

На правах рукописи



МАРКЕЛОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

**БАРОМЕМБРАННЫЙ ПРОЦЕСС РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ
МОТОРНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ МАСЕЛ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН
МЕТОДОМ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АФТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2015

Работа выполнена на кафедре «Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: академик РААСН,
доктор технических наук, профессор
Федосов Сергей Викторович

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Осадчий Юрий Павлович

Официальные оппоненты: **Панов Юрий Терентьевич**
доктор технических наук, профессор,
Владимирский государственный университет,
заведующий кафедрой «Химические технологии»,

Поворов Александр Александрович,
кандидат технических наук,
ЗАО «Баромембранные технологии» г. Владимир,
генеральный директор

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»

Защита диссертации состоится «06» июля 2015 года в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, д. 20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета [www. ivgpi.com](http://www.ivgpi.com)

Афтореферат диссертации разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Н. В. Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При строительстве промышленных и гражданских сооружений, дорог и аэродромов в России используется несколько сотен тысяч единиц строительной техники. Силовые агрегаты строительной техники требуют периодической замены смазывающей жидкости с целью продления срока службы и уменьшения износа деталей.

Одним из важных направлений создания ресурсосберегающих технологий при эксплуатации строительной техники является переработка отработанного моторного масла с целью его повторного использования.

В ближайшие годы можно ожидать увеличения количества строительной техники и автомобильного транспорта в целом при одновременном увеличении потребления товарных моторных масел. В настоящее время производство товарного моторного масла в мире оценивается в 15 млн. тонн в год, поэтому в развитых странах Европы и Северной Америки разработаны ряд ресурсосберегающих и организационно-экономических мероприятий, направленных на снижение прироста его потребления.

Существующие и успешно реализованные в настоящее время производства по переработке отработанных масел в Европейском Союзе и США, основанных на химических и физико-химических процессах, требуют больших капитальных вложений и не все из них в полной мере отвечают требованиям малоотходности и экологической безопасности.

Отработанные моторные масла представляют собой сложные многокомпонентные смеси, особенностью которых является наличие в них моюще-диспергирующих присадок. Эти присадки предназначены для предотвращения коагуляции вредных примесей, образующихся в процессе старения моторного масла. Поэтому традиционные способы восстановления моторного масла (фильтрование, сепарация, адсорбция) оказываются малоэффективными.

На сегодняшний день назрела необходимость в создании новых технологических процессов, которые должны проводиться без отрыва от решения проблем по снижению вредного воздействия на окружающую среду.

Одним из активно развивающихся направлений по разделению растворов на компоненты является современные мембранные процессы, которые отличаются высокой селективностью, низкими энергозатратами, простотой аппаратного оформления, служат основой создания малотходных технологий.

Несмотря на технологическую компактность, экономичность и минимальное энергопотребление этих методов, потенциал баромембранных процессов используется не в полной мере.

Причина заключается в недостаточной изученности особенностей взаимодействия мембраны со сложной системой, содержащей асфальто-смолистые соединения, коллоидальные кокс и сажу, различные соли, кислоты, а также металлическую пыль и стружку, минеральную пыль, волокнистые и поверхностно-активные вещества, воду и др. – это является актуальной задачей

при восстановлении свойств и повторном использовании отработанных моторных масел.

Таким образом, способ переработки отработанных моторных масел, основанный на применении баромембранных процессов, является актуальным.

Цель и задачи исследования. Целью работы является создание способа для восстановления физико-химических свойств отработанных моторных масел, содержащих асфальто-смолистые примеси, с помощью ультрафильтрационных мембран, с повторным использованием пермеата и концентрата.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- теоретически и экспериментально обосновать применение ультрафильтрационного процесса с использованием отечественных полимерных полупроницаемых мембран типа УФФК, ПСА, ПС для разделения отработанных моторных масел, содержащих асфальто-смолистые дисперсии;

- определить степень влияния внешних факторов на качественные и количественные характеристики пермеата и концентрата;

- разработать математическое описание влияния перепада давления, температуры и скорости потока разделяемой жидкости на проницаемость мембран;

- разработать математическую модель процесса ультрафильтрации отработанных моторных масел, содержащих асфальто-смолистые компоненты в зависимости от увеличения сопротивления слоя геля на поверхности мембраны от времени ведения процесса разделения;

- разработать технологическую схему и режим разделения отработанных моторных масел на компоненты с получением пермеата (восстановленного базового моторного масла), который можно использовать повторно для производства товарного масла или печного топлива и концентрата (асфальто-смолистых примесей), который можно использовать для производства строительных битумов.

Научная новизна:

1. Проведены экспериментальные исследования процесса регенерации отработанных моторных минеральных масел методом ультрафильтрации и получена зависимость влияния гелевой поляризации на сопротивление переноса дисперсной среды через полимерные полупроницаемые мембраны на основе фторопласта, полисульфоамида и полисульфона.

2. Получена зависимость влияния перепада давления, температуры, скорости течения жидкости над мембраной на проницаемость моторного минерального масла для полупроницаемой полимерной ультрафильтрационной мембраны марки УФФК методом полного факторного эксперимента.

3. Разработана математическая модель разделения отработанных минеральных моторных масел от асфальто-смолистых примесей методом ультрафильтрации, позволяющая рассчитать изменение концентрации асфальто-смолистых примесей и удельной производительности мембран во времени, учитывающая сопротивление слоя геля на границе разделения фаз.

4. Получено уравнение, определяющее потери давления по длине трубчатого мембранного модуля в процессе разделения отработанного моторного масла.

Практическая ценность:

1. На основе математической модели предложена методика инженерного расчета установки для ультрафильтрации отработанного моторного масла.

2. Созданная технология восстановления отработанных моторных масел, содержащих асфальто-смолистые примеси, с повторным использованием пермеата для производства товарного моторного минерального масла или печного топлива позволяет получить ожидаемый экономический эффект для предприятия ООО «Ойл Сервис» около 2 млн. руб. в год.

3. Использование ультрафильтрационной установки приводит к снижению отрицательного воздействия отработанных моторных масел, содержащих токсичные примеси, на окружающую среду. Величина предотвращенного экологического ущерба для предприятия ООО «Ойл Сервис» оценивается в 100 тыс. руб. в год.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Уравнение для определения проницаемости полимерной мембраны на основе фторопласта типа УФФК при разделении сложных дисперсных систем, содержащих асфальто-смолистые компоненты, учитывающее влияние перепада давления, температуры и скорости течения разделяемой жидкости, полученного методом многофакторного эксперимента.

2. Математическую модель ультрафильтрации отработанного моторного масла, позволяющую определить концентрацию асфальто-смолистых примесей и производительность процесса разделения, учитывающую сопротивление слоя геля.

3. Уравнение для определения потерь напора по длине трубчатого мембранного модуля.

4. Основные результаты экспериментального исследования процесса ультрафильтрации отработанного моторного масла с помощью полимерных анизотропных мембран на основе фторопласта, полисульфоамида и полисульфона в виде трубчатых элементов.

5. Способ и устройство для отделения асфальто-смолистых примесей отработанных моторных масел методом ультрафильтрации с использованием отечественных полупроницаемых полимерных мембран на основе фторопласта УФФК, полисульфона ПС, полисульфоамида ПСА, позволяющих использовать полученный пермеат повторно для производства моторных масел или печного топлива, а концентрат – в качестве добавки при производстве строительных битумов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 конференциях:

- XVII, XVIII, XIX, XX, XXI Международных научно-технических конференциях «Информационная среда вуза» (Иваново 2010, 2011, 2012, 2013, 2014);

- Международная научно - практическая конференция «Экология. Риск. Безопасность» (Курган, 2010);
- Международная научно-производственная конференция «Инновации в транспортном комплексе. Безопасность движения. Окружающая среды» (Пермь, 2010);
- Международная научно-практическая конференция «Ауезовские чтения – 10: «20-летний рубеж: инновационные направления развития науки, образования и культуры» (Шымкент, Казахстан, 2011);
- Международная научно-методическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса» (Иваново, 2012);
- Международная заочная научная конференция «Research Journal of International Studies» (Екатеринбург, 2015)

Публикации. По теме диссертации опубликовано двадцать научных статей, в том числе четыре в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. По результатам диссертационной работы получены два патента на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, приложений, списка используемой литературы, включающего 155 наименований. Общий объем работы – 170 страниц машинописного текста, в том числе 161 страница основного текста, 47 иллюстраций, 22 таблицы, 10 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, представлена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе, состоящей из 7 разделов, рассмотрены вопросы современного состояния проблем по восстановлению физико-механических свойств отработанных моторных масел, содержащих асфальто-смолистые компоненты.

Рассмотрены теоретические положения, связанные с механизмом ультрафильтрационного разделения растворов органических соединений в пористой перегородке и методы ведения процесса разделения. Единый процесс для всех мембранных процессов, еще не разработан, поэтому каждый мембранный процесс нужно рассматривать отдельно, так как, механизмы этих процессов могут резко отличаться. Все модели переноса через мембрану были выведены из двух независимых положений: мембрана представляется отдельной фазой, разделяющей две другие – прерывистые модели; мембрана представляется как непрерывная фаза и модель основывается на известном механизме переноса, учитывающем геометрические характеристики структуры мембран.

Первыми моделями для описания процесса ультрафильтрации были пленочная, разработанная У. Боуменом и Ф. Дженнером и конвективной диффузии – П. Бриантом, пришедшие из теории массопереноса в обратном осмосе.

В пленочной теории использовали уравнение проницаемости мембраны и решение одномерного стационарного уравнения диффузии в узком пограничном слое у поверхности мембраны. В последнее решение вводили коэффициент массоотдачи, зависящий от продольной координаты и рассчитываемый по критериальным уравнениям, заимствованным из теории теплопередачи.

В моделях, основанных на теории нестационарной одно- и двухмерной конвективной диффузии и явлении концентрационной поляризации можно увидеть в работах Л. Сонга, М. Элимелеха и др., уравнение материального баланса диффузионного и конвективного потоков частиц у поверхности мембраны, направленных, соответственно, от и к ее поверхности, использовалось в качестве одного из граничных условий.

Подход, не построенный на явлении концентрационной поляризации, а рассматривающий процессы ультрафильтрации и микрофильтрации аналогично процессу традиционной фильтрации частиц через пористые перегородки, представлен во многих работах, которые можно объединить под названием модели последовательных сопротивлений. Он базируется на уравнении Дарси.

Теория массопереноса через мембрану рассматривается в работах Дытнерского Ю. И., Кедеми О., Качальского А., Чураева Н.В, Сурираджана С., Винка Г., Миллигара В., Хванга С., Германса, Гила, Бансала и др. авторов.

На основании литературного обзора сделаны выводы и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведено описание стандартных лабораторных исследований для определения качества отработанных и восстановленных моторных масел по ГОСТам 11362 - 96, 33 – 82, 4333 – 87, 6370 - 83, 26378.1 - 84, 3900 – 85. Предложен ускоренный метод по определению концентрации асфальто-смолистый компонентов в отработанном моторном масле на основе теории светорассеяния частиц примесей в масляном растворе.

В третьей главе приведены теоретические исследования процесса разделения отработанного моторного масла и предложена математическая модель процесса ультрафильтрации в трубчатых мембранах.

Процесс отделения примесей, образующихся в отработанных моторных минеральных маслах, является нестационарным вследствие изменения толщины слоя геля на поверхности мембраны, который влияет на гидродинамику и массообмен процесса. Схема процесса ультрафильтрационного разделения показана на рис.1.

Процесс ультрафильтрации осуществляется путем непрерывного концентрирования исходного раствора при циркуляции его через мембраны, постоянного отвода пермеата и постоянного долива исходного отработанного моторного масла. Полученный концентрат периодически сливается для последующей утилизации.

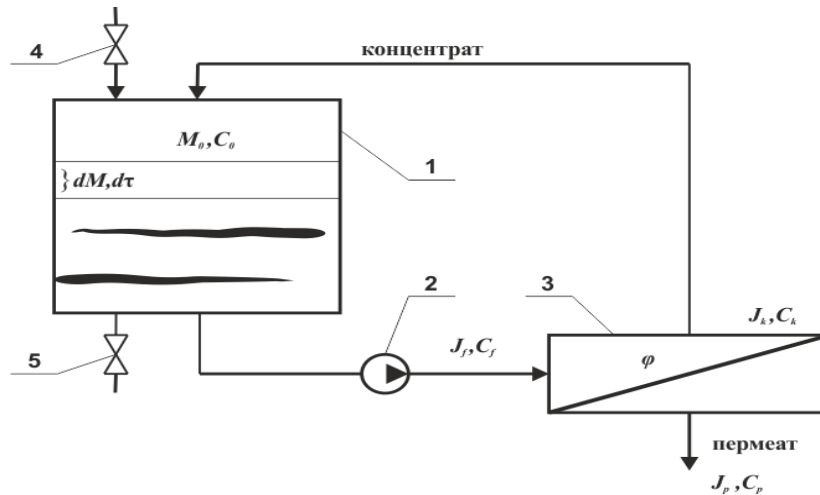


Рис.1. Схема мембранного аппарата: 1- резервуар с отработанным моторным маслом; 2- насос; 3-трубчатый мембранный модуль; 4 – вентиль для заполнения резервуара; 5 – вентиль для отвода концентрата; M_0, C_0 – масса (кг) и концентрация примесей в потоке отработанного масла в резервуаре(кг/кг) в начальный момент времени при $\tau=0$; J_f, J_k, J_p – соответственно массовые расходы масла на входе в мембранный модуль, в концентрате и пермеате (кг/с); C_f, C_k, C_p – соответственно массовые концентрации вредных примесей в потоках масла на входе в мембранный модуль, в концентрате и пермеате; ϕ – коэффициент селективности по вредным примесям; dM – изменение массы масла в резервуаре за единицу времени $d\tau$.

Уравнение материального баланса массовых расходов в резервуаре:

- по растворителю

$$dM = -J_f \cdot d\tau + J_k \cdot d\tau, \quad (1)$$

- по растворенным примесям

$$d(M \cdot C_f) = -J_f \cdot C_f \cdot d\tau + J_k \cdot C_k \cdot d\tau. \quad (2)$$

После математических преобразований получены следующие дифференциальные уравнения для определения:

- производительности

$$\frac{dM}{d\tau} = -G \cdot F_m, \quad (3)$$

- изменения концентрации

$$\frac{dC_f}{d\tau} = \frac{C_f \cdot G \cdot F_m \cdot \phi}{M}, \quad (4)$$

где G - проницаемость мембраны по моторному маслу, кг/(м²·с);

F_m - площадь мембраны, м².

Уравнение, определяющее проницаемость мембран с учетом сопротивления мембраны и примембранного слоя геля, имеет вид

$$G = \frac{\Delta p}{\nu \cdot (R_m + R_2)}, \quad (5)$$

где Δp – перепад давления на мембране, Па;

ν – коэффициент кинематический вязкости моторного масла, $\text{м}^2/\text{с}$;

R_m – сопротивление мембраны, м^{-1} ;

R_2 – сопротивление слоя геля, м^{-1} .

На основании проведенных ранее экспериментов сопротивление слоя геля R_2 является переменной от времени и подчиняется линейной зависимости (рис.6)

$$R_2 = a \cdot \tau + b, \quad (6)$$

где a, b – коэффициенты аппроксимации.

Тогда выражение (5) примет вид

$$G = \frac{\Delta p}{\nu \cdot (R_m + a \cdot \tau + b)}. \quad (7)$$

Уравнения (3) и (4)

$$\frac{dM}{d\tau} = -F_m \cdot \frac{\Delta p}{\nu \cdot (R_m + a \cdot \tau + b)}, \quad (8)$$

$$\frac{dC_f}{d\tau} = C_{f0} \cdot F_m \cdot \varphi \cdot \frac{\Delta p}{M \cdot \nu \cdot (R_m + a \cdot \tau + b)}. \quad (9)$$

После интегрирования выражение для определения изменения производительности процесса примет вид

$$M = M_0 + \frac{F_m \cdot \Delta p}{\nu \cdot a} \cdot \ln \frac{R_m + b}{a \cdot \tau + R_m + b}. \quad (10)$$

Выражение под натуральным логарифмом

$$Z = \frac{R_m + b}{a \cdot \tau + R_m + b}, \quad (11)$$

может быть интерпретировано, как коэффициент, влияющий на изменение производительности процесса ультраfiltrации отработанного моторного масла с учетом образования слоя геля на поверхности мембраны (рис. 2).

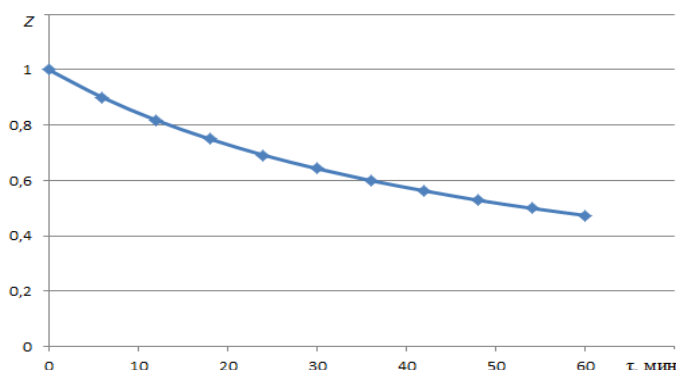


Рис.2. График зависимости функции Z от времени

С помощью стандартного пакета прикладных программ МАТКАД найдено значение первообразной для определения изменения концентрации примесей в виде

$$C_f = -\varphi \cdot C_{f0} \cdot \ln\left(\frac{F_m \cdot \Delta p \cdot \ln Z}{M_0 \cdot a \cdot v} + 1\right). \quad (12)$$

Движущей силой процесса фильтрации является разность давления в мембранном модуле, который можно записать в следующем виде

$$\Delta p = P_H - P_P, \quad (13)$$

где P_H - начальное давление создаваемое насосом над мембраной;
 P_P - давление в пермеате, равное атмосферному.

Трубчатый мембранный элемент представляет собой тонкий канал, в котором разделяемая жидкость имеет высокую скорость потока, что обеспечивает движение в режиме идеального вытеснения. Поэтому давление уменьшается вдоль канала и эффективность модуля снижается. Основной причиной потери давления является гидродинамическое сопротивление у стенок канала. Кроме того, проницание молекул через мембрану дополнительно увеличивает потерю давления в фазе высокого давления над мембраной P_H .

Эффект потери давления становится важным, особенно когда используется длинный тонкий мембранный канал. Для очень длинного канала потери напора могут быть так велики, что давление в сбросном потоке P_K и в пермеате P_P станут равными и проницаемость прекратится.

Для нахождения потери давления по длине канала мембраны можно использовать зависимости, полученные известными специалистами в области мембранных процессов С.-Т. Хвангом и К. Каммермейером, которые предлагают решить систему дифференциальных уравнений, представляющих два модифицированных уравнения материальных балансов и уравнения количества движения. В нашем случае изменение потока по элементу поверхности dS выразится в безразмерной форме:

$$-dJ_k = dJ_p = ds \cdot P \cdot (C_f - C_p), \quad (14)$$

$$-d(J_k C_k) = C_p \cdot dJ_p = \varphi \cdot ds \cdot (C_f - C_p) \quad (15)$$

Уравнение сохранения количества движения примет вид

$$\frac{dP}{ds} = A_p \cdot J_p, \quad (16)$$

где P – безразмерный перепад давления через мембрану, определяемый по формуле (17);

A_p – параметр, отражающий величину потери давления вдоль канала мембраны в безразмерном виде, определяемый по формуле (18).

$$P = \frac{P_H - P_K}{\Delta p}. \quad (17)$$

$$A_p = \frac{8 \cdot \mu \cdot J_f}{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \frac{J_f \cdot C_k \cdot l}{G \cdot \Delta p}, \quad (18)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости разделяемого отработанного моторного масла;

r - радиус пор мембраны;

l - толщина мембраны.

Уравнение Пуазейля остается в силе, т.к. влияние радиального проницания на поле скоростей очень мало. Система дифференциальных уравнений может быть проинтегрирована при следующих граничных условиях:

$$C_f = 1, J_f = 1, J_p = 0 \quad \text{при} \quad s=0, \quad (19)$$

$$P=1 \quad \text{при} \quad s=s_T, \quad (20)$$

где s_T – безразмерная общая поверхность мембраны.

Наиболее общий и простой по технике вычисления для данных дифференциальных уравнений (14 – 16) подходит метод функционального преобразования Лапласа.

Окончательно полное решение дифференциальных уравнений относительно оригиналов для определения потерь давления в зависимости от изменения поверхности разделения примет вид

$$P(s) = \sqrt{A_p} \cdot J_{p0} \cdot sh(\sqrt{A_p} \cdot s), \quad (21)$$

В четвертой главе приведены данные полученные в результате экспериментов, оценка эффективности ультрафильтрации отработанных моторных масел и сделана проверка адекватности опытных и расчетных показателей.

Дано описание и принцип работы лабораторного стенда для изучения внешних факторов, влияющих на процесс ультрафильтрации.

Проведены лабораторные исследования по разделению отработанных моторных масел с изучением влияния на проницаемость и селективность мембран основных параметров ведения процесса ультрафильтрации. Исследованы следующие типы отечественных полупроницаемых полимерных мембран: фторопластовые, полисульфоамидные, полисульфоновые.

Зависимость проницаемости мембран от перепада давления, гидродинамического потока над мембраной в установке и температуры показаны на рисунках 3а, 4а, 5а.

Из графиков на рис.3а видно, что наибольшей проницаемостью обладает мембрана на основе фторопласта УФФК.

Полученные кривые на рис. 3а показывают, что при повышении давления до 0,3МПа у поверхности всех типов мембран образуется слой геля, т.е. концентрация растворенного вещества у границы мембраны становится постоянной и не зависит от рабочего давления. При этом проницаемость становится практически постоянной.

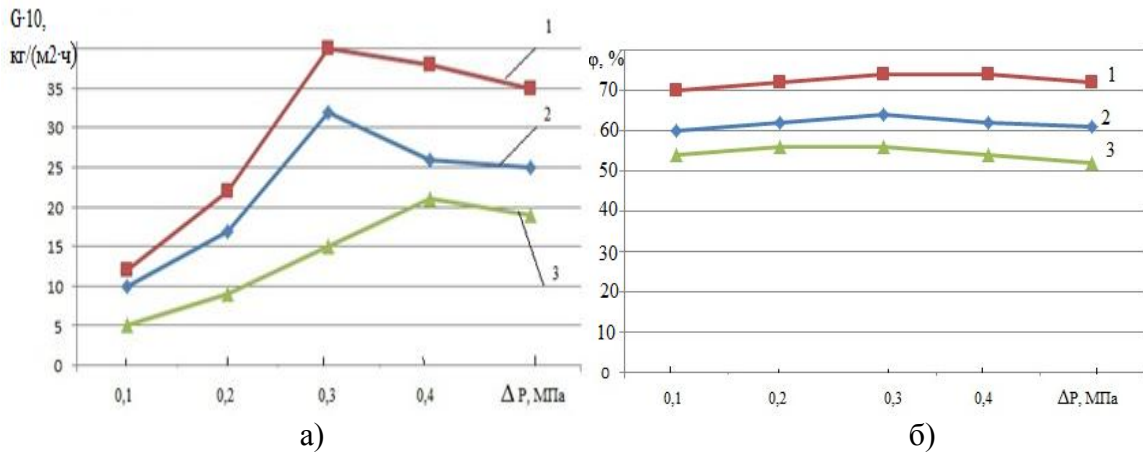


Рис. 3. Влияние перепада давления на ультрафильтрацию отработанных моторных масел, содержащих асфальто-смолистые компоненты при $T=60^{\circ}\text{C}$, $v=2$ м/с: а) проницаемость; б) селективность; 1 - УФФК; 2 – ПСА; 3 – ПС.

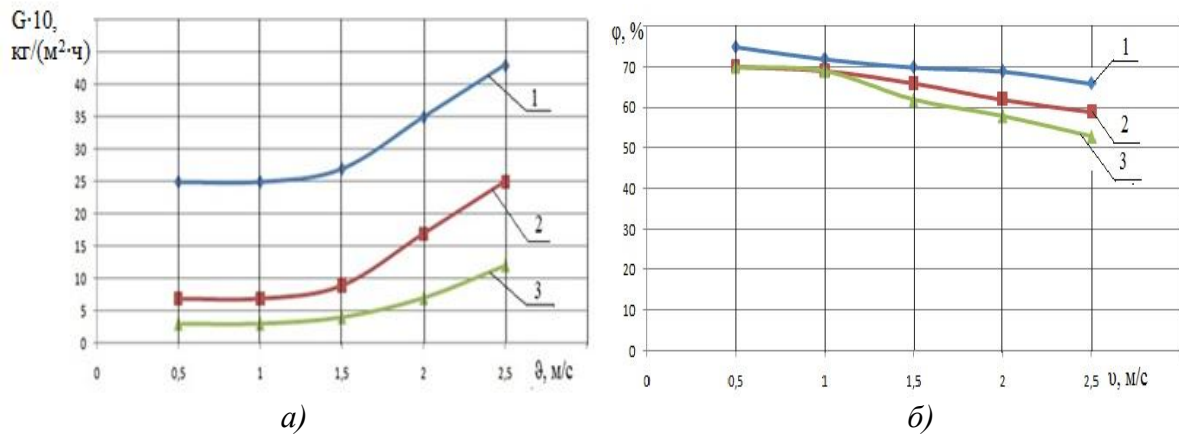


Рис.4. Влияние скорости течения отработанного моторного масла в напорном канале трубчатого мембранного элемента при $T=60^{\circ}\text{C}$, $\Delta P=0,4$ МПа на: а) проницаемость мембран; б) селективность мембран; 1 - УФФК; 2 – ПСА; 3 – ПС

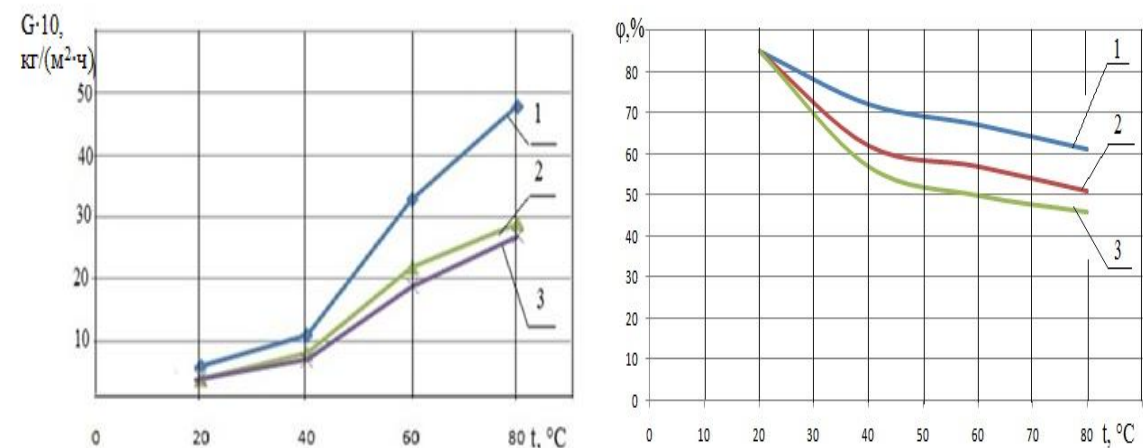


Рис.5. Влияние температуры на ультрафильтрацию отработанных моторных масел, содержащих асфальто-смолистые компоненты при $v=2$ м/с, $\Delta P=0,4$ МПа: а) проницаемость; б) селективность; 1 - УФФК; 2 – ПСА; 3 – ПС.

Изменение селективности мембран от перепада давления, гидродинамического потока над мембраной в установке и температуры показаны на рисунках 3б, 4б, 5б.

Селективность мембран с повышением перепада давления практически не изменяется (рис.3б).

Это можно объяснить тем, что, с одной стороны, увеличение давления должно приводить к интенсификации проникновения примесей через поры, с другой стороны, происходит уплотнение геля в приграничном слое раствор-мембрана, препятствующий проскоку примесей через поры.

Проницаемость мембран на основе фторопласта УФФК достигала значений 0,4 кг/(м²·ч) при селективности 75%, что на 10 - 15% выше соответствующих показателей мембран на основе полисульфонамида ПСА и полисульфона ПС.

Кривые показанные на рис.4б наглядно показывают, что повышение температуры является традиционным методом увеличения удельной производительности мембран, так как при этом снижается вязкость раствора.

Кривые представленные на рис.5б, показывают о снижении селективности мембран по асфальто-смолистым соединениям при увеличении температуры ведения процесса разделения на 27 – 32%, это объясняется разрушением граничных и объемных структур молекул растворенного вещества в базовой среде моторного масла и уменьшению дисперсности примесей.

На кривых, показанных на рис. 4, заметно положительное влияние турбулизации процесса разделения на проницаемость мембран. В среднем проницаемость выросла на 44 %. Полученные зависимости объясняются тем, что с ростом турбулизации происходит выравнивание концентрации примесей в пограничном слое с ядром потока и, как следствие, увеличение движущей силы процесса разделения и увеличению проскока примесей через поры мембраны.

Оптимальные гидродинамические режимы, перепад давления и температура при проведении процесса разделения отработанного моторного масла на компоненты найдены с использованием метода полного факторного эксперимента. Исследования показали, что наиболее эффективным разделением обладает мембрана на основе фторопласта УФФК, которая при $\Delta P=0,4$ МПа, $T=60^{\circ}\text{C}$ и $v=2$ м/с имеет проницаемость 0,37 кг/(м²·ч) и селективность 78 %.

Экспериментально установлено, что с увеличением времени ведения процесса ультрафильтрации возрастает сопротивление геля в пограничном слое мембрана – раствор (рис. 6). Обработка экспериментальных данных позволила получить следующий вид уравнения

$$R_z = 0,16 \cdot \tau + 1,51. \quad (17)$$

Расчетная зависимость (17) проверена на адекватность и получена удовлетворительная сходимость при оптимальных параметрах ведения процесса, полученных ранее.

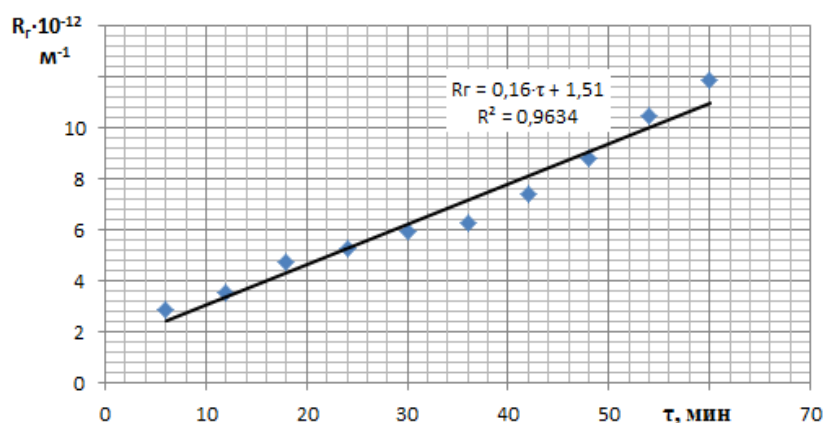


Рис.6. Изменение сопротивления слоя геля на поверхности мембраны УФФК в зависимости от времени при $\Delta P = 0,4$ МПа, $t = 60^\circ\text{C}$, $v = 2$ м/с:

◆ - экспериментальные значения; прямая – расчетные значения

В седьмом разделе третьей главы проверена на адекватность, полученная во второй главе математическая модель процесса разделения отработанных моторных масел на компоненты путем сравнительного анализа экспериментальных и расчетных значений концентрации асфальто-смолистых примесей в исходном резервуаре C_f и удельной производительности J_p за определенные промежутки времени (табл.1 и 2).

Таблица 1 – Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений концентрации асфальто-смолистых примесей в процессе разделения

№ пп	Коэффициент вязкости кинематический ν , сСт	Сопротивление слоя геля $R_s \cdot 10^{-12}$ м ⁻¹	Сопротивление мембраны $R_m \cdot 10^{-12}$ м ⁻¹	Число циклов $n \cdot 10^{-2}$	Время процесса разделения $\tau \cdot 10^{-2}$ с	Расчетная концентрация примесей $C_f^p \cdot 10^3$ кг/кг	Фактическая концентрация примесей $C_f^\phi \cdot 10^3$ кг/кг	Относительная Ошибка δ , %
1	41	2,87	7,13	30	3,6	68	71,24	4,77
2	41,2	3,55	7,13	60	7,2	134	139,07	3,79
3	42,1	4,73	7,13	90	10,8	186	192,99	3,76
4	43,3	5,31	7,13	120	14,4	239	244,78	2,42
5	43,8	5,91	7,13	150	18	287	293,91	2,41
6	45,5	6,29	7,13	180	21,6	333	343,65	3,2
7	46,2	7,44	7,13	210	25,2	375	384,78	2,61
8	47,7	8,81	7,13	240	28,8	416	429,72	3,33
9	49,1	10,46	7,13	270	32,4	454	470,93	3,73
10	50	11,9	7,13	300	36	490	515,83	5,27

Данные табл. 1 представлены на рис.7.

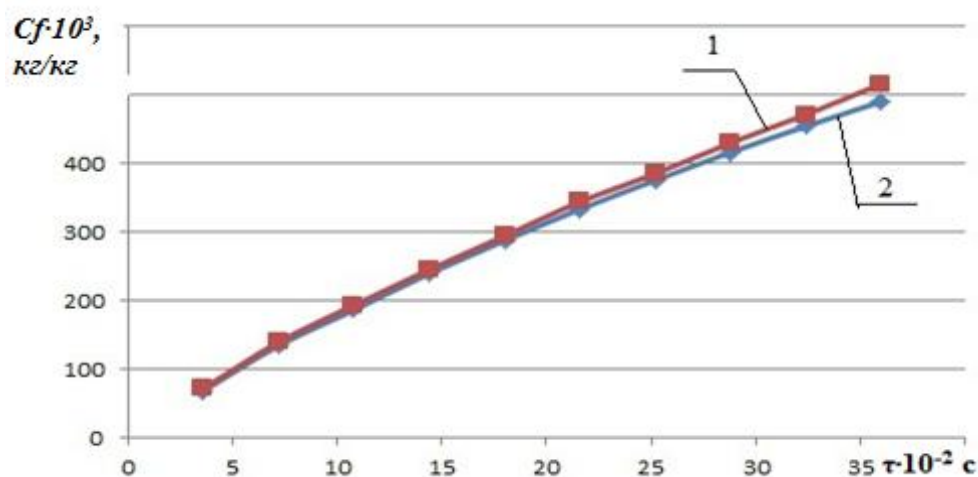


Рис.7. Зависимость концентрации примесей в резервуаре от времени концентрирования: 1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчетная зависимость

Как видно из данных, представленных в табл.1 и рис. 7, разница между фактическими и расчетными значениями концентрации асфальто-смолистых примесей составляет в среднем 3,3%, что подтверждает справедливость использованных для расчета соотношений.

Таблица 2 – Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений производительности ультрафильтрационной установки

№ пп	Коэффициент вязкости кинематический ν , сСт	Проницаемость $G \cdot 10^2$ кг/(м ² ·с)	Площадь разделения $F_m \cdot 10^3$ м ²	Число циклов $n \cdot 10^{-2}$	Время процесса разделения $\tau \cdot 10^{-2}$ с	Расчетная производительность $J_p^p \cdot 10^2$ кг/с	Фактическая производительность $J_p^f \cdot 10^2$ кг/с	Относительная Ошибка δ , %
1	41	15,6	6,13	30	3,6	8,79	8,75	-1,02
2	41,2	14,1	6,13	60	7,2	7,88	7,58	-3,2
3	42,1	12,6	6,13	90	10,8	7,09	6,91	-3,35
4	43,3	11,3	6,13	120	14,4	6,33	6,02	-4,7
5	43,8	10,4	6,13	150	18	5,92	5,59	-5,1
6	45,5	9,4	6,13	180	21,6	5,29	4,97	-6,18
7	46,2	8,7	6,13	210	25,2	4,91	4,56	-6,9
8	47,7	7,9	6,13	240	28,8	4,47	4,16	-7,5
9	49,1	7,3	6,13	270	32,4	4,07	3,78	-7,7
10	50	6,7	6,13	300	36	3,84	3,51	-7,85

Данные таблицы представлены на рис.8.

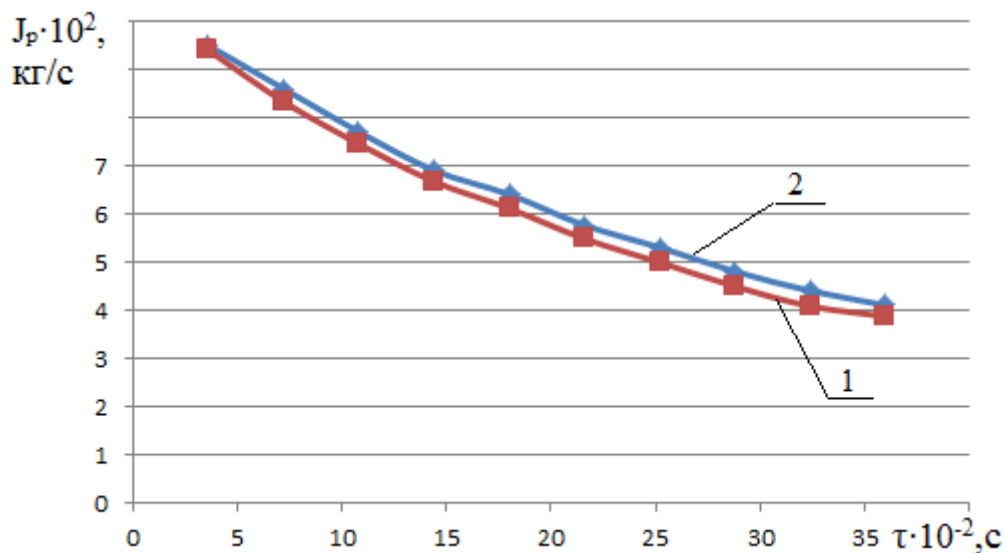


Рис.8. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных производительности процесса ультрафильтрации отработанных моторных масел: 1 – экспериментальная зависимость; 2 – расчетная зависимость

Из табл. 2 и рис.8 видно, что относительная ошибка не превышает 10%, что подтверждает справедливость используемых для расчета соотношений.

На основании проведенных исследований предложена методика расчета установки с использованием трубчатых мембран (рис. 9).

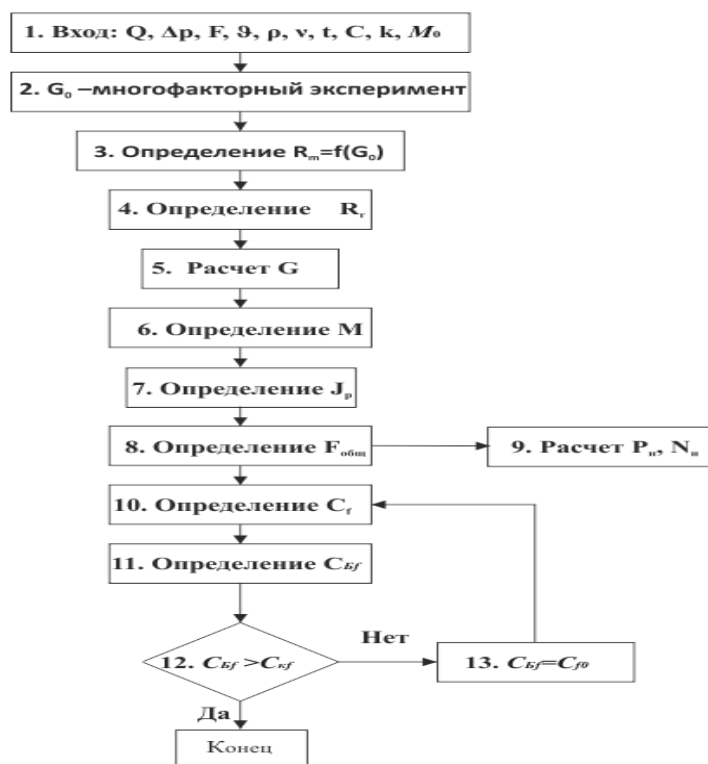


Рис. 9. Блок-схема расчета общей площади $F_{общ}$ поверхности разделения и конечной концентрации асфальто-смолистых примесей $C_{эф}$ ультрафильтрационной установки для регенерации отработанных моторных масел

В методику расчета входит выбор типа мембран, определение оптимальных времени процесса разделения и степени концентрирования, площади рабочей поверхности мембраны, гидравлических потерь, выбор насоса.

Для реализации процесса разделения отработанных моторных масел разработаны и запатентованы две новых ультрафильтрационных мембранных установки (патент РФ 126959 от 20.04.2013 и патент РФ 129926 от 10.07.2013).

Определена экономическая эффективность ультрафильтрационной установки по разделению отработанных моторных масел на компоненты с целью повторного использования восстановленного моторного масла и уменьшения годового ущерба окружающей среде.

ВЫВОДЫ

1. Теоретически и экспериментально доказана целесообразность использования процесса ультрафильтрации на отечественных полупроницаемых полимерных мембранах марок УФФК, ПС, ПСА для разделения отработанных моторных масел с целью получения пермеата в виде чистого базового моторного масла или печного топлива и концентрата с повышенным содержанием асфальто-смолистых примесей.

2. Экспериментально и теоретически обосновано влияние перепада давления в пределах от 0 до 0,5 МПа, скорости потока над мембраной в интервале от 1 до 2,5 м/с и температуры в интервале от 20 до 80°C разделяемой среды на производительность и селективность процесса ультрафильтрации отработанного моторного масла.

3. Получены уравнения, позволяющие определить изменение концентрации асфальто-смолистых примесей и производительность процесса разделения отработанных моторных масел, с учетом сопротивления слоя геля на границе разделения фаз.

4. Получено уравнение для определения потерь напора по длине трубчатого мембранного модуля в процессе разделения отработанного моторного масла.

5. Предложена технологическая схема и методика инженерного расчета восстановления отработанных моторных масел с использованием полупроницаемых мембран на основе фторопласта - марки УФФК, полисульфона – ПС и полисульфоамида - ПСА.

6. Определен ожидаемый экономический эффект ультрафильтрационной установки по очистке отработанных моторных масел для ООО «Ойл Сервис», который составляет около 2,5 млн. руб. в год, из них величина предотвращенного экологического ущерба оценивается в 70 тыс. руб. в год.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

I. Список статей опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Влияние потери давления на процесс ультрафильтрации отработанных моторных масел строительных машин / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Вестник гражданских инженеров. – С. Петербург: Изд-во С.-Петербургского гос. архит. - строит. универ., 2013. - №4. С. 73 – 77.

2. Математическая модель процесса разделения отработанного моторного масла на компоненты ультрафильтрацией / А. В. Маркелов, В. А. Масленников, Ю. П. Осадчий и др. // Приволжский научный журнал. – Н.- Новгород: Изд-во Н.- Новгородского гос. архит. - строит. универ., 2013. - № 3. - С. 39-45. – ISSN 1995-2511.

3. Определение параметров ведения процесса регенерации отработанного моторного масла с помощью мембран на основе экспериментально-статистической модели / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Вестник МГСУ. - М.: МИСИ-МГСУ, 2013. - №2. - С. 73 - 80. - ISSN 1997-0935.

4. Ресурсосберегающая технология при технической эксплуатации строительной техники / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Вестник МГСУ.- М.: МИСИ-МГСУ, 2012. - №2. - С. 104 - 108.- ISSN 1997-0935.

II. Прочие публикации

1. Баромембранное разделение жидких полидисперсных систем / Ю. П. Осадчий, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // «Экология. Риск. Безопасность»: Материалы Междунар. науч. - практ. конф. / Курганский гос. универ. - Курган, 2010. – Т.1 – С. 107.

2. Возможность применения мембран для регенерации отработанных моторных масел / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Информационная среда вуза : Материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. / Ивановский гос. архит. - строит. универ. - Иваново, 2011. – С. 219 -222. - ISBN 978-5-88015-262-9.

3. Задача определения профиля давлений в канале мембраны трубчатого типа при ультрафильтрации отработанного моторного масла строительных машин / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Информационная среда вуза : Материалы XX Междунар. науч.-техн. конф. / Ивановский гос. архит. - строит. универ. - Иваново, 2013.– С. 279 - 283. - ISBN 978-5-88015-249-0.

4. Исследование механизма закупоривания пор полимерных мембран / С. В. Федосов, Ю. А. Осадчий, А. В. Маркелов и др. // Research Journal of International Studies: Материалы XXXV международной заочной научной конференции/ Изд-во Международный научно-исследовательский журнал - Екатеринбург, 2015. - №.1(32). – Ч.3. - С. 18 – 20. – ISSN 2303-9868.

5. Маркелов, А. В. Метостабильность моторных масел в процессе эксплуатации в двигателях внутреннего сгорания / А. В. Маркелов, Ю. П. Осадчий, В. А. Масленников // Информационная среда вуза : Материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. / Ивановский гос. архит. - строит. универ. - Иваново, 2010.– С. 279 - 283. - ISBN 978-5-88015-249-0.

6. Маркелов, А. В. Обоснование периодичности технических обслуживаний рабочих элементов установок для фильтрации технических жидкостей / А. В. Маркелов, Ю. П. Осадчий, В. А. Масленников // Информационная среда вуза :

Материалы XVIII Междунар. Науч.-техн. конф. / Ивановский гос. архит. - строит. универ. - Иваново, 2011. – С. 222 - 227. - ISBN 978-5-88015-262-9.

7. Маркелов, А. В. Обоснование периодичности технических обслуживаний фильтрационных установок при экспоненциальном законе изменения пропускной способности рабочих элементов / А. В. Маркелов, Ю. П. Осадчий, В. А. Масленников // Ауезовские чтения – 10: «20-летний рубеж: инновационные направления развития науки, образования и культуры» : Труды Междунар. науч.-практ. конф. / Юж.- Казахстанский гос. универ. - Шымкент, Казахстан, 2011. – Т.7– С. 70 - 72. - ISBN 9965-870-55-1.

8. Маркелов, А. В. Локальные технологии для разделения водомасленных эмульсий / А. В. Маркелов, Ю. П. Осадчий, Яги Абдалмути Камаль // Информационная среда вуза : Материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. / Ивановский гос. политехнический универ. - Иваново, 2014.– С. 344 - 346. - ISBN 978-5-88015-249-0.

9. Материальный баланс процесса разделения отработанного моторного масла от примесей на мембранной установке трубчатого типа / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Информационная среда вуза : Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. / Ивановский гос. архит. - строит. универ. - Иваново, 2012. - С. 868 - 870. - ISBN 978-5-88015-269- 8.

10. Метод разделения жидких полидисперсных систем / Ю. П. Осадчий, И. В. Морозов, А. В. Маркелов и [др.] // Актуальные проблемы и перспективы развития агропромышленного комплекса : Материалы Междунар. науч.- метод. конф. / Ивановская гос. сельско-хоз. академия им. академ. Д.К. Беляева. - Иваново, 2012. – Т.1 - С. 332 - 334.

11. Микрофильтрационное разделение жидких полидисперсных систем / Ю. П. Осадчий, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Ауезовские чтения – 10: «20-летний рубеж: инновационные направления развития науки, образования и культуры» : Труды Междунар. науч.- практ. конф. / Юж. - Казахстанский гос. универ. - Шымкент, Казахстан, 2011. – Т.1 - С. 90 - 91. - ISBN 9965-870-55-1.

12. Поверхностные явления на межфазной границе масло-вода / Ю. П. Осадчий, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Ауезовские чтения – 10: «20-летний рубеж: инновационные направления развития науки, образования и культуры» : Труды Междунар. науч. - практ. конф. / Юж. - Казахстанский гос. универ. - Шымкент, Казахстан, 2011. – Т.7 - С. 92 - 93. - ISBN 9965-870-55-1.

13. Применение микрофильтрации при разделении жидких полидисперсных систем / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Инновации в транспортном комплексе. Безопасность движения. Окружающая среда : Материалы Междунар. науч.-произв. конф. / Пермский гос. технолог. универ. - Пермь, 2010. – С. 232.

14. Разделение эмульсий ультрафильтрацией / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Информационная среда вуза : Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. / Ивановский гос. архит. - строит. универ. - Иваново, 2012. - С. 344 - 349. - ISBN 978-5-88015-269-8.

15. Физико-химические свойства межфазной поверхности система масло-вода / С. В. Федосов, В. А. Масленников, А. В. Маркелов и др. // Информационная среда вуза : Материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. / Ивановский гос. архит. - строит. универ. - Иваново, 2010. – С. 608 - 611. - ISBN 978-5-88015-249-0.

16. Экспериментально-статистическая модель фильтрования отработанного моторного масла в процессе его восстановления / В. А. Масленников, Ю. П. Осадчий, А. В. Маркелов и др. // Аграрный вестник ВерхнеВолжья. – Иваново: Изд-во Ивановской гос. сель.-хоз. академ. им. академ. Д. К. Беляева. - 2013. - №2. - С. 48-52. – ISSN 2307-5872.

III. Список изобретений

1. Пат. 129926 Российская федерация, МПК В01D 36/00 (2006.01). Мембранное устройство для регенерации отработанных масел / А. В. Маркелов, А. В. Постников, Ю. П. Осадчий и [др.]; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет» (ИГХТУ), RU - № 2013100584/04; заявл. 09.01.2013.; опубл. 10.07.2013, Бюл. №19. – 2 с.: ил.

2. Пат. 126959 Российская федерация, МПК В01D 63/00 (2006/01). Ультрафильтрационная установка для разделения и очистки отработанных масел / А. В. Маркелов, А. В. Постников, С. В. Федосов и [др.]; заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» (ИГЭУ), (RU) - № 2012145713/05; заявл. 25.10.2012; опубл. 20.04.2013, Бюл.№ 11. – 4 с.: ил.