При разработке технологии стоит учитывать то что она не привязана к конкретному производству и может применяться для переработки аналогичных отработанных масел других поставщиков. То есть привязка к ПАО «КуйбышевАзот» необходима лишь для отработки технологии и далее подразделение реализующее данную технологию может выйти на рынок услуг по утилизации отработанных масел в качестве самостоятельного участника.

2.2 Описание предлагаемого технологического принципа переработки

Предлагаемая технология переработки отработанных масел включает в себя следующие единицы оборудования:

1. НШ - насос шестеренный;
2. система фильтрации 3М™ High Flow;
3. паровой подогреватель ПП;
4. РПИ – роторно-пленочный испаритель;
5. конденсатор;
6. емкость для сбора отдельных фракций;
7. вакуумный насос:

Схема установки приедена на рисунке 9.

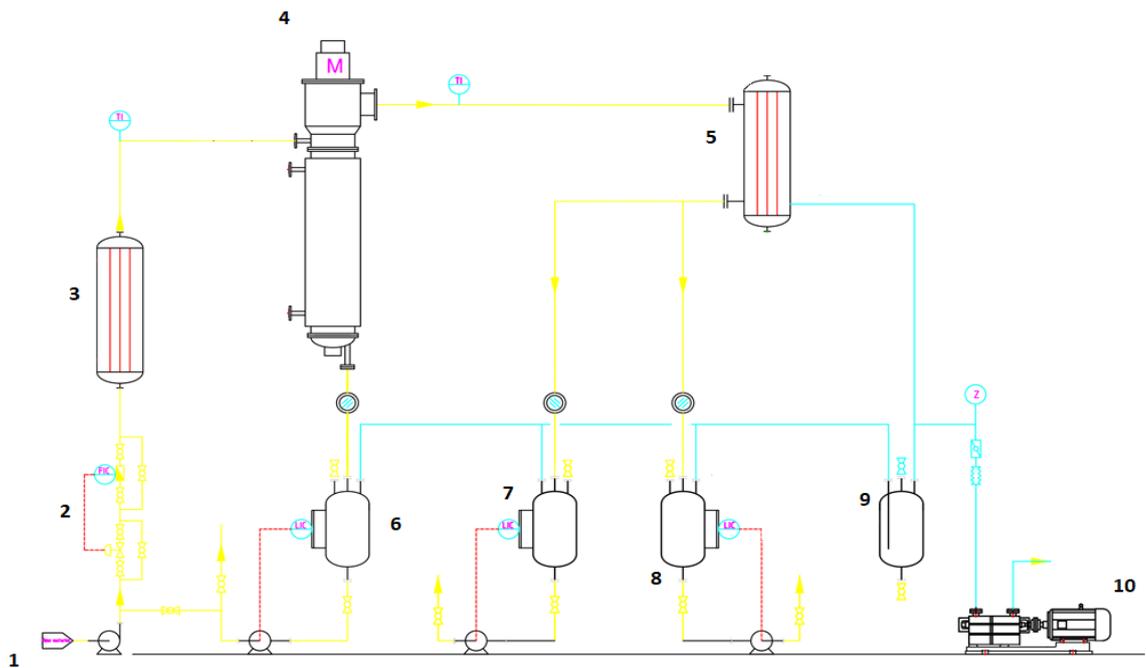


Рисунок 9 – Схема установки для регенерации отработанного масла

Отстоявшееся отработанное масло в отстойнике от механических примесей, воды, закачивается через шестеренный насос (НШ) (рисунок 10).



Рисунок 10 – Насос шестереночный (НШ)

Показатели назначения насоса по параметрам в номинальном режиме, вне зависимости от исполнения по материалам, соответствуют указанным в таблице 7.

Таблица 7 – Технические данные насоса в номинальном режиме

Наименование показателя	Норма при перекачивании жидкостей с кинематической вязкостью м ² /с (°ВУ)
	0,37·10 ⁻⁴ ...2,5 *10 ⁻⁴ (5,1...300)
	НМШФ0, 0,8-25-0,63/25
Подача, м ³ /ч (л/с), не менее	0,63 (0,18)
Давление, кгс/см ² (МПа)	25 (2,5)
Максимально допустимое давление на входе, кгс/см ² (МПа)	37,5 (3,75)
Допускаемая вакуумметрическая высота всасывания, м	5
Внешняя утечка через уплотнение, л/ч, не более	0,01
Частота вращения, об/мин	1450
Мощность, кВт, не более	0,85
КПД насоса в агрегате, %	71,5
Маркировка взрывозащиты насоса (при наличии)	Ex II Gb c k T4 X; Ex III Db c T100°C X IP66

Насос перекачивает масло через трубчатый фильтр ЗМТМ High Flow фирмы «ФОРМОС ТК» (рисунок 11). Для удаления из отработанного масла смолистых соединений и механических примесей путем пропуска отработанного масла через пневмоформованное микроволокно фильтра. В качестве фильтрующего элемента используется радиально-гофрированная структура рис. 4 для более эффективной отчистки отработанного масла

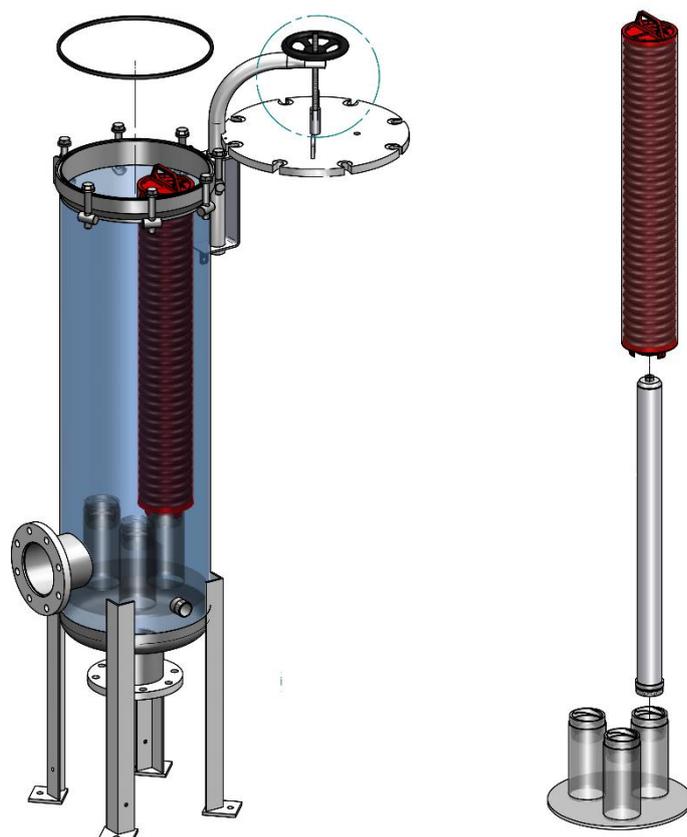


Рисунок 11 – Фильтр 3MTM High Flow фирмы «ФОРМОС ТК»

Таблица 8 – Технические данные фильтрующего элемента 3MTM High Flow.

Параметры	Длина элемента (номинальная) 60 дюймов
Тонкость фильтрации (мкм)	1,2,3,5,10,15,25, 40, и 70
Зависимость расхода от перепада давления	См. рисунок 13
Диаметр фильтра (см/дюйм)	16,5/6,5
Длина фильтра (см/дюйм)	152,4/60

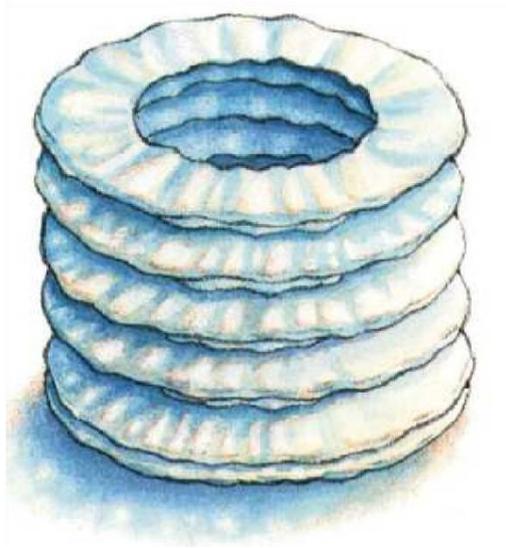


Рисунок 12 – Фильтрующий элемент с радиально-гофрированной структурой

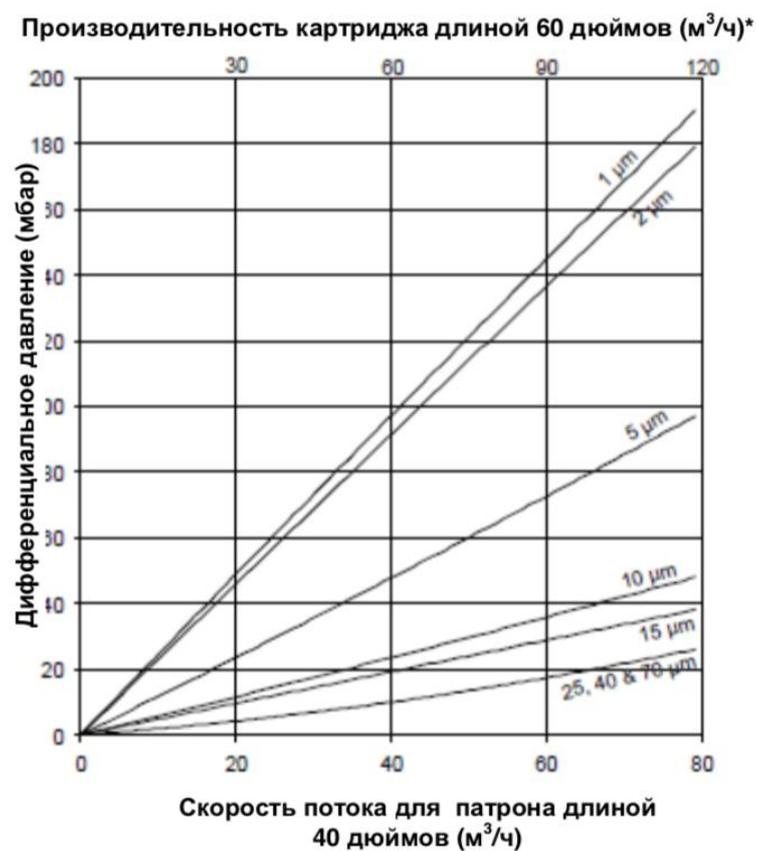


Рисунок 13 – Зависимость расхода от перепада давления

Отфильтрованное отработанное масло поступает в кожухотрубчатый подогреватель, где нагревается до 70°C .

После нагрева отработанное масло поступает в роторно-пленочный испаритель РПИ (рисунок 6). Составляющие РПИ можно разделить на два агрегата: 1) нагретый корпус 2) ротор. Отработанное масло поступает в верхнюю часть аппарата и равномерно стекает по внутренней поверхности аппарата в виде пленки под действием силы тяжести. Лопатки ротора глессируют по пленке. Корпус аппарата нагревается паром до температуры испарения продукта. Лопасти ротора создают вихревые потоки сопутствующие ускорению в нем массообменные процессы, обеспечивая разделения жидкой и паровой фракции при испарении. При этом максимально удаляются отложения на внутренней поверхности аппарата. Легкая фракция поднимается вверх с противотоком и отправляется на конденсацию для дальнейшей обработки, жидкая (отход) стекает вниз.

Таблица 9 – Технические данные роторно-пленочного испарителя

Рабочие параметры	Рабочий диапазон
Количество исходного продукта, кг/час	20-100.000
Эффективность выпаривания, кг/час	до 40.000
Температура нагрева, ° С	до 380
Нагрев	насыщенный пар или жидкий теплоноситель
Давление в рабочей камере, бар (избыточное)	-1 до 30
Производительность продукта с вязкостью до 10 мПа.с	50-1.000 кг/м ³
Вязкость продукта при рабочей температуре мПа.с	до 70.000
Время обработки, мин	до 1:50
Диапазон нагрузки, %	20-100

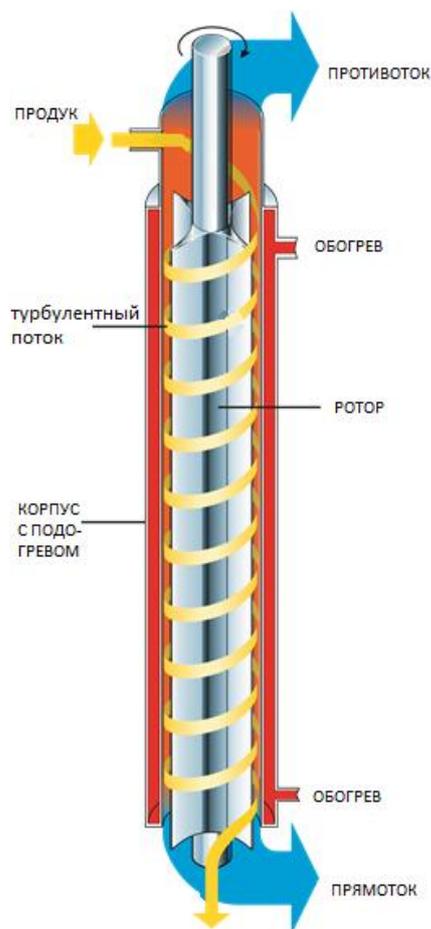


Рисунок 14 – Роторно-пленочный испаритель

Легкая фракция в виде пара поступает в конденсатор (рисунок 14), через горловину попадает на холодную поверхность труб, конденсируется стекает вниз и скапливается в сборнике. После сборника первая фракция отправляется на второй круг регенерации для получения второй (средней) фракции. После получения второй фракции оно отправляется на третий круг регенерации для получения третьей (тяжелой) фракции.

Таблица 10 – Технические данные кожухотрубных конденсаторов

Наименование параметров		Назначение параметров для аппарата
1	2	3
Температура теплообменивающих сред, °С ±5 °С	в кожухе	от минус 20°С до плюс 300°С
	в трубах	от минус 20°С до плюс 60°С

Продолжение таблицы 10

1	2	3
Диаметр кожуха, мм	наружный (при изготовлении из труб)	630
	внутренний (при изготовлении из листа)	600; 800; 1000; 1200; 1400
Поверхность теплообмена м ²		45-716
Условное давление Мпа в кожухе для аппаратов диаметром, мм	600 (630), 800	1,0; 1,6
	1000, 1200, 1400	0,6; 1,0; 1,6
Условное давление Мпа в трубах для аппаратов диаметром, мм	600 (630), 800, 1000, 1200, 1400	0,6
Длина теплообменных труб, мм для аппаратов диаметром, мм	600 (630), 800, 1000	3000; 4000; 6000
	1200	4000; 6000
	1400	6000
Наружный диаметр и толщина стенки теплообменных труб, мм		25*2
Число ходов по трубам для аппаратов диаметром, мм	600 (630), 800, 1000, 1200, 1400	2; 4; 6
Масса аппаратов, кг		1720/ 17630

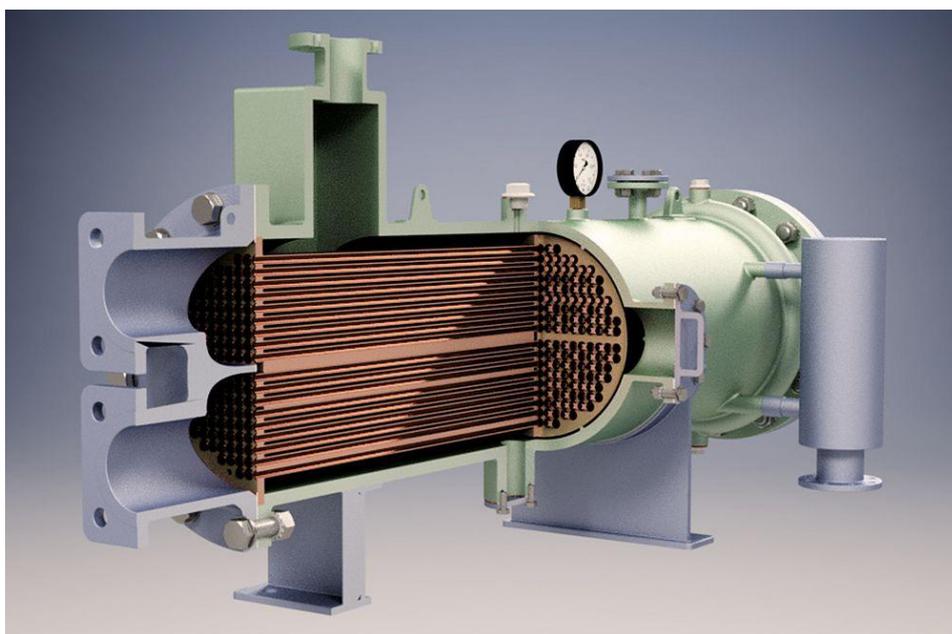


Рисунок 15 – Конденсатор парообразных продуктов

Весь процесс осуществляется под действием вакуумной установки (рисунок 16). Использование вакуумного насоса понижает давление в собственной системе, это приводит к уменьшению температуры кипения компонента. Благодаря вакууму разделения продукта происходит более безопасно и может осуществляться при низких температурах.

Технические параметры:

производительность: от 105 до 720 м³ / ч

предельный вакуум: 0,05 мбар (абс)

Таблица 11 – Технические данные

		150(30)	330(30)	400(20)	800(20)
1	2	3	4	5	6
Производительность	м ³ /ч	105	245	325	650
Вакуум	мбар (абс)	0,3	0,3	0,05	0,05
Напряжение	3 □	230±/400V±10%			
Мощность	кВт	4,0	7,5	15	18,5
Обороты	мин ⁻¹	2850			
Уровень шума	дБ(А)	#	79	80	81
Вес	Кг	320	630	610	810

Продолжение таблицы 11

1	2	3	4	5	6
Кол-во масла в зубчатой передаче	л	1,3	1,6	2,0	4,0
Потребление охлаждающей воды	л/ч	240	480	660	1200



Рисунок 16 – Вакуумный насос

Данная технология позволяет провести процесс утилизации отработанного масла с получением ценных конечных продуктов. В результате из масла выделяются продукты деструкции в твердой форме на фильтровальном оборудовании. Жидкие компоненты тонко разделяются на роторно-пленочном испарителе. В итоге можно выделить отдельные группы базовых масел с достаточной четкостью.

3 Технологические расчеты

3.1 Материальный баланс процесса

Материальный баланс процесс переработки отработанных масел можно представить в следующем:

$$G_1 = G_2 + G_3 + G_4 + G_5 \quad (3.1),$$

где G_1 – расход сырьевого потока отработанного масла, поступающего на переработку, кг/ч;

G_2 – расход твердых продуктов отделенных в блоке фильтрации, кг/ч;

G_3 – расход жидких органических продуктов деструкции, кг/ч;

G_4 – расход воды, кг/ч;

G_5 – расход целевого компонента;

Исходя из данных по образованию сырьевого отработанного масла на ПАО «Куйбышевазот» можно принять производительность 1 тонн в сутки.

Таблицы 12 – Результаты расчета

Наименование компонента	Расходы потоков покомпоненто в соответствии с материальным балансом, кг/сутки				
	1	2	3	4	5
Масла базовые	888,6	3,5	12,6	1,2	871,3
Вода	20	-	1	19	-
Механическая примесь	10	10	-	-	-
Органические продукты деструкции	50	-	43	1	6
Окиси и сульфаты Ва, Са, Mg	28	28	-	-	-
Цинк	1,2	1,2	-	-	-
Фосфор	0,9	0,9	-	-	-
Барий	1,3	1,3	-	-	-
Итого	1000	44,9	55,6	21,2	877,3

3.2 Расчет роторно-пленочного испарителя

Исходя из того, что процесс периодический и стадия выпаривания продолжается порядка шести часов а их предусмотрено две, примем производительность основного аппарата тонко пленочного испарителя:

$$G_{\text{исп}} = \frac{G_{\text{сут}}}{t_{\text{исп}} * 0,5}, \quad (3.1)$$

где $G_{\text{исп}}$ – расход испаряемого вещества, $G_{\text{сут}}$ - расход испаряемого вещества за сутки, $t_{\text{исп}} * 0,5$ – температура испарения

$$G_{\text{исп}} = \frac{954,1}{12} = 79,5 \text{ кг/ч}$$

Силы, действующие на единицу объёма жидкости:

$$f = \rho n^2 R, \quad (3.2)$$

где f -центробежная сила, ρ -плотность, n -частота, R -радиус аппарата

$$f_g = \rho g \quad (3.3)$$

где f_g -гравитационная сила, ρ –плотность, g -гравитация - образуют угол θ с вертикалью, который имеет вид числа Фруда

$$\theta = t_{\text{ап}}^{-1} n^2 \frac{R}{g} \quad (3.4)$$

где, θ -вертикаль, $t_{\text{ап}}^{-1} n^2$ – число Фруда.

Теперь, когда представлены соответствующие величины всех действующих сил, а именно: сил вязкости, центробежных сил, гравитационных сил, можно составить критериальное уравнение

$$Nu = A(Re)^a (Fr)^2 (Pr)^2 \quad (3.5)$$

где,

Приводя экспериментальные исследования на двух разных по размерам пленочных испарителях со скребковыми мешалками и электрическими нагревателями, Ботт и Азаори установили зависимость безразмерных величин, входящих в уравнение (3.6) для диапазона загрузки от 50 до 150

кг/ч при разных частотах вращения от 300 до 1600 1/мин. Авторы рекомендуют определить коэффициент теплоотдачи по уравнению (1) в зависимости от

Таблица 13 – Значения a, b, c

Режим	Re	a	b	c
Турбулентный	100-1000	0,076	0,36	1,02
Ламинарный	<100	0,58	0,09	0,57

Функциональная зависимость экспериментальных значений «коэффициента теплоотдачи от других параметров

$$a_2 = n^{0,56} \frac{\mu^{0,11}}{\lambda^{0,02}} \quad (3.6)$$

где, a_2 – коэффициент теплопередачи,

μ - динамическая вязкость смеси, Па*с

λ -теплопроводность смеси, Вт/м

Из уравнения (3.7) следует, что коэффициент теплоотдачи a_2 зависит главным образом от числа оборотов скребковой мешалки $n^{0,56}$ и теплопроводности жидкостной пленки для ламинированной области $Re_{вр} < 100$. Исследования функциональной зависимости коэффициента теплопередачи $a_{эксп}$ от частоты вращения, теплопроводности λ и вязкости жидкости μ показали, что значение a_2 имеет вид для режимов переходной зоны

$$a_2 = n^{0,18} \frac{\lambda^{0,13}}{\mu^{0,13}} \quad (3.7)$$

Сопоставляя уравнения (3.7) и (3.8), можно заметить, что коэффициент вязкости оказывает небольшое влияние на значения коэффициента теплопередачи. В то же время обнаруживается сильная зависимость a от λ . Это указывает на то, что механизм теплопередачи больше зависит от теплопроводности через неподвижную пленку, прилегающую к стенке испарителя. В обоих случаях коэффициент теплоотдачи пропорционален числам оборотов скребковой мешалки. Значение коэффициента теплоотдачи возрастает по мере повышения нагрузки по жидкости. Зависимость

коэффициента теплопередачи a от нагрузки по жидкости для частот вращения ротора 500, 700, 1000 1/мин. По сведениям Г. Фурста, коэффициент теплопередачи возрастает пропорционально нагрузке по жидкости до определенного предела, после чего он остается неизменным для всех чисел оборотов ротора.

$$\Delta t = t_{0\pi} - t_{\text{сп}}, \quad (3.8)$$

$$\Delta t = t_{0\pi} - t_{\text{сп}} = 25^{\circ}\text{C},$$

где $t_{0\pi}$ – температура греющего пара $t_{\text{сп}}$ – температура сокового (вторичного) пара.

В пленочных испарителях роторного типа теплопередача определяется также положением лопастей и конструкцией роторной мешалки. Зависимость коэффициента теплопередачи от числа лопастей приведена на рисунке. Здесь «условие работы пленочных испарителей те же, что указаны на рисунке. Одновременно выявлено, что коэффициент теплоотдачи остается почти одинаковым при различной толщине пленки» жидкости $\delta=0,6 - 1,5$ мм независимо от числа лопастей ротора. Для определения коэффициента теплоотдачи от стенки к испаряемой жидкости было найдено эмпирическое уравнение

$$a_2 = 8,74(\lambda \rho c_2 n z)^{1/2} \quad (3.9)$$

где a_2 – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² *К) ; λ – теплопроводность жидкости, Вт/(м*К) ; ρ – плотность жидкость, кг/м³; c_p – теплоемкость жидкости, Дж/(кг*К); n – скорость вращения ротора, 1/с; z – число лопастей «роторной мешалки».

Толщину жидкости пленки в испарителе принимают равной величину зазора между внутренней стенкой аппарата и торцевой кромкой лопасти. Тогда объемный расход стекающей жидкости по стенкам испарителя определяется по формуле

$$V_{\text{п}} = \frac{2 \pi R g \rho \delta^3}{3 \mu} \quad (3.10)$$

Объем жидкости, находящейся в аппарате, равен сумме объёмов пристанной пленки и носовых бурунов, расположенных перед каждой лопастью:

$$V = 2\pi R\delta L + zF_6L, \quad (3.11)$$

где R – внутренний радиус аппарата, м; L – рабочая высота стенки аппарата, м; z – число лопастей; F_6 – площадь сечения бурана, м².

Для определения значения F_6 можем воспользоваться формулой

$$F_6 = 3,8z^{-\frac{1}{2}} \frac{\mu V}{\text{гр}} - \frac{2\pi R\delta^3}{3}^{1/2} \quad (3.12)$$

$$F_6 = 3,8 \times 3^{-\frac{1}{2}} \frac{0,00061 \times 0,71}{9,8 \times 800} - \frac{2 \times 3,14 \times 0,3 \times 0,001^3}{3}^{1/2} = 1,23$$

Исследования процессов тепло и массообмена в пленочных испарителях с роторными мешалками проводились многими учеными. Для выпаривания воды и водных растворов сахара в пленочных испарителях с жестким ротором рекомендуется уравнение [10]

$$Nu = 0,095 Kp^{-0,24} Re^{0,2} Re^{0,4} Pr^{0,22} m^{0,1} \quad (3.13)$$

где $Kp = \frac{q}{rp_n \omega}$ – критерий теплового напряжения при фазовом превращении; «раствора $Re = \frac{4\Gamma}{\mu}$ – число Рейнольдса; $Re = \frac{q\delta}{rp_n a}$ – число Пекле; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля; $Nu = \frac{a\delta}{\lambda}$ – число Нуссельта; $m = \frac{zs}{\pi D}$ – параметрическое число. Здесь ω – окружная скорость раствора; δ – расчетная толщина пленки; s – толщина лопастей; z – число лопастей; D – диаметр аппарата.

Исследования процессов испарения водных растворов глицерина в роторных испарителях с поворотными лопастями показали, что теплоотдача выражается критериальной зависимостью [3]

$$Nu = 0,65 Re^{0,25} Re_{\text{ц}}^{0,43} Pr^{0,8} z^{0,33}. \quad (3.14)$$

Уравнение справедливо в интервале $n=600 - 1400$ об/мин, когда плотность орошения $\Gamma=102 - 582$ кг/(м²ч) при роторной мешалке с $z=4$ - 6 шарнирно закрепленными скребками.

В уравнение (3.15) входят

$$Re = \frac{4\Gamma}{\mu}; Re_{\text{ц}} = \frac{pnd^2}{\mu}; Nu = \frac{aD}{\lambda}; Pr = \frac{v}{a}. \quad (3.15)$$

Для пленочных испарителей с жестким ротором при испарении воды и водных растворов минеральных солей было получено уравнение [4]

$$Nu = AKr^{0,84} Re_{\text{ц}}^{0,65} Pr^{0,58}, \quad (3.16)$$

где $Nu = \frac{a\Delta R}{\lambda}$; A – константа для воды A = 0,085; для раствора A = 0,193;

ΔR – зазор между лопастью и корпусом аппарата.

Имеются и другие эмпирические уравнения для расчета пленочных испарителей с роторной мешалкой. Необходимо отметить, что большинство уравнений, представленное в виде кристалльных уравнений, имеет ограниченные пределы применения.

Практика показала, что на эффективность испарения оказывает влияние конструктивные устройства для размазывания раствора по стенкам аппарата. Кроме того, на процесс испарения жидкости в пленочных испарителях оказывает существенное влияние плотность орошения, величину теплового потока, скорость вращения лопастной мешалки и рабочее давление в аппарате. При более тщательном исследовании процессов тепло- и массообмена установлено, что коэффициент теплоотдачи от нагрева стенки к движущейся жидкой пленке можно рассчитать по уравнению» [10].

$$a = 234q^{0,1} \omega^{0,13} P^{0,16} \Gamma^{0,14} \quad (3.17)$$

Уравнение получено в диапазоне $q=(148-72)*10^3 \text{ Вт/м}^2$;

$$\omega = 2,12 - 4,24 \text{ м/с}; P=4 - 26 \text{ кПа}; \Gamma=27,3 - 234 \text{ кг/(м}^3\cdot\text{ч)}.$$

Более обширные исследования процессов испарения в пленочных испарителях с жестко закрепленными лопастями диаметром 160 и длиной 1000мм позволили получить уравнение [4]

$$Nu = 3,6 * 10^3 Re_{\text{ж}}^{1,2} Re_{\text{ц}}^{-2} Fr_{\text{ц}}^{1,6} Pr^{0,33} \quad (3.18)$$

где $Re_{ж} = \frac{4\Gamma}{\mu}$ – пленочный критерий Рейнольдса; $Re_{ц} = \frac{pnd^2}{\mu}$ – число Рейнольдса при вращении ротора; $Fr_{ц} = \frac{n^2 d}{q}$ – число Фруда при вращении ротора; $Nu = \frac{aD}{\lambda}$ – число Нуссельта.

Уравнение (3.19) получено при значениях $Re_{ж} = 500 - 2000$; $Fr_{ц} = 0,4 - 8$ и $Re_{ц} = 1 - 1,2 * 10^6$.

Уравнение, описывающее теплоотдачу в роторном испарителе с учетом влияния зазора между лопастями ротора и корпусом аппарата, было получено [2] для аппарата диаметром от 169 до 900мм при числе лопастей от 2 до 6 в виде

$$Nu = 0,089 \frac{\Gamma}{\mu}^{0,04} Re_{ц}^{0,6} Pr^{0,33} \frac{\Delta R}{R}^{0,12} z^{0,05}. \quad (3.19)$$

Уравнение (2.5) справедливо при значениях: $\omega=21=105$ 1/с; $\Gamma=144-4500$ кг/(м*ч); $\Delta R = 0,6 - 2,0$ мм ; $R=85-450$ мм; для жидкостей $\nu=(0,9-503)*10^{-6}$; $Pr=6,2-642$.

$$Nu = 0,089 \frac{2100}{0,000065}^{0,04} 13253^{0,6} 1^{0,33} \frac{0,0006}{300}^{0,12} 3^{0,05} = 11,63$$

Отклонение опытных данных от расчетной зависимости (3.19) составляет $\pm 15\%$.

3.3 Мощность привода роторной мешалки

«Мощность привода, подводимая к ротору, затрачивается на преодолении сил вязкостного сопротивления слоя жидкости, находящейся в контакте с неподвижной стенкой аппарата, и на сообщении ускорения слоя жидкости перед каждой лопаткой, движущемуся с угловой скоростью ω ротора. Если проскальзывания жидкость у стенки аппарата и на лопатке» «ротора отсутствует, а зазор между концом лопатки и корпусом достаточно мал, то мощность для привода составит:

- на преодолении сил вязкостного сопротивления

$$N_1 = 9,35 * 10^{-14} R H \mu_{ср} n^2 \frac{z}{\Delta R}; \quad (3.21)$$

$$N_1 = 9,35 * 10^{-14} * 0,300 * 10 * 0,0065 * 2000^2 * \frac{3}{0,0002} = 17 \text{ кВт}$$

- на создание ускорения в установившемся режиме

$$N_2 = 3,5 * 10^{-9} \rho n H^2 R^2 - 6 * 10^4 \frac{H}{n^2} . \quad (3.22)$$

В уравнения входят: R – радиус ротора; H – высота цилиндрической стенки аппарата; ΔR – зазор между концом лопатки и стенкой аппарата; $\mu_{\text{ср}}$ – вязкость раствора при средней температуре; n – частота вращения ротора; z – число лопаток ротора; ρ – плотность раствора.

При расчете мощности привода следует иметь в виду, что в момент пуска ротора мощность N_2 ,будет несколько больше и ее можно определить по уравнению»

$$N_{\text{пуск}} = \frac{Mv^2}{2g} = 7 * 10^{-13} M R^2 n^3, \quad (3.23)$$

Где M – массовая скорость раствора, г/с; v – линейная скорость ротора $v = R\omega$; ω – угловая скорость ротора.

$$N_{\text{пуск}} = 7 * 10^{-13} * 22,3 * 300^2 * 2000^3 = 11,2 \text{ кВт}$$

Суммарная мощность, необходимая для вращения роторной мешалки, составит

$$N = N_1 + N_{\text{пуск}} \quad (3.24)$$

$$N = 17 + 11,2 \approx 30 \text{ кВт}$$

3.4 Расчет подогревателя масла

Рассчитать два варианта горизонтального кожухотрубчатого теплообменного аппарата для нагрева т/ч отработанного масла от 21 до 98°С. Греющий водяной насыщенный пар имеет абсолютное давление $p=1,6$ кгс/см². В водяном паре содержится 0,5% воздуха.

1-й вариант: турбулентное течение отработанного масла в трубном пространстве.

2-й вариант: ламинарное течение отработанного масла в трубном пространстве.

Ввиду того, что в трубах нагревается отработанное масло, а не вода и температура в трубах выше 60°C , используем аппарат типа ТН или ТК. Применяем для межтрубного пространства индекс «1», для трубного – «2».

Температура конденсации водяного пара $t_{\text{конд}} = 112,7^{\circ}$ Температурная схема:

$$\begin{array}{c} 112,7 - 112,7 \\ 21 \rightarrow 98 \\ \overline{\Delta t_6} = 91,7 \quad \overline{\Delta t_M} = 14,7. \end{array} \quad (3.25)$$

Средняя разность температур:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{2,31_g(\Delta t_6/\Delta t_M)} \quad (3.26)$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{91,7 - 14,7}{2,31_g(91,7/14,7)} = 42,1^{\circ}\text{C} = 42,1 \text{ К.}$$

Средняя температура отработанного масла:

$$t_2 = t_1 - \Delta t_{\text{ср}} \quad (3.27)$$

$$t_2 = 112,7 - 42,1 \approx 70^{\circ}\text{C.}$$

Расход отработанного масла:

$$G_2 = 20000/3600 = 5,56 \text{ кг/с}; \quad V_2 = G_2 \rho_2 = 5,56/820 = 0,00678 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Здесь $\rho_2 = \frac{820 \text{ кг}}{\text{м}^3}$ – плотность отработанного масла при 70°C

Расход теплоты на нагрев отработанного масла:

$$Q = G_2 c_2 t_{2\text{к}} t_{2\text{н}} \quad (3.28)$$

$$Q = 5,56 * 1800 * 98 - 21 = 771000 \text{ Вт,}$$

где $c_2 = 1800 \text{ Дж}/(\text{кг} * \text{К})$ – средняя удельная теплоемкость отработанного масла .

Расход сухого греющего пара с учетом 7% потерь теплоты:

$$G_1 = \frac{1,07Q}{r} \quad (3.29)$$

$$G_1 = \frac{1,07 * 771000}{2227 * 10^3} = 0,37 \text{ кг/с,}$$

где $r=2227 \cdot 10^3$ Дж/кг – удельная теплота конденсации водяного пара [табл. LVII].

Ориентировочно определяем максимальную величину площади поверхности теплообмена. По таблице минимальное значение коэффициента теплопередачи для случая теплообмена от конденсирующего водяного пара к жидкостям (подогреватели $K_{\text{мин}} = 120 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). При этом

$$F_{\text{макс}} = \frac{Q}{K_{\text{мин}} \Delta t_{\text{ср}}} \quad (3.30)$$

$$F_{\text{макс}} = \frac{771000}{120 \cdot 42,1} \approx 150 \text{ м}^2.$$

Расчет первого варианта ($Re_2 > 10000$).

Для обеспечения турбулентного течения отработанного масла при $Re_2 > 10000$ скорость в трубах должна быть больше ω_2 :

$$\omega_2 = \frac{10000 \mu_2}{d_2 \rho_2} \quad (3.31)$$

$$\omega_2 = \frac{10000 \cdot 0,36 \cdot 10^{-3}}{0,021 \cdot 820} = 0,209 \text{ м/с}$$

где $\mu_2 = 0,36 \cdot 10^{-3}$ Па*с – динамический коэффициент вязкости отработанного масла при 70°C

Число труб $25 \cdot 2$ мм, обеспечивающих объёмный расход отработанного масла при $Re_2 > 10000$:

$$n^I = \frac{V_2}{0,785 d_2^2 \omega_2} \quad (3.32)$$

$$n^I = \frac{0,00678}{0,785 \cdot 0,021^2 \cdot 0,209} = 93,7.$$

Условию $n < 93,7$ и $F < 150 \text{ м}^2$ удовлетворяют два теплообменника: а) четырехходовой диаметром 600мм с числом труб на один ход трубного пространства $n=52,5$ (общее число труб 210).

б) шестихлдовой диаметр 600мм с числом труб на один ход трубного пространства $n=33$ (общее число труб 198).

Выбираем четырехходовой как более простой.

1. Коэффициент теплоотдачи для отработанного масла

Уточняем значение критерия Re_2 :

$$Re_2 = 10000 n^I n \quad (3.33)$$

$$Re_2 = 10000(93,7/52,5) = 17850.$$

Критерий Прандтля для отработанного масла при 70°C:

$$Pr_2 = c_2 \mu_2 / \lambda_2 \quad (3.34)$$

$$Pr_2 = 1800 * 0,36 * 10^{-3} / 0,1248 = 5,19.$$

Здесь $\lambda_2 = 0,1248$ Вт/(м*К) – коэффициент теплопроводность отработанного масла при 70°C

Расчетная формула:

$$Nu_2 = 0,021 * Re_2^{0,8} Pr_2^{0,43} (Pr_2 / Pr_{ст.2})^{0,25} g_t \quad (3.35)$$

$$Nu_2 = 0,021 * 17,850^{0,8} * 5,19^{0,43} * 1,05 * 1 = 112,7.$$

Отношение $(Pr_2 / Pr_{ст.2})^{0,25}$ принято равным 1,05 (с последующей проверкой).

Таким образом,

$$a_2 = a_{cp} = 1,28 g \frac{A_t}{(d\Delta t)^{0,25}} = 2,02 g B_t^3 \frac{nL}{G_1} \quad (3.36)$$

В нашем случае известно $G_1=0,37$ кг/с и $n=210$. Поэтому используем зависимость $a_i=f(n, L, G)$ с учетом влияния примеси воздуха (0,5%):

$$a_i = 2,02 g B_t (n/G_1)^{1/3} L^{1/3} \quad (3.37)$$

$$a_i = 2,02 * 0,62 * 0,6 * 1048 (210/0,37)^{1/3} L^{1/3},$$

где ε -коэффициент, для шахматного расположения труб в пучке и при числе рядов труб по вертикале $n_B = 14$, $\varepsilon = 0,62$ [рис. 4.7] ε_p - коэффициент, зависящий от содержания воздуха в паре [рис. 4.9] $\varepsilon_p=0,6$; $B_t=1048$ [табл. 4.6]

Надо задаться длиной труб [по табл.4.12 длины труб 2; 3; 4 и 6м]. Задаемся $L=3$ м. Если по окончании расчета будет принята другая длина труб, то расчет необходимо скорректировать (с увеличением L при $G_1 = const$ величина a_{cp} возрастает). Имеем:

$$a_{cp} = 6520 * 3^{1/B} = 9400 \text{ Вт}/(\text{м}^3 * \text{К})$$

Принимаем тепловую проводимость загрязнений со стороны греющего пара $1/r_{\text{загр.1}} \approx 5800 \text{ Вт}/(\text{м}^3 * \text{К})$ со стороны отработанного масла $1/r_{\text{загр.2}} \approx 5800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$ [табл. XXXI]. Коэффициент теплопроводности стали $\lambda_{\text{ст}} = 46,5 \text{ Вт}/(\text{м} * \text{К})$ [табл. XXVIII]. Тогда

$$\frac{1}{r_{\text{ст}}} = \frac{1}{\frac{1}{5800} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{5800}} = 2580 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + r_{\text{ст}} + \frac{1}{a_2}} \quad (3.38)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{9400} + \frac{1}{2580} + \frac{1}{669}} = 503 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

Поверхностная плотность теплового потока:~

$$q = K \Delta t_{\text{ср}} \quad (3.39)$$

$$q = 503 * 42,1 = 211180 \text{ Вт}/\text{м}^3$$

Проверяем принятое значение $(Pr_2/Pr_{\text{ст.2}})^{0,25}$. Определяем

$$\Delta t_2 = q/a_2 \quad (3.40)$$

$$\Delta t_2 = 21,180/669 \approx 32\text{К} \approx 32^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{ст. 2}} = t_2 + \Delta t_2 \quad (3.41)$$

$$t_{\text{ст. 2}} = 70 + 35 = 102^\circ\text{C}$$

$$Pr_{\text{ст. 2}} = c_{\text{ст. 2}} \mu_{\text{ст. 2}} / \lambda_{\text{ст. 2}} \quad (3.42)$$

$$Pr_{\text{ст. 2}} = 1885 * 0,27 * 10^{-3} / 0,1163 = 4,38$$

Здесь $c_{\text{ст. 1}} = 1885 \text{ Дж}/(\text{кг} * \text{К})$; $\mu_{\text{ст. 2}} = 0,27 * 10^{-3} \text{ Па} * \text{с}$; $\lambda_{\text{ст. 2}} = 0,1163 \text{ Вт}/(\text{м} * \text{К})$

Следовательно,

$$(Pr_2/Pr_{\text{ст.2}})^{0,25} = (5,19/4,38)^{0,25} = 1,043.$$

Было принято $(Pr_2/Pr_{\text{ст.2}})^{0,25} = 1,05$. Разница $\sim 0,7\%$. Расчет K закончен.

Расчет площади поверхности теплообмена:

$$F_p = \frac{Q}{K \Delta t_{\text{ср}}}. \quad (3.43)$$

$$F_p = \frac{771000}{503 * 42,1} = 36,4\text{м}^2.$$

Коэффициент теплоотдачи $a_1 = 9440 \gg a_2 = 663 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$, поэтому расчетным данным диаметром при определении поверхности труб следует принять $a_2 = 0,021\text{м}$.

Аппарат с $L=3\text{м}$ имеет площадь поверхности теплообмена:

$$F = \pi d_2 n L \quad (3.44)$$

$$F = 3,14 * 0,021 * 3 = 41,56\text{м}^2.$$

Запас площади поверхности теплообмена:

$$\frac{41,56 - 36,4}{36,4} 100 = 14,2\%$$

Запас площади теплообмена достаточен.

Принимаем один четырёхходовой кожухотрубчатый теплообменник с внутреннем диаметром кожуха 600мм, числом труб 52,5/210 и длиной труб $L=3\text{м}$.

В виду того, что общая разность температур $\Delta e_{cp} = 42,1 \text{ К}$ близка к допусковой разности $(t_k - t_T)_{\text{макс}} = 40\text{К}$, принимаем аппарат типа ТН.

Определяем $t_{\text{ст. 2}}$:

$$\Delta t_2 = \frac{q}{a_2} \quad (3.45)$$

$$\Delta t_2 = 21,180/669 = 31,659\text{К} = 31,659^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{ст. 2}} = 70,6 + 31,659 \approx 102,3^\circ\text{C}$$

На схему процесса теплопередачи, нужно нанести уточнённые значения $t_{\text{ст. 1}}, t_{\text{ст. 2}}, a_1, a_2, q$.

Расчет второго варианта ($Re < 2300$).

Для течения отработанного масла при $Re_2 < 2300$ скорость в трубах должна быть меньше ω_2 :

$$n = \frac{V_2}{0,75 d_2^2 \omega_2} \quad (3.46)$$

$$n = \frac{0,00678}{0,785 * 0,021^2 * 0,048} = 408.$$

Условно $n > 480$ и $F < 150 \text{ м}^2$ удовлетворяет одноходовой кожухотрубчатый аппарат с внутренним диаметром кожуха 800 мм, площадью поверхности теплообмена от 74 до 226 м^2 и общим числом труб $n = 473$ [табл. 4.12].

1. Коэффициент теплоотдачи для отработанного масла.

Уточняем величину критерия Рейнольдса:

$$Re_2 = 2300(n^I/n) \quad (3.47)$$

$$Re_2 = 2300(408/473) = 1984.$$

Находим ориентировочное значение произведения критериев $Gr_2 Pr_2$. В величину критерия Gr_2 , а также в выражении определяющей температуры входит величину $\Delta t_2 = t_{\text{ст. 2}} - t_2$. Определяются только в конце расчета, поэтому величину Δt_2 надо задаваться.

Коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара значительно больше коэффициента теплоотдачи при нагреве отработанного масла [табл. 4.7] поэтому принимаем ориентировочно (с последующим уточнением):

$$\Delta t_2 = 0,75 \Delta t_{\text{ср}} \quad (3.48)$$

$$\Delta t_2 = 0,75 * 42,1 \approx 32 \text{ К} \approx 32^\circ \text{C};$$

определяющую температуру

$$t = t_2 + (\Delta t_2/2) \quad (3.49)$$

$$t = 70_2 + (32/2) \approx 90^\circ \text{C}$$

температура стенки

$$t_{\text{ст. 2}} = t_2 + \Delta t_2 \quad (3.50)$$

$$t_{\text{ст. 2}} = 70 + 32 = 102^\circ \text{C}.$$

Ориентировочное значение $Gr_2 Pr_2$ при 90°C для отработанного масла (физические величины по:

$$Gr_2 Pr_2 = \frac{d_2^3 \rho_2^2 \beta_2 \Delta t_2 g}{\mu_2^2} Pr_2 \quad (3.51)$$

$$Gr_2 Pr_2 = \frac{0,021^3 * 798^2 * 10^{-3} * 32 * 9,81}{0,295^2 * 10^{-6}} 4,93 = 13,4 * 10^3$$

Здесь

$$Pr_2 = 2023 * 0,295 * 10^{-3} / 0,121 = 4,93,$$

где $c_2=2023$ Дж/(кг*К): $\lambda_2=0,121$ Вт/(м*К).

При $Gr_2 Pr_2 > 8 * 10^5$ и $Re_2 < 3500$ применима формула [3.51].

Принимаем длину труб $L=3$ м. Тогда

$$Nu_2 = 0,8 Re_2 \frac{d_2}{L}^{0,4} (Gr_2 Pr_2)^{0,1} \frac{\mu_2}{\mu_{ст. 2}}^{0,14} \quad (3.52)$$

$$Nu_2 = 0,8 * 72^{0,4} * 13,4 * 10^7^{0,1} * \frac{0,295^{0,14}}{0,266} = 0,8 * 5,53 * 6,5 * 1,014 = 29,2$$

где

$$Pe_2 \frac{d_2}{L} = Pe_2 Pr_2 \frac{d_2}{L} \quad (3.53)$$

$$Pe_2 \frac{d_2}{L} = 1984 * 5,19 \frac{0,021}{3} = 72;$$

$$\mu_{ст. 2} = 0,266 * 10^{-3} \text{ Па * с при } t_{ст. 2} = 102^\circ\text{C}.$$

Таким образом,

$$a_2 = Nu_2 \lambda_2 / d_2 \quad (3.54)$$

$$a_2 = 29,2 * 0,1248 / 0,021 = 173 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}).$$

II. Коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара.

В первом варианте расчета аппарата при $n=210$, $\varepsilon = 0,62$ было определено $a_1 = 9400$ Вт/(м² * К). Во втором варианте $n=473$. Число рядов труб по вертикали $n_B = 32$ [табл. 4.14], чему соответствует $\varepsilon \approx 0,57$ [рис. 4.7].

При каждой длине труб $L=3$ для второго варианта:

$$a_1 = 9400 \frac{0,57}{0,62} \frac{473}{210}^{1/3} = 9400 * 0,92 * 1,31 = 11400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

Коэффициент теплопередачи при $L=3$ м (предварительный):

$$K_{L=3} = \frac{1}{\frac{1}{11400} + \frac{1}{2500} + \frac{1}{173}} = 160 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}),$$

где $\delta_{\text{ст}}\lambda_{\text{ст}} = \frac{1}{500}$.

Уточнение принятых величин:

а) разность температур Δt_2 по расчету

$$\Delta t_2 = K\Delta t_{\text{ср}}/a_2 \quad (3.55)$$

$$\Delta t_2 = 160 * 42,1/173 = 39\text{К} = 39^\circ\text{C}$$

б) определяющая температура

$$t = 70 + (39/2) \approx 90^\circ\text{C}$$

(расчетные значения определяющей температуры совпало с принятым 90°C); в) уточнение a_2 за счет того, что расчетное значение Δt_2 оказалось больше принятого

$$a_2 173(39/32)^{0,1} = 173 * 1,02 = 176\text{Вт}/(\text{м}^2 * \text{К})$$

г) уточнение нахождение коэффициента теплопередачи при $L=3\text{м}$

$$K_{L=3} = \frac{1}{\frac{1}{11400} + \frac{1}{2500} + \frac{1}{176}} = 162\text{Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}).$$

Расчетная площадь поверхности теплообмена при $L=3\text{ м}$:

$$F_{L=3} = \frac{771000}{162 * 42,1} = 113\text{м}^2.$$

Коэффициент теплоотдачи $a_1 \gg a_2$, по этому за поверхность теплообмена аппарата следует принять внутреннюю поверхность труб [формула 4.75]. Так, одноходовой теплообменник с внутреннем диаметром кожуха 800 мм при длине труб 3 м имеет площадь поверхности теплообмена $F=\pi*0,021*473*3=93\text{м}^2$, что недостаточно.

Рассмотрим два варианта: а) длина труб 4 м, $F= \pi*0,021*473*4=125\text{м}^2$

б) длинна труб 2 м; два аппарата с общей площадью поверхности 125м^2

а) Теплообменник с трубами 4м:

$$a_1 = (11400 * 4/3)^{1/3} = 11400 * 1,1 = 12500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 * \text{К});$$

$$a_2 = 176(3/4)^{0,4} - 176 * 0,89 = 157 \text{Вт}/(\text{м}^2 * \text{К}).$$

$$K_{L=4} = \frac{1}{\frac{1}{12500} + \frac{1}{2500} + \frac{1}{157}} = 146 \text{Вт}/(\text{м}^3 * \text{К}).$$

Расчетная площадь поверхности теплообмена недостаточна, так как нет запаса,

б) Два теплообменника с трубами длиной по 2м:

$$a_2 = 176(3/2)^{0,4} = 176 * 1,176 = 207 \text{Вт}/(\text{м}^3 * \text{К}).$$

$$K_{L=2} = \frac{1}{\frac{1}{12500} + \frac{1}{2500} + \frac{1}{207}} = 188 \text{Вт}/(\text{м}^3 * \text{К})$$

Поверхностная плотность теплового потока (удельная тепловая нагрузка) $q = K\Delta t_{cp} = 188 * 42,1 = 7915 \text{Вт}/\text{м}^2$. Расчетная площадь поверхности теплообмена при $L=2\text{м}$:

$$F_{L=2} = Q/q \quad (3.56)$$

$$F_{L=2} = 771000/7915 = 97,4 \text{м}^2$$

Принимаем два одноходовых теплообменника с внутреннем диаметром кожуха 800 мм и длиной труб 2 м.

Запас площади поверхности теплообмена: $\frac{125-97,4}{97,4} 100 = 28\%$. Запас площади поверхности теплообмена достаточен.

Определяем $t_{ст. 1}$ и $t_{ст. 2}$ для принятого варианта:

$$\Delta t_1 = \frac{q}{a_1} \quad (3.57)$$

$$\Delta t_1 = 7915/12500 = 0,633 \text{К} = 0,633^\circ \text{C};$$

$$t_{ст. 1} = 112,7 - 0,633 = 112,067^\circ \text{C};$$

$$\Delta t_2 = q/a_2 \quad (3.58)$$

$$\Delta t_2 = 7915/207 = 38,237 \text{К} = 38,237^\circ \text{C};$$

$$t_{ст. 2} = 70,6 + 38,237 = 108,837^\circ \text{C}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработана энергоэффективная и наиболее экономически рациональная технология переработки отработанного масла. Используя, данную технологию можно переработать отработанное масло в достаточно малых объемах, с различным содержанием легких и тяжелых компонентов. Приведенные расчеты подтверждают данные утверждения.

В целом внедрение данной технологии позволит вовлечь в экономическую деятельность дополнительные объемы дорогостоящих синтетических углеводородов.

Переработка масла по предлагаемой технологии позволит:

1. Получить дополнительные товарные синтетические продукты не привлекая первичные природные ресурсы.
2. Снизить затраты энергии на переработку отработанного масла.
3. Улучшить экологическую обстановку в Российской Федерации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Курасов, В.С., Вербицкий, В.В. Применение топлива, смазочных материалов и технических жидкостей: учеб. пособие /В.С. Курасов, В.В. Вербицкий. КубГАУ. – Краснодар, 2013. – 112 с.
- 2 Атабеков, В.Е., Косяков, В.К. Нефть и газ: технологии и продукты переработки / В.Е. Атабеков, В.К. Косяков. – Ростов н/Д: Феникс, 2014. – 458 с.
- 3 Бобович, Б.Б., Девяткин, В.В. Переработка отходов производства и потребления: справ. издание 1 / под ред. д-ра техн. наук, проф. Б.Б. Бобовича. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 496 с.
- 4 Охрана окружающей среды: ПАО «Уралкалий» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.uralkali.com/ru> (дата обращения 18.01.2019).
- 5 Черномуров, Ф.М., Ануфриев, В.П., Теслюк, Л.М. Энерго и ресурсосбережение в нефтегазово-химическом комплексе: учеб. электрон. текст. изд. / науч. ред. доц., канд. хим. наук И.В. Рукавишникова. – Екатеринбург, 2014. – 236 с.
- 6 Современные методы очистки и регенерации отработанных смазочных масел: препринт / Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов, Л.А. Фельдман, А.В. Юдин, О.Н. Петров. – Красноярск: Изд-во Сиб.федер. ун-та, 2011. – 104 с.
- 7 Пат. № 2156272 Российская Федерация. Способ утилизации отработанных масел / М.В. Ломоносова, В.К. Французов, Р.И. Эстрин, В.В. Лунин. Заявл. 29.12.1999, опубл. 20.09.2000.
- 8 Основные направления рационального использования отработанных нефтепродуктов в народном хозяйстве: реферат. сб. /И.В. Брайт [и др.]. – Нефтеснабжение, 1978. – № 1. – С. 15–16.
- 9 Пат. 2286375 Российская Федерация. Состав для водоизоляции скважин / В.А. Прокопенко, Р.Е. Зонтов, А.А. Шевяхов, А.М. Булдакова [и др.]. № 2005103021/03, заявл. 07.02.2005, опубл. 27.10.2006.

10 Gesoglu M., Guneyisi E., Mahmood S.W., Oznur Oz H., Mermerdas K. Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. Vol. 235-236. pp. 352-358.

11 Молоканов, А.А. Исследование процесса коагуляционной очистки смесей отработанных масел: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Молоканов. – М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2013. – 150 с.

12 Кожевников, В.А. Потенциал использования отработанных масел для нужд теплоснабжения / В.А. Кожевников // Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2008. – № 8. [Электронный ресурс]. – URL: http://journal.esco.co.ua/2008_8/art038.htm (дата обращения 18.01.2019).

13 Захаров, С.В. Кожевников, В.А. Анализ потенциала использования отработанных масел для нужд теплоснабжения / С.В. Захаров, В.А. Кожевников // Московский энергетический институт ОАО «ВНИПИэнергопром». [Электронный ресурс]. – URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskaya-otsenka-vozdeystviya-na-okruzhayushuyu-sredu-selskohozyaystvennoy-tehniki-v-protsesse-ekspluatatsii> (дата обращения 18.01.2019).

14 Bethea S.R. et al. To hydrotreat waste lube oil//*Hydrocarbon Process.* -1973. -V. 52. -№ 9. -pp. 134-150

15 Ходяшев, М.Б., Глушанкова, И.С., Дьяков, М.С. Методологические подходы к разработке технологий термической утилизации твердых нефтесодержащих отходов нефтеперерабатывающих предприятий / М.Б. Ходяшев, И.С. Глушанков, М.С. Дьяков // *Экология и промышленность России*. – 2009. – № 11, ноябрь. – С. 40–43.

16 See L.S., Hamzah M.O. Processed steel slag for road construction industry. *Fifth Malaysian Road Conference*. Kuala Lumpur. 2002. pp. 71-75.

17 Обоснование выбора ресурсосберегающих технологий утилизации отработанных масел / Я.И. Вайсман, М.С. Дьяков, Н.А.

Солдатенко, И.С. Глушанкова // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 16–19.

18 Каменчук, Я.А. «Отработанные нефтяные масла и их регенерация» (на примере трансформаторных и индустриальных масел) / Я.А. Каменчук // Экология и промышленность России. 2007г. – №7. – С. 3-7.

19 ГОСТ 21046-86. Нефтепродукты отработанные. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт. [Электронный ресурс]: URL : docs/cntd/documents/gost-21046-86 (дата обращения 03.06.2019).

20 Jafari A.J., Hassanpourb M. Analysis and comparison of used lubricants, regenerative technologies in the world//Resources, Conservation and Recycling. 2015. V. 103. pp. 179-191.

21 Reinhart G.P. Anforderungen des modernen Fuhrparks an motorenole //Tribologie und Schmierungstechnik. -1986. -№. 4. -S. 202-209.

22 Поташников, Ю.М. Утилизация отходов производства и потребления Учебное пособие / Ю.М. Поташников. – Тверь.: Издательство ТГТУ, 2004. – 107 с.

23 Евдокимов, А.Ю. Смазочные материалы / А.Ю. Евдокимов. – М.: Техиздат, 2005. – 123 с.

24 Вайсберг, Л.А. Новые технологии переработки бытовых и промышленных отходов / Л.А. Вайсберг // «Вторичные ресурсы», 2001. –№5 –6. – С. 45 – 51.

25 Мюррей, Робин Ноль отходов («Zero Waste») / Роббин Мюррей // Экология и жизнь, №6 (44)'2004.

26 Школьников, В.М. Топливо, смазочные материалы и технологические жидкости / В.М. Школьников. – М.: «Высшая школа», 1998. – 254 с.

27 Фукс, И.Г. Пластические смазки / И.Г. Фукс. – М.: «Высшая школа», 2002. – 123 с.

28 Гаевик, Д.Т. Смазка оборудования на металлургических предприятиях / Д.Т. Гаевик. – М.: «Высшая школа», 2000. – 178 с.

29 Каменчук, Я.А. Влияние температуры и растворителя на процесс осадкообразования в отработанном индустриальном масле /Каменчук Я.А., Писарева С.И., Андреева Л.Н., Унгер Ф.Г. // Химия и технология топлив и масел. 2006. – № 1. – С. 29-31.

30 Писарева, С.И. О природе образования и растворения асфальто-смоло-парафиновых отложений /Писарева С.И., Каменчук Я.А., Андреева Л.Н., Унгер Ф.Г. // Химия и технология топлив и масел. 2005. – № 6. – С. 38-41.

31 Каменчук, Я.А. Изменение содержания ингибиторов окисления и парамагнитных центров в процессах старения нефтяных трансформаторных масел /Каменчук Я.А., Писарева С.И. // Нефтехимия. 2006. – Т.46. – № 5. – С. 395-398.

32 Каменчук, Я.А. Природа явлений старения и химических процессов очистки использованных нефтяных масел /Каменчук Я.А., Писарева С.И., Андреева Л.Н., Унгер Ф.Г.// Материалы V международной конференции “Химия нефти и газа”. Томск. 2003. –С.562-564.

33 Каменчук, Я.А. Физико-химические основы процесса очистки отработанного индустриального масла /Каменчук Я.А., Писарева С.И., Андреева Л.Н., Унгер Ф.Г. //Материалы международной научно-практической конференции “Новые технологии в переработке и утилизации отработанных масел и смазочных материалов”. Москва. 2003. – С. 135-139.

34 Каменчук, Я.А. Природа явлений старения и химических процессов при регенерации использованных нефтяных масел /Каменчук Я.А., Писарева С.И., Андреева Л.Н., Унгер Ф.Г. // Материалы I Всероссийской конференции “Химия для автомобильного транспорта”. Новосибирск 2004. – С. 163-167.

35 Каменчук, Я.А. Вариант решения проблемы очистки отработанных смазочных масел / Каменчук Я.А., Андреева Л.Н., Унгер Ф.Г. // Материалы III Российской научно-практической конференции

“Полифункциональные химические материалы и технологии”. Томск. 2004. – С. 121-122.

36 Каменчук, Я.А. Физико-химические закономерности процессов старения трансформаторных масел / Каменчук Я.А., Писарева С.И. // Материалы III Всероссийской²³ конференции молодых ученых “Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии”. Томск. 2006. – С. 260-262.

37 Писарева, С.И. Способ очистки использованных масел /Писарева С.И., Каменчук Я.А., Андреева Л.Н., Унгер Ф.Г.// Пат. № 2242504, приор. от 31.07.2003, опубл. БИ № 35,20.12.2004.

38 Стандарт организации. Система стандартизации ФГБНУ ГОСНИТИ. Жидкость гидравлическая на основе регенерированных моторных масел для применения в гидроприводах сельскохозяйственной техники. Технические условия. СТО ГОСНИТИ 11.008-2015. Москва, 2015. – 14 с.

39 Бобович, Б.Б. «Процессы и аппараты переработки промышленных отходов» Учебное пособие / Б.Б. Бобович. – М.: МГТУ «МАМИ», 2008 –110 с.