

На правах рукописи



Пшениснов Никита Анатольевич

**ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ОЧИСТКИ НА
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБИННОГО МАСЛА В СИСТЕМАХ
МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ТУРБОАГРЕГАТОВ**

2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск – 2024

Работа выполнена на кафедре «Промышленная теплоэнергетика» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:

Осинцев Константин Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Промышленная
теплоэнергетика» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ»,
г. Челябинск

Официальные оппоненты:

Сосновский Андрей Юрьевич,
доктор технических наук, заместитель
технического директора Инженерного центра
ООО «УК Теплоэнергосервис» по
турбоустановкам, г. Екатеринбург

Желонкин Николай Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Турбины и двигатели» ФГАОУ ВО
«УрФУ имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и
технологий», г. Уфа

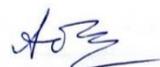
Защита диссертации состоится «25» сентября 2024 г., в 13:00 часов, на заседании диссертационного совета 24.2.437.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В. И. Ленина, 76, ауд. 1001. Тел./факс: (351) 267-93-06, e-mail: dc242437-09@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», <https://www.susu.ru/ru/dissertation/24243709-d-21229809/pshenisnov-nikita-anatolevich>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, на имя ученого секретаря диссертационного совета 24.2.437.09, e-mail: dc242437-09@mail.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.437.09,
доктор технических наук, доцент



Абызов А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из важнейших, но недооцененных факторов, влияющих на работу турбин (как паровых, так и газовых) и других механизмов, является состояние масла, особенно его «механическая» чистота (наличие твердых частиц).

Экспериментальные исследования показывают, что коэффициент трения в подшипниках существенно изменяется даже при низких концентрациях твердых частиц. В результате увеличения силы трения значительно повышается температура подшипника, что в свою очередь влияет на вязкость смазки и, следовательно, сильно воздействует на характеристики подшипников. Воздействие твердых загрязнений проявляется в виде интенсивного абразивного износа и эрозии деталей агрегатов, заедания клапанов, золотников и других подобных элементов. Загрязнения вызывают явление застойной нечувствительности, закупоривают дроссельные шайбы, заклинивают золотники. При загрязнении рабочих жидкостей гидросистем усилия, необходимые для перемещения золотников распределителей, возрастают в десятки и сотни раз по сравнению с чистой жидкостью.

Наиболее частым нарушением условий эксплуатации и причиной ухудшения всех остальных показателей качества масла является его обводнение, которое способствует резкому увеличению скорости протекания окислительных процессов – в 3-5 раз, росту содержания агрессивных водорастворимых кислот в 40-50 раз, увеличению коррозионной активности. Эти же продукты способствуют ухудшению деаэрирующей способности турбинных масел. Продукты окисления растворяют цветные металлы сеток фильтров маслобака. Цветные металлы и продукты коррозии являются катализаторами окислительных процессов в масле.

Усилие трогания неподвижного золотника системы регулирования при эксплуатации турбинного масла с кислотностью 0,114 мг КОН/г и 0,3% воды больше, чем на сухом масле в 60 раз. В ряде случаев турбинное масло при обводнении образует стойкие эмульсии, в результате чего ухудшаются его смазочные свойства.

Анализ отказов, дефектов, повреждений энергетического оборудования свидетельствует, что до 25% инцидентов связаны с нарушениями в системе маслоснабжения и качества турбинного масла. Производственный опыт показывает, что лишь за счет качественной очистки рабочей жидкости долговечность гидравлических систем и оборудования увеличивается в 2-3 раза.

Проблема повышения качества регулирования частоты электрического тока, надежности и долговечности энергетического оборудования не может быть решена без совершенствования методов и средств очистки турбинного масла, регламентации уровня чистоты, его контроля и анализа основных источников и причин загрязнения потоков рабочей жидкости, например, с помощью приборов контроля чистоты жидкости ПКЖ-904 и счетчиков частиц зарубежных

компаний, таких как Pamas, Spectro и т.д. Они позволяют: контролировать рабочую жидкость в системах маслоснабжения в процессе работы, при промывке и заправке; оперативно управлять технологическими процессами очистки масла и промывки системы; дать объективную оценку качества ремонта, наладки и уровня эксплуатации путем анализа проб масла, отобранных в различных точках работающей системы.

Актуальность темы диссертации подтверждается ее соответствием направлению Стратегии развития Российской Федерации, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года». Работа по модернизации фильтров маслобака получила грант от Фонда содействия инновациям.

Степень разработанности темы. Исследование процессов загрязнения и очистки рабочих жидкостей проводилось отечественными авторами: Казанский В.Н., Жужиков В.А., Лейчикс И.М., Торопов Е.В., Петриченко А.Д., Вакуров В.В, Барышев В.И., Рыбаков К.В., Коновалов В.М. и др. и зарубежными: Cole P.W., Broeder J. J., Heijnkemp J. W., Collins K., Winslow R., Wantanabe S., K. Andy Young, Wojciech Majka, Tomas Klima и др. Стоит отметить, в работах указанных авторов не было представлено аналитической зависимости параметров чистоты, загрязнения и очистки турбинных масел в системах маслоснабжения турбоагрегатов. В качестве фильтровальных перегородок в фильтрах главного масляного бака (ГМБ), согласно требованиям заводов-изготовителей, используют латунные тканые проволочные сетки квадратного плетения (ГОСТ 6613-86), которые, как правило, не обеспечивают нормативную чистоту. Острая необходимость выполнения работ по повышению чистоты турбинного масла была вызвана постоянными отказами в системе регулирования турбины Т-180/210-130-1 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3.

Объект исследования: система маслоснабжения паровой турбины тепловой электростанции.

Предмет исследования: закономерности процессов загрязнения и очистки турбинных масел, протекающих в системах маслоснабжения паровых турбин.

Цель работы: исследование влияния процессов загрязнения и очистки на характеристики турбинного масла в системах маслоснабжения турбоагрегатов и повышение его чистоты за счет применения новых методов контроля и фильтрования рабочих жидкостей.

Задачи исследования:

1. Разработать и освоить экспресс-метод для систематического контроля промышленной чистоты турбинного масла и содержания в нем эмульгированной воды.
2. Разработать программное обеспечение для контроля за состоянием оборудования и систематизации данных, полученных в результате анализа проб масла.

3. Математически описать зависимость степени чистоты рабочей жидкости в системе маслоснабжения турбоагрегата от процессов загрязнения и очистки.

4. Определить влияние воздуха, диспергированного в масле на чистоту фильтрата в системе маслоснабжения турбоагрегата.

5. Определить необходимый (нормативный) класс чистоты турбинного масла для совмещенных систем смазки подшипников и регулирования турбин по ГОСТ 17216-2001 «Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей».

6. Осуществить подбор фильтровального материала для фильтров маслобака турбоагрегата и повысить эффективность очистки турбинного масла.

7. Разработать алгоритм поиска источников повышенного загрязнения турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегата.

8. Оценить экономический эффект от внедрения мероприятий по очистке масла и контролю чистоты.

Научная новизна:

1. Разработана методика экспресс-анализа чистоты турбинного масла на базе отечественного прибора ПКЖ-904, отличающаяся тем, что позволяет производить анализ обводненных турбинных масел, в частности определить промышленную чистоту, оценить количество эмульгированной воды и предотвратить доступ загрязнений в пробу масла при ее измерении автоматическим счетчиком частиц.

2. Впервые разработана математическая модель, позволяющая производить оценку уровня чистоты рабочей жидкости в системе маслоснабжения турбоагрегата в зависимости от скорости поступления загрязнений и эффективности очистки.

3. В ходе экспериментальных работ на натуральных объектах впервые определено влияние воздуха, диспергированного в масле, на чистоту фильтрата в системе маслоснабжения турбоагрегата.

Теоретическая значимость работы:

1. Разработан алгоритм, позволяющий определить источники повышенного загрязнения турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегата. (Справка об использовании результатов диссертационного исследования в учебном процессе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»).

2. Разработаны рекомендации по классу чистоты турбинного масла для совмещенных систем смазки подшипников и регулирования турбин по ГОСТ 17216-2001. (Справка об использовании результатов диссертационного исследования в учебном процессе кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» по дисциплине Паровые турбины тепловых электрических станций).

Практическая значимость работы:

1. Проведена модернизация фильтров маслобака, получены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность применения полиамидных фильтровальных материалов. (Справка об использовании результатов диссертационного исследования на ООО «Мечел-Энерго» №52 от 08.04. 2024)

2. Разработано программное обеспечение для систематизации результатов измерений чистоты турбинного масла (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617923 «Программа для определения и контроля промышленной чистоты турбинного масла»).

Методология и методы диссертационного исследования. В диссертации использованы основные теоретические положения теории фильтрования. Расчеты, выполнены средствами программы Microsoft Excel, MathCad. Для создания программного обеспечения использовалась программа Visual Studio и язык программирования C#. Для проведения испытаний использовался прибор контроля чистоты жидкости ПКЖ-904, зарегистрированный в Госреестре средств измерений под №11306-88. Верификация разработанных математических моделей и подбор фильтровального материала для фильтров маслобака выполнены на основании полученных результатов экспериментальных исследований на турбоагрегатах К-200-130 ЛМЗ, Т-180/210-130-1 ЛМЗ, ПТ-60-130/13 ЛМЗ, Т-100-130 ТМЗ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика экспресс-анализа чистоты турбинных масел с использованием прибора ПКЖ-904.

2. Математическая модель зависимости чистоты рабочей жидкости в системе маслоснабжения турбоагрегата от процессов загрязнения и очистки, а также данные экспериментальной проверки.

3. Экспериментальные данные о влиянии воздуха, диспергированного в масле, на чистоту фильтрата в системе маслоснабжения турбоагрегата.

4. Экспериментальные данные, подтверждающие эффективность применения полиамидных фильтровальных материалов в фильтрах маслобака.

5. Алгоритм поиска источников повышенного загрязнения турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегата с помощью метода экспресс-анализа.

Личное участие автора. Заключается в постановке целей и задач исследований, проведении экспериментальных исследований, выполнении всех необходимых расчетов, разработке математических моделей, обобщении результатов экспериментальных и численных исследований, разработке рекомендаций по использованию результатов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечивается применением современного оборудования с высокой точностью измерений, воспроизводимостью результатов экспериментов. Основные результаты исследований, приведенные в диссертации, докладывались на: Международной научно-технической конференции «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере студентов, аспирантов, ученых», Челябинск, 2022, 2023, 2024 г.; Международной конференции «Промышленный инжиниринг 2023», Сочи, 2023 г. Результаты научно-исследовательской работы были внедрены на Челябинской ТЭЦ-2, Челябинской ТЭЦ-3, Южноуральской ГРЭС, ООО «Мечел-Энерго», ТЭЦ Монди СЛПК, Харанорской ГРЭС (АО «Интер РАО – Электрогенерация»), Тольяттинской ТЭЦ (ПАО «Т Плюс»), АО «Ново-Кемеровская ТЭЦ» (ООО «Сибирская генерирующая компания»), АО «Барнаульская генерация» (ООО «Сибирская генерирующая компания»), филиал «Нижегородский» ПАО «Т Плюс».

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 2 статьи – в журналах, включенных в перечень ВАК, 4 статьи в иных изданиях. Получено 1 Свидетельство о регистрации программы ЭВМ №2023617923 «Программа для определения и контроля промышленной чистоты турбинного масла».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует специальности 2.4.7 – «Турбомашин и поршневые двигатели»:

- п. 1: «Разработка научных основ и экспериментальные исследования термодинамических, механических, тепло- и массообменных, физико-химических, гидрогазодинамических процессов в турбомашин и поршневых двигателях, исследования общих свойств и принципов функционирования отдельных систем, элементов, вспомогательного оборудования турбомашин и поршневых двигателей»;

- п. 4: «Совершенствование систем управления, регулирования, мониторинга технического состояния, диагностирования и контроля показателей функционирования турбомашин, поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования».

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня условных обозначений, списка литературы и 5 приложений. Весь материал изложен на 196 страницах, включая 56 рисунков, 41 таблицу, 35 формул и библиографический список, содержащий 152 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* выделена актуальность темы исследования и его практическая значимость, обозначены цель и задачи исследования, его новизна, а также методология и основные положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* сделан критический анализ опубликованных работ по стандартизации чистоты жидкости, методам определения загрязненности промышленных жидкостей и автоматическим счетчикам частиц. Представлены теоретические сведения о системах маслоснабжения паровых турбин и современных средствах очистки турбинного масла. Для очистки турбинного масла систем маслоснабжения отечественных турбоагрегатов используют многоступенчатые сетчатые фильтры, которые устанавливают в главном масляном баке (рисунок 1).

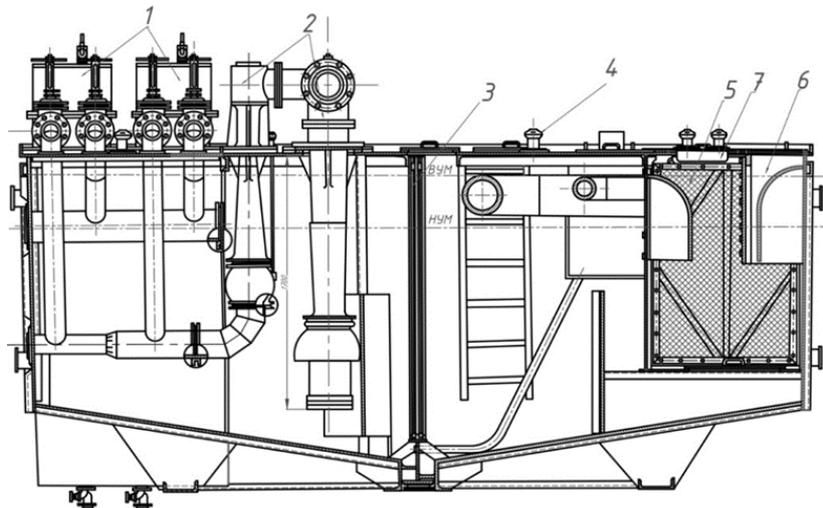


Рисунок 1 – ГМБ паровой турбины объемом 22 м³:

- 1 – маслоохладитель; 2 – инжекторная группа; 3 – двухступенчатый фильтр тонкой очистки; 4 – дефлектор; 5 – двухступенчатый фильтр грубой очистки; 6 – сито для заливки масла; 7 – приемный отсек; ВУМ – верхний уровень масла; НУМ – нижний уровень масла

В работе представлен обзор на работы таких авторов, как Казанский В.Н., Жужиков В.А., Лейчикс И.М., Торопов Е. В., которыми были предложены методы контроля и очистки рабочих жидкостей.

Во *второй главе* представлена методология исследования чистоты турбинного масла в системах маслоснабжения турбоагрегатов.

Разработана методика экспресс-анализа чистоты турбинного масла. Сформулированы ее цели и задачи.

Наличие твердых загрязнений в масле является естественным состоянием рабочей жидкости, так как они генерируются самой системой маслоснабжения (тяжело нагруженными сопряженными парами трения – подшипниками и т.д.), а мягкие частицы вследствие аэрации масла и попадания воды и (или) водяного пара в систему.

Разработчиком и производителем отечественного прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904 является авиационная и аэрокосмическая промышленность. При внедрении его в энергетику необходимо было решить ряд проблем. Особое внимание при разработке метода уделялось точности и воспроизводимости измерений оптическими счетчиками частиц. При обнаружении отклонений от нормы или при невозможности воспроизвести подсчеты, подозрение часто падает на неисправность датчиков, пробоотборников, счетчиков, лазеров и других чувствительных электронных компонентов. Изучение существующих методик, показывает, что 80% всех зарегистрированных проблем со счетчиками частиц можно отнести к неправильному отбору и загрязнению проб. Источник отклонений обычно находится в подготовке проб, процедурах подсчета и факторах окружающей среды. Тщательный анализ используемых процедур отбора проб и методов подсчета частиц позволил исключить наиболее типичные источники загрязнения проб. Тем самым обеспечивается представительность анализа, а информация о количестве частиц разного размера во всем объеме пробы является полной и статистически воспроизводимой. Попадание воды в масло – распространенное явление при эксплуатации паровых турбин. В случае гидрофобной жидкости, такой как смазка на минеральной основе, влага мешает обычному подсчету частиц. Метод позволяет определять промышленную чистоту турбинного масла, а также оценить количество эмульгированной воды в нем.

На рисунке 2 изображена схема установки для экспресс-контроля чистоты на базе прибора ПКЖ-904.

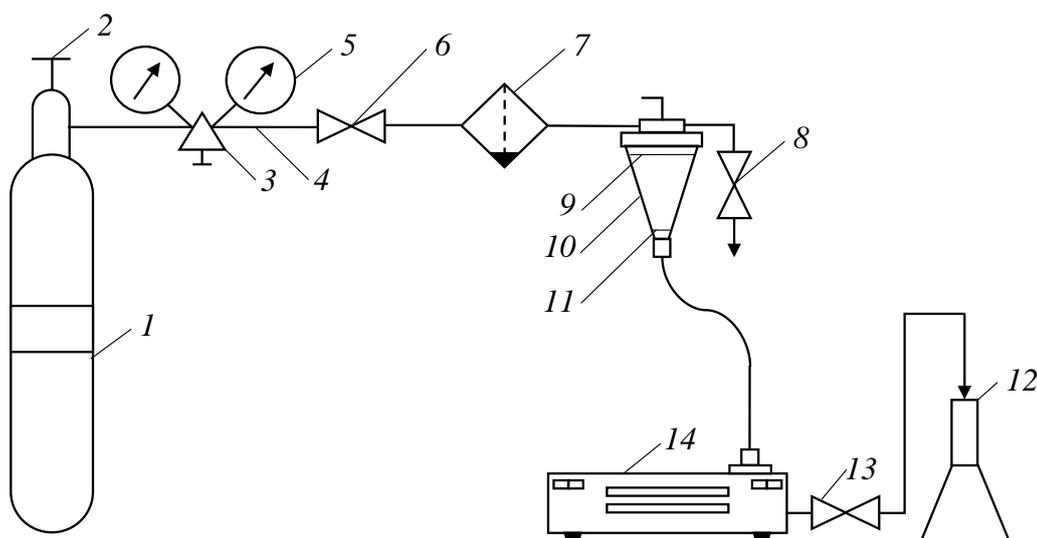


Рисунок 2 – Схема подсоединения прибора ПКЖ-904 для контроля отдельных проб масла:
 1 – баллон со сжатым газом; 2 – вентиль запорный; 3 – газовый редуктор; 4 – шланг;
 5 – манометр; 6 – кран подачи газа; 7 – воздушный фильтр; 8 – воздушник; 9 – верхняя
 кольцевая отметка; 10 – воронка прибора; 11 – нижняя кольцевая отметка; 12 – мензурка;
 13 – кран прибора; 14 – прибор ПКЖ-904

Для записи и систематизации данных полученных в результате анализа проб масла было разработано программное обеспечение.

Во второй главе также представлена математическая модель зависимости чистоты рабочей жидкости в системе маслоснабжения турбоагрегата от процессов загрязнения и очистки.

Загрязняющие примеси поступают в масло извне и образуются непосредственно в объеме рабочей жидкости, а удаляются из него фильтрами. Скорость поступления внешних загрязнений, таких как продукты износа сопряженных пар трения, атмосферная пыль и т.д., при установившемся режиме работы турбоагрегата и неизменности внешних условий можно считать постоянной и не зависимой от работы масляной системы.

Эффективность работы фильтра можно оценить коэффициентом пропускания частиц W_i – i -й фракции:

$$W_i = 1 - \varphi_i, \quad (1)$$

где φ_i – фракционный коэффициент отфильтровывания, характеризующий степень снижения штучной концентрации частиц отдельной фракции,

$$\varphi_i = \frac{N_{iu} - N_{if}}{N_{iu}}, \quad (2)$$

N_{iu}, N_{if} – число частиц i -й фракции в жидкости до и после фильтра.

Поступление твердых частиц i -й фракции в рабочую жидкость за одну прокачку ее через циркуляционный контур системы смазки паровой турбины составляет $N_i = const$.

Число твердых частиц i -й фракции в масле на сливе после прокачивания всего количества жидкости через систему маслоснабжения 1, 2, ... и n раз определим по формулам:

$$N_{i1} = N_{i0} \cdot W_i + N_i; \quad (3)$$

$$N_{i2} = N_{i0} \cdot W_i^2 + N_i \cdot W_i + N_i; \quad (4)$$

...

$$N_{in} = N_{i0} \cdot W_i^n + N_i \cdot W_i^{n-1} + N_i \cdot W_i^{n-2} + \dots + N_i \cdot W_i + N_i, \quad (5)$$

где N_{i0} – начальное число частиц i -й фракции в рабочей жидкости, залитой в гидросистему.

Разделив обе части уравнения (5) на N_i , получим уравнение в безразмерной форме

$$\frac{N_{in}}{N_i} = \frac{N_{i0}}{N_i} \cdot W_i^n + W_i^{n-1} + W_i^{n-2} + \dots + W_i + 1. \quad (6)$$

Остаток степенного ряда $(W_i^{n-1} + W_i^{n-2} + \dots + W_i + 1)$ быстро сходится при $W_i < 1$, т.е. при работе фильтра в маслосистеме, и расходится при $W_i = 1$, когда масло не фильтруется. Первый член ряда при $W_i < 1$ стремится к нулю при $n \rightarrow \infty$; таким образом, сумма ряда в области сходимости есть $\frac{1}{1-W_i}$, а

$$N_{in} = \frac{N_i}{1-W_i}. \quad (7)$$

Число твердых частиц i -й фракции в фильтрате определяется по формуле

$$N_{if} = N_i \cdot \frac{W_i}{1-W_i}, \quad (8)$$

следовательно, поступление твердых частиц i -й фракции в рабочую жидкость

$$N_i = N_{in} - N_{if}. \quad (9)$$

Фильтр удаляет загрязняющие вещества так же быстро, как они генерируются. Количество частиц, попадающих в масляную систему, равно количеству частиц, улавливаемых фильтром; таким образом достигается стабилизированный и контролируемый уровень чистоты масла.

Зависимость между классами чистоты рабочей жидкости гидросистем по ГОСТ 17216-2001 и поступлением твердых частиц загрязнений N_i для различных значений W_i (коэффициента пропуска частиц размерной группы 10-25 мкм, оказывающих основное влияние на снижение показателей надежности агрегатов гидросистем) показана на рисунке 3.

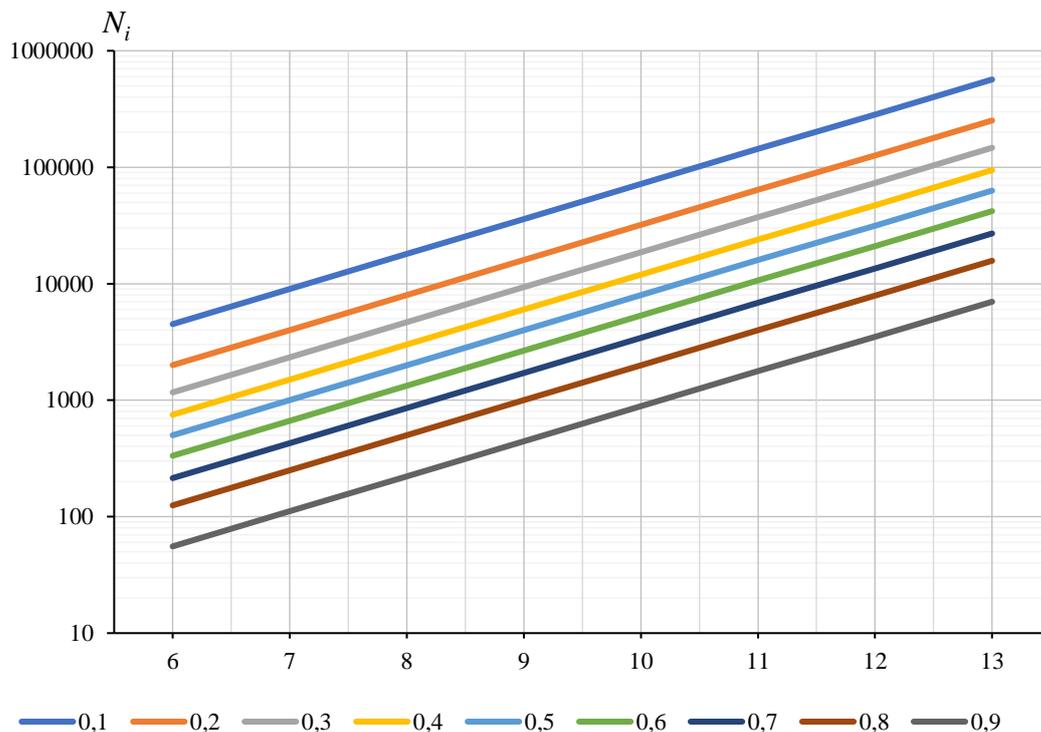


Рисунок 3 – Зависимость между классами чистоты масла от поступления твердых частиц N_i размером 10-25 мкм для различных W_i : 0,1-0,9 – коэффициент пропускания частиц 10-25 мкм; N_i – поступление твердых частиц загрязнений 10-25 мкм в каждые 100 мл рабочей жидкости (l_g); 6-13 – классы чистоты по ГОСТ 17216-2001

В работе анализируется эффективность фильтров маслобака. Последовательно установленные фильтры позволяют уменьшить коэффициент пропускания частиц i -й фракции.

Число частиц в заданном интервале размеров после первой, второй, ... и n -й ступеней фильтрования определяют по формулам:

$$N_{if1} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i1}); \quad (10)$$

$$N_{if2} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i1}) \cdot (1 - \varphi_{i2}); \quad (11)$$

...

$$N_{ifn} = N_{iu} \cdot \prod_{n=1}^{\infty} (1 - \varphi_{in}). \quad (12)$$

Коэффициент пропускания частиц при многоступенчатом фильтровании можно вычислить по выражениям

$$W_i = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - \varphi_{in}); \quad (13)$$

$$W_i = \prod_{n=1}^{\infty} W_{in}. \quad (14)$$

При условии $\varphi_{in} = \text{const}$ ($W_{in} = \text{const}$) формулы (13) и (14) приобретают вид

$$W_i = (1 - \varphi_{in})^n; \quad (15)$$

$$W_i = W_{in}^n. \quad (16)$$

Зависимость коэффициента пропускания твердых частиц W_i многоступенчатого фильтра от коэффициента пропускания ступени W_{in} при различном количестве ступеней фильтрования n показана на рисунке 4.

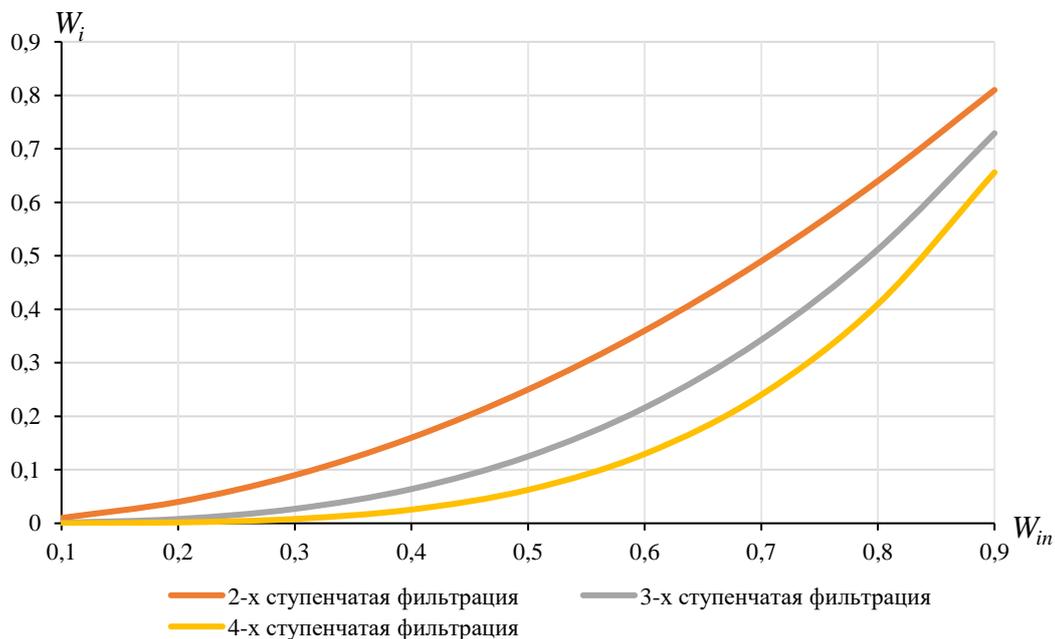


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента пропускания твердых частиц W_i многоступенчатого фильтра от W_{in} ступени для различных значений количества ступеней фильтрования n

Эффективность последовательно установленных фильтров определяется степенной функцией, в которой основанием является коэффициент пропускания частиц n -й ступени W_{in} (при условии $W_{in} = \text{const}$ для всех ступеней фильтрования), а показателем – количество ступеней фильтрования n .

В условиях многоступенчатого фильтрования число твердых частиц i -й фракции в фильтрате (при условии $W_{in}=const$ для всех ступеней фильтрования)

$$N_{ifn} = N_i \frac{W_{in}^n}{1-W_{in}^n}. \quad (17)$$

Кратность уменьшения количества твердых частиц в фильтрате в зависимости от количества ступеней фильтрования n определяется по формуле

$$m = \frac{N_{if1}}{N_{ifn}} = \frac{1-W_{in}^n}{W_{in}^{n-1}-W_{in}^n}, \quad (18)$$

где N_{if1} – число твердых частиц i -й фракции в фильтрате в условиях одноступенчатого фильтрования.

Зависимость показателя m от W_{in} для n ступеней фильтрования показана на рисунке 5.

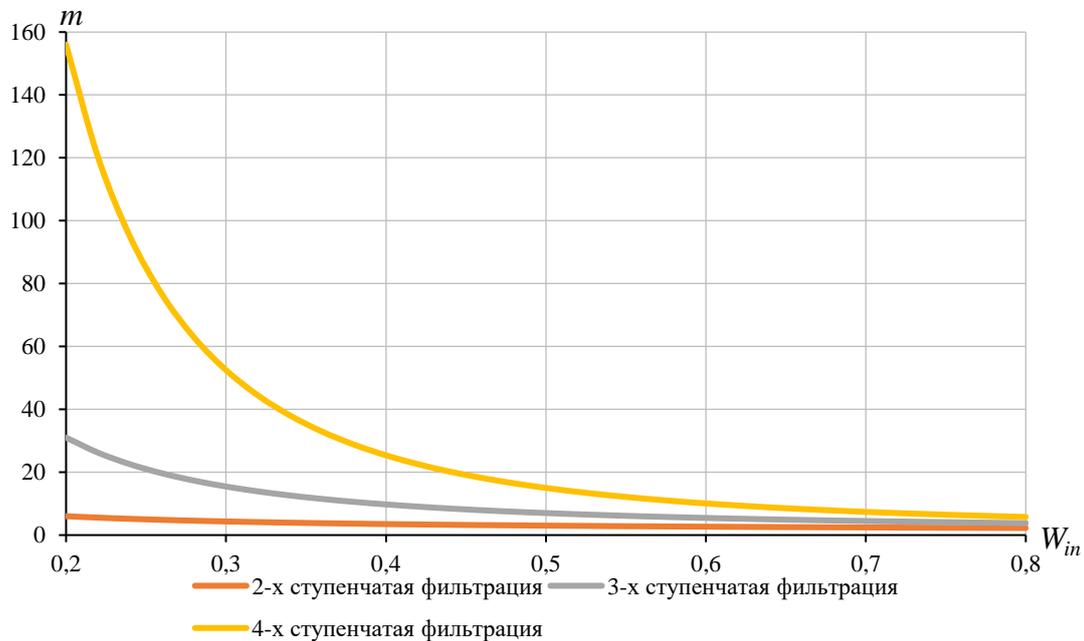


Рисунок 5 – Кратность уменьшения количества твердых частиц в фильтрате m в зависимости от различных значений W_{in} ступени для различных значений количества ступеней фильтрования n

В работе проанализирована эффективность дополнительных средств очистки в системах маслоснабжения турбоагрегатов.

Число частиц в заданном интервале размеров после первого, второго, ... и n -го байпаса фильтрования определяют по формулам:

$$N_{if1} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i1}); \quad (19)$$

$$N_{if2} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i2}); \quad (20)$$

...

$$N_{ifn} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{in}). \quad (21)$$

Число твердых частиц в заданном интервале размеров в фильтрате (в чистом отсеке ГМБ)

$$N_{if} = N_{if1} \cdot b_1 + N_{if2} \cdot b_2 + N_{if3} \cdot b_3 + \dots + N_{ifn} \cdot b_n = \sum_{n=1}^{\infty} N_{ifn} \cdot b_n, \quad (22)$$

где b_n – коэффициент байпаса $b_n = \frac{Q_n}{Q}$, где Q_n, Q – расход масла на байпас и общий расход масла.

Коэффициент проскока частиц при байпасном фильтровании можно вычислить по выражениям

$$W_i = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot (1 - \varphi_{in}); \quad (23)$$

$$W_i = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot W_{in}. \quad (24)$$

Зависимость эффективности байпасного фильтрования W_i от значений байпасирования (коэффициента байпаса b) для различных значений W_{ib} байпаса при эффективности штатных фильтров ГМБ $W_{ir}=0,21$ показана на рисунке 6.

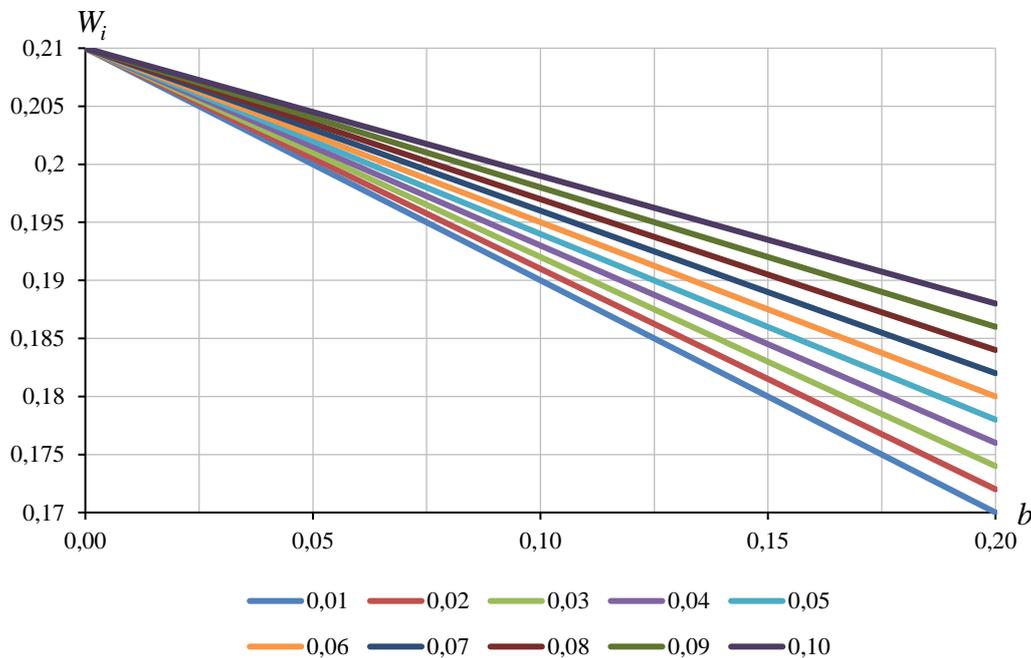


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента пропускания твердых частиц W_i от значений байпасирования b для различных значений W_{ib} байпаса при $W_{ir}=0,21$; 0,01-0,1 - коэффициент проскока частиц байпаса W_{ib} ; W_i - коэффициент пропускания частиц фильтра; b - коэффициент байпасирования

В *третьей главе* представлены способы повышения эффективности фильтрования турбинных масел. Автором проанализировано фильтрование азрированного масла в системе смазки подшипников и регулирования турбоагрегата.

При работе турбоагрегата масло в гидросистеме перемешивается с газами: атмосферным воздухом, водородом, газообразными продуктами окисления. Часть газа растворяется в масле, другая – образует смесь различной структуры.

Размер воздушных пузырьков и количество диспергированного воздуха оказывает существенное влияние на процесс фильтрования при небольших скоростях, соответствующих

малым перепадам давления на фильтрующей перегородке. Рабочие жидкости гидросистем (турбинное масло) в процессе эксплуатации содержат примерно 6% воздуха в нерастворенном состоянии (суспензия воздуха и жидкости), в некоторых случаях содержание воздуха повышается до 15-18% в виде взвеси (газовой эмульсии) мелких пузырьков диаметром 50-100 мкм, равномерно распределенных по всему объему масла.

Даже незначительные следы поверхностно активных веществ сообщают пузырьку свойства твердого шарика, увеличивают диссипацию энергии, затрудняют коалесценцию и тормозят подъем пузырьков на поверхность. Пузырьки диаметром 100 мкм поднимаются, как твердые сферические частицы (по закону Стокса). В области чисел Рейнольдса от $Re \geq 1$ до $Re < 10000$ закон сопротивления такой же, что и для твердых шариков (при тех же числах Рейнольдса).

Исследование фильтрования азрированного масла проводили в системе смазки подшипников и регулирования турбоагрегата Т-100-130 ТМЗ. В ней приемный (грязный) отсек маслобака отделен от чистого встроенным в бак двухступенчатым фильтром. В качестве фильтрующей перегородки использовали латунные тканые проволочные сетки с ячейками 700 и 140 мкм соответственно в первой и второй ступенях фильтрования.

В опытах оценивалась задерживающая способность фильтрующих перегородок по отношению к твердым частицам азрированного, а затем деазрированного масла.

Масло отбиралось на анализ по содержанию твердой фазы из потока в зонах турбулентного движения жидкости вблизи фильтра (из грязного и чистого отсеков) при установившемся режиме работы системы маслоснабжения турбоагрегата.

Оценка твердых загрязнений в пробах масла по гранулометрическому составу производилась с помощью прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904 путем анализа отдельных проб масла, отобранных во время работы турбоагрегата под нагрузкой.

Данные о количестве частиц проб масла из грязного отсека и фильтрата (из чистого отсека и в опыте при фильтровании деазрированного масла) приведены в таблице 1, а обобщенные результаты измерений и подсчета твердых частиц, загрязняющих масло, показаны на рисунке 7.

Таблица 1 – Промышленная чистота турбинного масла в системе смазки подшипников турбоагрегата Т-100-130 ТМЗ и фильтрата деазрированного масла

Место отбора проб	Число частиц в 100 мл масла размером, мкм				
	5-10	10-25	25-50	50-100	>100
Из грязного отсека	50440	14318	1361	225	48
Фильтрат азрированного масла (чистый отсек ГМБ)	10058	2956	218	39	22
Фильтрат деазрированного масла	48085	12133	1323	156	31

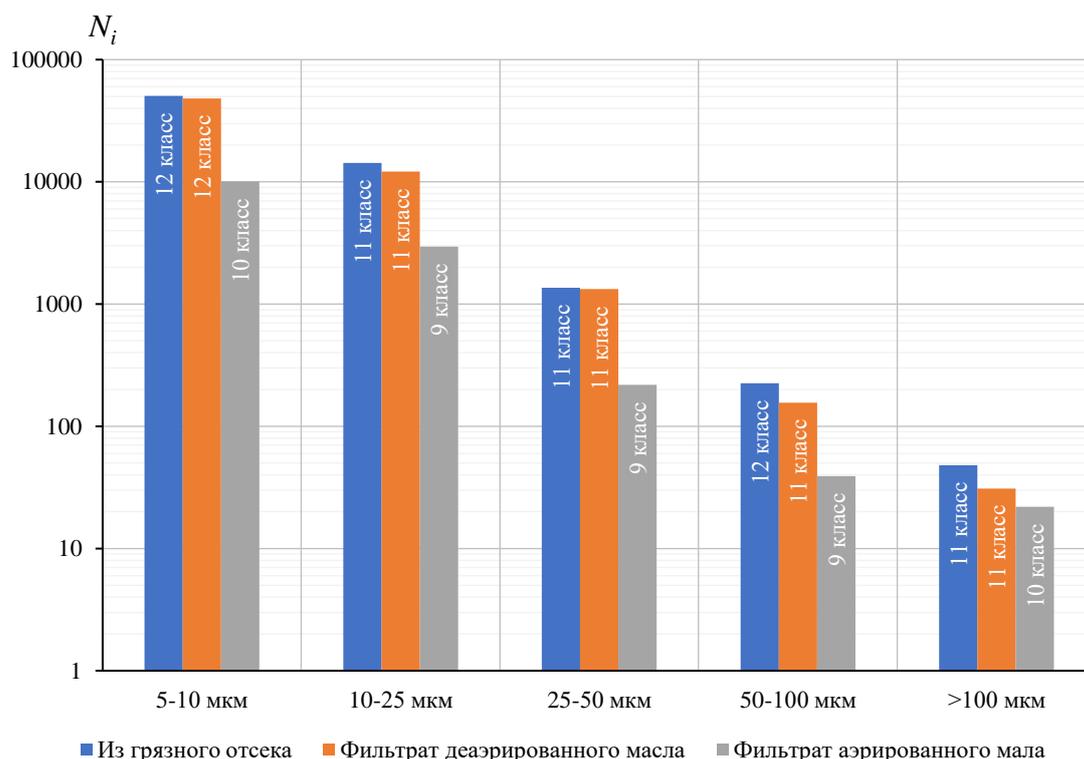


Рисунок 7 – Количество твердых частиц в пробах масла (класс чистоты по ГОСТ 17216-2001) из грязного отсека и фильтрата (из чистого отсека и в опыте при фильтровании деаэрированного масла): 5-10 мкм, 10-25 мкм, ..., >100 мкм – размерные группы частиц; N_i – общее число частиц в 100 мл пробы (lg)

Пробы из чистого отсека бака отнесены к 8-9 классам чистоты, а из грязного к 11 классу ГОСТ 17216-2001. Промышленная чистота масла оценивалась по числу в пробе частиц размерной группы 10-25 мкм.

Коэффициент отфильтровывания твердых частиц размерной группы 10-25 мкм –при фильтровании аэрированного масла $\varphi_i^a=0,79$, а деаэрированного — $\varphi_i^d=0,15$. Воздух, диспергированный в масле, повышает коэффициент отфильтровывания твердых частиц размерной группы 10-25 мкм более чем в 5 раз.

Произведен анализ эффективности фильтров маслобака. Разработана их модернизация.

Фильтрующий материал и правильный выбор размера ячеек фильтрующих сеток в каждой ступени фильтра грубой очистки (ФГО) и фильтра тонкой очистки (ФТО) должны, в первую очередь, обеспечить нормативную чистоту рабочей жидкости при удовлетворительной гидравлической характеристике фильтра, а также он должен быть устойчив к воздействию температуры (до 100°C) и агрессивной среды, прочным, износостойким; удерживать на поверхности загрязнения, которые легко удаляются (продувкой загрязненной сетки струей сжатого воздуха).

Анализ серийно выпускаемых фильтрующих материалов показал, что всем перечисленным выше требованиям отвечает ткань из полиамидных мононитей (ГОСТ 4403-91)

(рисунок 9): номинальный размер ячеек 400-450 мкм – для фильтров грубой очистки и 200-250 мкм – для тонкой очистки. Производство таких материалов организовано в Российской Федерации.

Проведены сравнительные испытания фильтрующих перегородок из латунной сетки (рисунок 8) и полиамидной ткани (рисунок 9). Определены задерживающая способность фильтрующих перегородок из полиамидной ткани по отношению к твердым частицам и эффективность ее регенерации.

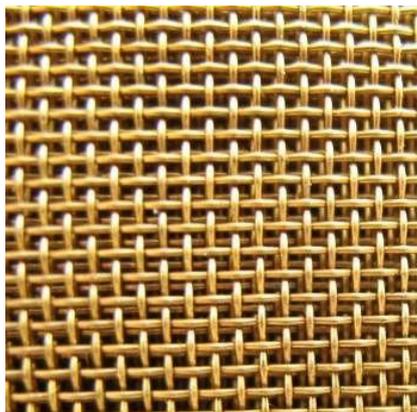


Рисунок 8 – Латунная тканная сетка (ГОСТ 6613-86) для фильтров грубой очистки с размером ячейки 400 мкм

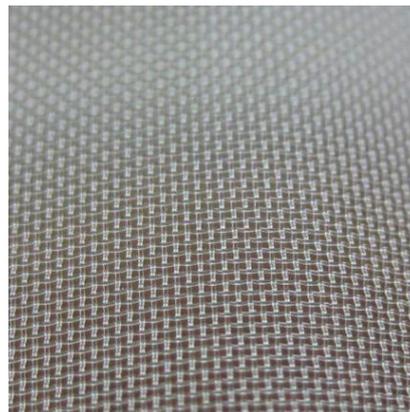


Рисунок 9 – Полиамидная ткань для фильтров грубой очистки с размером ячейки 400 мкм

Острая необходимость выполнения работ была вызвана постоянными отказами в системе регулирования турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3.

Отбор проб масла производился в следующих точках: из грязного и чистого отсеков главного масляного бака, на сливе масла с картеров подшипников (КП) турбины через смотровые окна — с помощью специального пробоотборника и из маслоохладителей – из кранов штатных пробоотборников.

Класс промышленной чистоты контролируемого масла по ГОСТ 17216-2001 определялся по числу в пробе частиц размерной группы 10-25 мкм, оказывающих основное влияние на снижение показателей надежности агрегатов гидросистем.

Грязный отсек бака отделен от чистого двухступенчатыми фильтрами грубой и тонкой очистки масла, встроенными в маслобак. В качестве фильтрующих перегородок, как правило, используют латунные тканые проволочные сетки квадратного плетения (ГОСТ 6613-86). Наблюдения показали, что при фильтровании обводненного масла прочность их и коррозионная стойкость недостаточны. Продукты окисления масла (в особенности низкомолекулярные кислоты) растворяют цветные металлы сеток фильтров маслобака.

Эффективным средством удаления воды из масла является фильтрование.

Латунные сетки, как правило, не обеспечивают необходимую (нормативную) чистоту рабочей жидкости.

Промышленные испытания латунных сеток в качестве фильтрующих перегородок для полнопоточного фильтрования аэрированного, обводненного и загрязненного масла проводились в условиях эксплуатации системы маслоснабжения подшипников и регулирования Т-180/210-130-1 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3.

Данные счета частиц твердых загрязнений и капель эмульгированной воды проб масла системы маслоснабжения турбоагрегата приведены в таблицах 2 и 3 (до модернизации), а обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло, в чистом отсеке маслобака – на рисунке 10 (до модернизации).

Таблица 2 – Промышленная чистота турбинного масла в системе смазки подшипников турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ до и после модернизации фильтров маслобака

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, чистый отсек ГМБ	
	До модернизации	После модернизации
5-10	12769	1991
10-25	2957	646
25-50	464	147
50-100	44	11
100-200	16	0
>200	9	0
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001	9	7

Таблица 3 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ до и после модернизации фильтров маслобака

Размер капель эмульгированной воды, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла, чистый отсек ГМБ	
	до модернизации	после модернизации
25-50	153883	32242
50-100	2473	916
100-200	220	89
>200	50	38
Капель эмульгированной воды >25 мкм	156626	33285

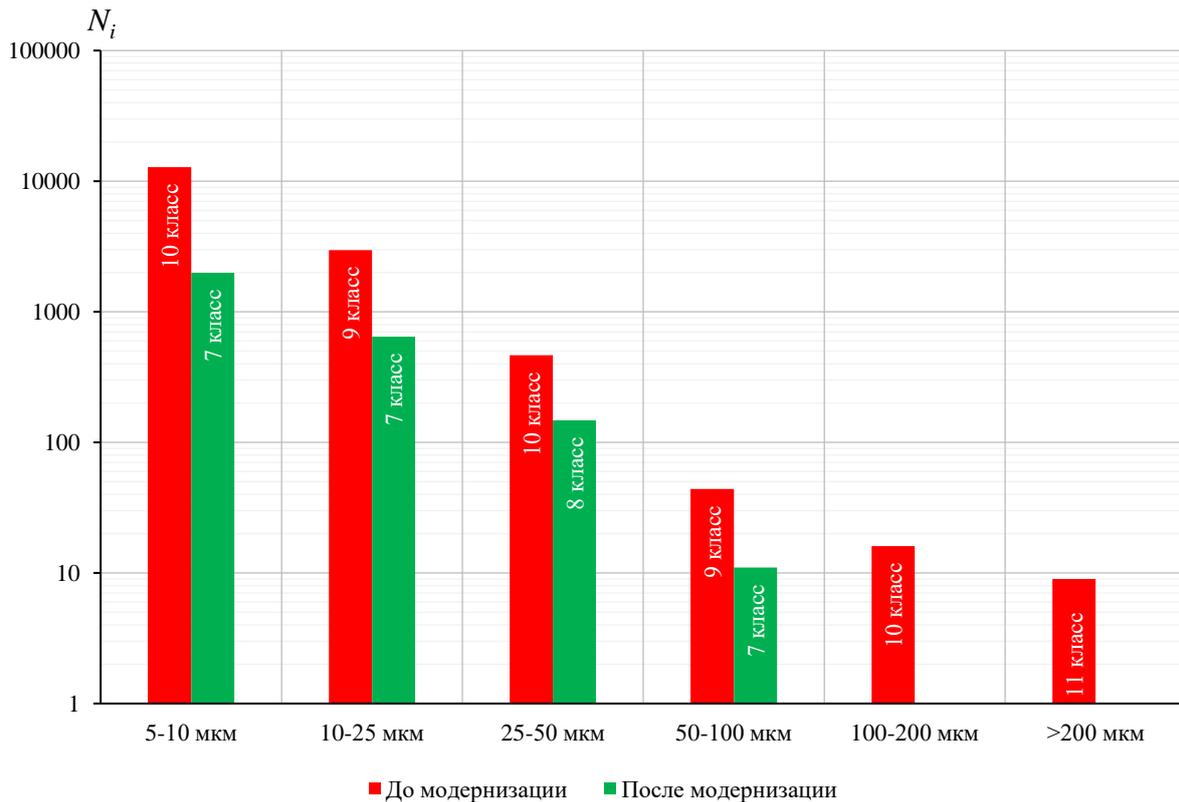


Рисунок 10 – Количество твердых частиц в пробах масла (класс чистоты по ГОСТ 17216-2001) системы смазки подшипников турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ (чистый отсек ГМБ): 5-10 мкм, 10-25 мкм, ..., >200 мкм – размерные группы частиц; N_i – общее число частиц в 100 мл пробы (lg)

Недостаточный уровень чистоты масла в системе маслоснабжения турбоагрегата является следствием не эффективной работы фильтров и вероятной причиной заклинивания золотника системы регулирования.

В двухступенчатом ФГО вместо латунной тканой проволочной сетки с размерами ячеек 700 мкм, предусмотренной техническими требованиями завода-изготовителя, при модернизации установлена ткань из полиамидных мононитей с номинальным размером ячеек 450 мкм, а в двухступенчатом ФТО вместо латунной сетки с размером ячеек 250 мкм при модернизации установлена полиамидная ткань с теми же размерами ячеек.

Результаты сравнительных испытаний фильтров маслобака с фильтрующей перегородкой из полиамидной ткани в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ приведены в таблице 2 и 3. Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло, в чистом отсеке маслобака после установки ткани из полиамидных мононитей вместо латунных тканых сеток (модернизации фильтров маслобака) приведены на рисунке 10.

Сразу заметим – после модернизации фильтров маслобака ФГО и ФТО масло стало чище в системе маслоснабжения турбоагрегата, а количество твердых частиц и капель эмульгированной воды в нем (в чистом отсеке маслобака) с размерами более 5 и 25 мкм соответственно уменьшилось в 5,8 и 4,7 раза; промышленная чистота соответствует 7 классу ГОСТ 17216-2001.

Штатные фильтры грубой и тонкой очистки испытывались в условиях эксплуатации системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины К-200-130 ЛМЗ. В качестве фильтрующих перегородок в них используют латунные тканые проволочные сетки.

Данные счета частиц твердых загрязнений проб масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины представлены в таблице 4 (до модернизации ФГО и ФТО), обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества частиц, загрязняющих масло в чистом отсеке бака – на рисунке 11.

Таблица 4 – Промышленная чистота турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ до и после модернизации фильтров грубой и тонкой очистки

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, чистый отсек ГМБ		
	До модернизации ФГО и ФТО	После модернизации ФГО	После модернизации ФТО
5-10	69245	33868	15549
10-25	6191	1952	1263
25-50	192	86	131
50-100	43	12	28
100-200	15	3	9
>200	12	3	5
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001	9-10	8	7-8

Недостаточный уровень чистоты масла (9-10 класс ГОСТ 17216-2001) в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины является следствием неэффективной работы фильтров и вероятной причиной отказов в системе регулирования и повышенного износа подшипников.

В двухступенчатом ФГО вместо латунной тканой проволочной сетки с размером ячеек 700 мкм (предусмотренной техническими требованиями завода-изготовителя) установлена при модернизации ткань из полиамидных моноплетей с номинальным размером ячеек 400 мкм.

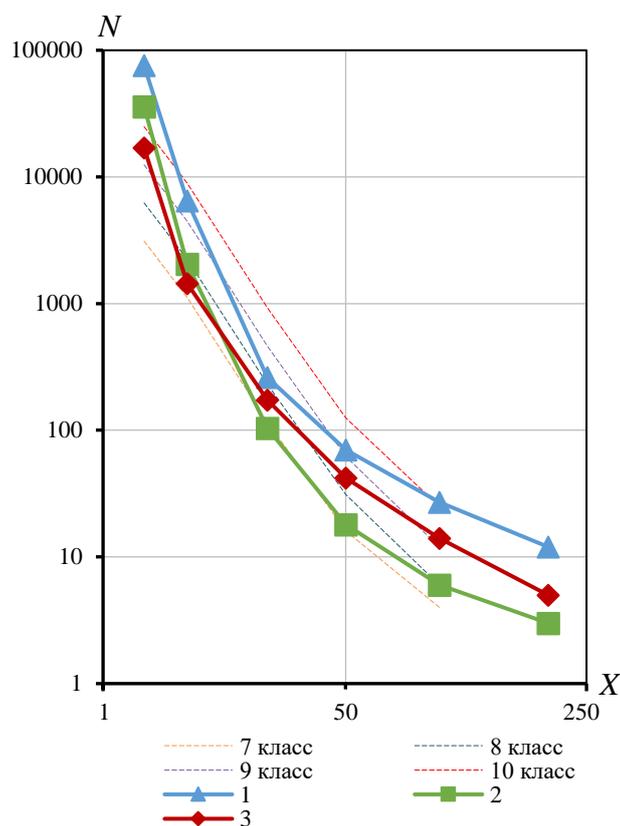


Рисунок 11 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ: 1 – фильтрат из чистого отсека ГМБ до модернизации ФГО и ФТО; 2 – тоже – после модернизации ФГО; 3 – тоже – после модернизации ФТО; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

В двухступенчатом ФТО вместо латунной сетки с размером ячеек 250 мкм установлена при модернизации ткань из полиамидных моноплетей с номинальным размером ячеек 250 и 100 мкм в первой и второй ступени фильтра соответственно.

Результаты сравнительных испытаний фильтров маслобака с фильтрующими перегородками из полиамидной ткани в системе маслоснабжения подшипников и регулирования приведены в таблице 4. Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло в чистом отсеке маслобака, после установки полиамидных сеток вместо латунных (модернизации фильтров маслобака) приведены на рисунке 11.

После модернизации фильтров грубой и тонкой очистки масло стало чище, а количество твердых частиц в нем (в чистом отсеке маслобака) с размерами более 5 мкм уменьшилось в 4,5 раза; промышленная чистота соответствует 7-8 классу ГОСТ 17216-2001.

В *четвертой главе* приведен метод поиска источников повышенного загрязнения турбинного масла.

Метод экспресс-анализа промышленной чистоты масел и содержания эмульгированной воды в них с помощью прибора ПКЖ-904, позволяет контролировать промышленную чистоту и

уровень обводнения турбинного масла, что в свою очередь помогает быстро принять меры и исключить причину повышенной загрязненности. Данный метод также позволяет производить диагностику и существенно упростить поиск причины повышенного износа оборудования. Обнаружив причину, появляется возможность провести точечный ремонт и избежать более серьезных проблем в работе турбоагрегата.

На основании данных таблиц 2 и 4 построены кривые твердых загрязнений масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегатов К-200-130 и Т-180/210-130-1 ЛМЗ (рисунок 12).

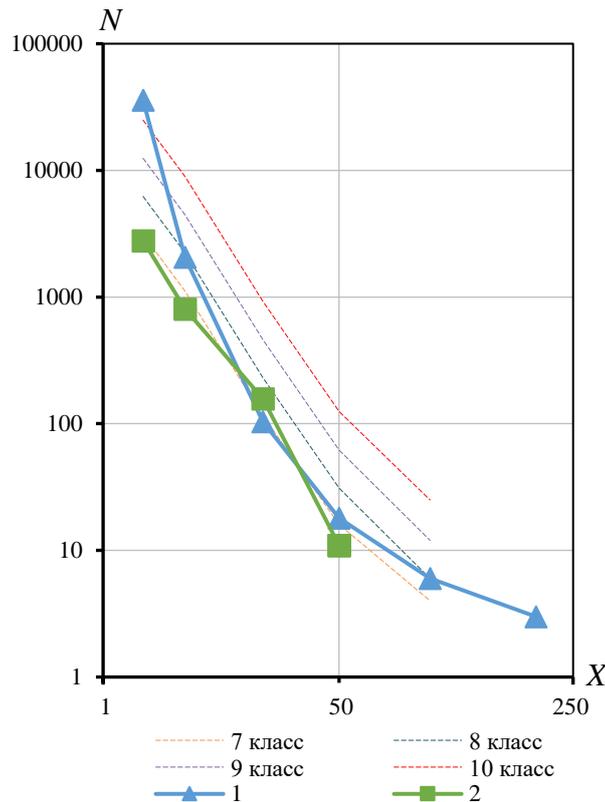


Рисунок 12 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата: 1 – К-200-130 ЛМЗ; 2 – Т-180/210-130-1 ЛМЗ; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

Заметим на рисунке 12 значительное отклонение от линейности в области малых, по размерам, частиц на турбоагрегате К-200-130 ЛМЗ свидетельствует о повышенном износе деталей гидрооборудования.

Данные счета частиц проб масла на сливе с подшипников турбины N_{ci} и результаты подсчета ΔN_i (разница между количеством частиц на выходе из подшипника и на входе) приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Загрязненность масла в системе маслоснабжения турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ на сливе с подшипников N_{ci} и результат подсчёта ΔN_i

№ подшипни	Число частиц в 100 мл масла размером, мкм											
	5-10		10-25		25-50		50-100		100-200		>200	
	N_{ci}	ΔN_i	N_{ci}	ΔN_i	N_{ci}	ΔN_i	N_{ci}	ΔN_i	N_{ci}	ΔN_i	N_{ci}	ΔN_i
1	44316	10448	4120	2168	397	311	60	48	13	10	9	6
2	46585	12717	4049	2097	344	258	46	34	11	6	8	3
3	51632	17764	4124	2172	245	159	39	27	15	12	15	12
4	76675	42807	10243	8291	363	277	52	40	14	11	12	9
5	44305	10437	3635	1683	338	252	43	31	21	18	20	17

На рисунке 13 видно, что износ подшипника № 4 превышает нормальный эксплуатационный – более чем в 4 раза и является главной причиной появления большого количества малых частиц (5-10 и 10-25 мкм) в рабочей жидкости.

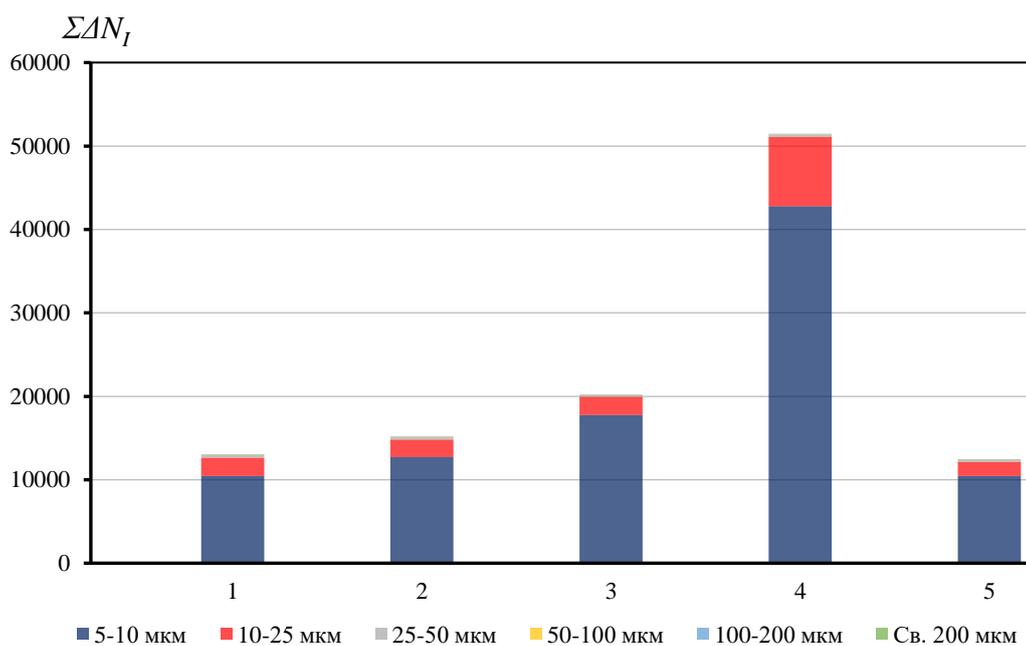


Рисунок 13 – Распределение $\Sigma \Delta N_i$ по подшипникам турбины К-200-130 ЛМЗ; $\Sigma \Delta N_i$ – поступление частиц в 100 мл жидкости; 1-5 – порядковый № подшипника

Поиск источников попадания воды и водяного пара производился на турбоагрегате Т-180/210-130-1 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3.

Отбор проб масла производился в следующих точках: из кранов штатных пробоотборников маслоохладителей и на сливе масла с подшипников турбины через смотровые окна с помощью специального пробоотборника.

Данные счета капель эмульгированной воды проб масла отобранных на сливе его из картеров подшипников турбоагрегата приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников турбоагрегата Т-180/210-130-1 ЛМЗ

Размер капель эмульгированной, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла, место отбора проб					
	МО № 1	МО № 2	КП № 1	КП № 2	КП № 3	КП № 4
5-10	2064	12401	21331	20714	3537	5029
10-25	2152	9332	9279	7680	1664	2218
25-50	735	3329	2095	1393	153	215
50-100	32	112	107	98	0	3
100-200	4	5	8	11	0	0
>200	1	0	7	1	0	0
Капель эмульгированной воды >5 мкм	4988	25179	32827	29897	5354	7465

Анализ результатов измерений обводненности масла в различных точках системы показал: вода (пар) поступает в масло в основном через уплотнения картеров подшипников № 1 и 2. Например, количество капель эмульгированной воды в масле с размерами более 5 мкм на входе в подшипники № 1 и 2 меньше, чем на сливе — соответственно в 6,5 и 6 раз. Установлены также недостатки технологической схемы отсосов пара из уплотнений турбины (невозможность индивидуальной регулировки отсосов пара из задних уплотнений ЦВД).

В результате совершенствования схемы отсосов и последовательной регулировки получены следующие результаты: вода практически отсутствует в масле (количество капель эмульгированной воды в масле с размерами более 25 мкм уменьшилось в 723 раза).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итогом диссертационной работы являются научно-технические решения направленные на повышение эффективности очистки и усовершенствования средств контроля промышленной чистоты турбинных масел, а также технической диагностики паровых турбин тепловых электрических станций.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан метод экспресс-анализа промышленной чистоты турбинного масла и содержания эмульгированной воды в нем на базе отечественного прибора контроля жидкости ПКЖ-904, который позволяет получить оперативную информацию о загрязненности и обводненности рабочей жидкости и активно влиять на процессы загрязнения и очистки ее в системах маслоснабжения паровых турбин.

2. Для контроля за состоянием оборудования и систематизации данных, полученных в результате анализа проб масла прибором ПКЖ-904, целесообразно использовать разработанное программное обеспечение. Оно позволяет ускорить процесс обработки данных, а также систематизировать данные о чистоте турбинного масла в процессе эксплуатации турбоагрегата.

3. Разработана математическая модель, которая выводит зависимость между основными характеристиками циркуляционной системы смазки: промышленной чистоты рабочей жидкости, скорости поступления загрязнений и эффективности очистки. Чистота масла в циркуляционной системе смазки прямо пропорциональна скорости поступления загрязнений и обратно пропорциональна эффективности их удаления.

4. Впервые определено влияние воздуха, диспергированного в масле на чистоту фильтрата в системе маслоснабжения турбоагрегата. Воздух, диспергированный в масле, повышает коэффициент отфильтровывания твердых частиц размерной группы 10-25 мкм более чем в 5 раз.

5. Нормативы промышленной чистоты масел (9-10 класс) необоснованно занижены; как показали испытания, это не обеспечивает надежную работу оборудования, класс чистоты масла в чистом отсеке совмещенных систем смазки подшипников и регулирования турбин должен быть 7-8 ГОСТ 17216-2001.

6. Анализ серийно выпускаемых фильтрующих материалов показал, что всем требованиям отвечает ткань из полиамидных мононитей (ГОСТ 4403-91): номинальный размер ячеек 400-450 мкм – для фильтров грубой очистки и 200-250 мкм – для тонкой очистки, а окончательный выбор сделан на основании испытаний ее в качестве фильтрующих перегородок в условиях эксплуатации паровых турбин. Испытания фильтрующего материала проводились на Челябинской ТЭЦ-2, Челябинской ТЭЦ-3, Южноуральской ГРЭС и ООО «Мечел-Энерго» (справка об использовании результатов диссертационного исследования на ООО «Мечел-Энерго» №52 от 08.04. 2024)

7. Анализ результатов подсчета частиц в различных точках циркуляционной системы маслоснабжения турбоагрегатов можно использовать для поиска источников проникновения загрязнений (например, воды и (или) водяного пара) и источников повышенного износа

(технической диагностики подшипников). Результат подсчета частиц в различных точках системы турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ показал, что износ подшипника № 4 превышает нормальный эксплуатационный — более чем в 4 раза и является главной причиной появления большого количества малых частиц (5-10 и 10-25 мкм) в рабочей жидкости.

8. Внедрение мероприятий по очистке масла и контролю чистоты, позволяет снижать производственные затраты за счет продления жизненного цикла рабочих жидкостей и гидравлических систем. Повышение чистоты с 16/13 ISO 4406 (11 класс ГОСТ 17216-2001) до 14/11 ISO 4406 (9 класс ГОСТ 17216-2001) позволит продлить срок службы оборудования в 1,5 раза.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработка методов прогнозирования состояния оборудования по чистоте турбинного масла.

2. Повышение эффективности очистки турбинного масла за счет подбора и комбинирования фильтровальных материалов и применения дополнительного маслоочистительного оборудования.

3. Разработка программного комплекса для контроля чистоты турбинного масла и диагностики состояния энергетического оборудования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. Осинцев, К. В. Комплекс мер по повышению чистоты турбинного масла / К. В. Осинцев, Н. А. Пшениснов, А. И. Пшениснов // Электрические станции. – 2023. – №. 2. – С. 38-43. (категория К1)

2. Осинцев, К. В. Эффективность многоступенчатого фильтрования турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов / К. В. Осинцев, Н. А. Пшениснов, А. И. Пшениснов // Теплоэнергетика. – 2023. – № 9. – С. 28-34. – DOI 10.56304/S0040363623080076. (категория К1)

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617923 Российская Федерация. Программа для определения и контроля промышленной чистоты турбинного масла: № 2023615771: заявл. 29.03.2023: опубл. 17.04.2023 / Н. А. Пшениснов, К. В. Осинцев, Я. С. Болков, В. С. Исаев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет».

Прочие публикации по теме работы:

4. Осинцев, К. В. Процессы загрязнения и очистки турбинного масла в системах смазки паровых турбин / К. В. Осинцев, Н. А. Пшениснгов, А. И. Пшениснгов // Вестник ЮУрГУ. – Серия «Энергетика». – 2022. Т. 22, – № 3. – С. 83–89. – DOI: 10.14529/power220309 (категория K1).

5. Осинцев, К. В. Анализ эффективности очистки турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов и модернизация рамных фильтров / К. В. Осинцев, Н. А. Пшениснгов, А. И. Пшениснгов // Энергетик. 2022. – № 11. – С. 45-49. – DOI: 10.34831/EP.2022.77.89.007. (категория K2)

6. Осинцев К. В. Влияние эффективности работы фильтров на чистоту турбинного масла в системах смазки паровых турбин / К. В. Осинцев, Н. А. Пшениснгов, А. И. Пшениснгов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 46-48.

7. Пшениснгов, Н. А. Определение эмульгированной воды в турбинном масле / Н. А. Пшениснгов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2024. – Т. 12, № 1. – С. 74-80.

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 27.06.2024. Формат 60x84 1/16. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 1,39. Уч. -изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 188/255.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ,

454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.