

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования

«Южно-Уральский государственный университет (национальный
исследовательский университет)»

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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Осинцев Константин Владимирович

Челябинск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ ЧИСТОТЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ, МЕТОДАМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ И АВТОМАТИЧЕСКИМ СЧЕТЧИКАМ ЧАСТИЦ	13
1.1. Теоретические сведения о системах маслоснабжения	13
1.2. Стандарты, устанавливающие классы чистоты рабочей жидкости.....	21
1.3. Методы определения степени загрязненности рабочей жидкости	34
1.4. Автоматические счетчики частиц	42
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧИСТОТЫ ТУРБИННОГО МАСЛА В СИСТЕМАХ МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ТУРБОАГРЕГАТОВ	52
2.1. Разработка методики экспресс-анализа чистоты турбинного масла и содержания в нем эмульгированной воды.....	52
2.1.1. Цели и задачи экспресс-анализа	52
2.1.2. Устройство и общее функционирование прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А	54
2.1.3. Отбор проб масла	59
2.1.4. Аппаратура, оборудование, материалы, документация	65
2.1.5. Подготовка разбавителя, химической посуды, пробы масла и прибора.....	66
2.1.6. Определение чистоты турбинного масла и содержания в нем эмульгированной воды	68
2.1.7. Поступление (ингрессия) влаги в пробу масла при ее анализе автоматическим счетчиком частиц	72
2.1.8. Программное обеспечение для систематизации полученных данных на приборе контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А.....	79
2.2. Зависимость чистоты рабочей жидкости в системе маслоснабжения турбоагрегата от процессов загрязнения и очистки	82

2.2.1. Аналитическое решение задачи. Экспериментальное определение чистоты и поступления загрязнений в турбинное масло в системе маслоснабжения турбоагрегата	82
2.2.2. Анализ и экспериментальное определение эффективности фильтрования турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегата	86
ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРОВАНИЯ	
ТУРБИННОГО МАСЛА (МОДЕРНИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ ГМБ)	95
3.1. Общие сведения и теоретические основы	95
3.2. Фильтрование аэрированного масла в системе смазки подшипников и регулирования турбоагрегата.....	99
3.3. Задачи и цели модернизации фильтров ГМБ турбоагрегатов.....	103
3.4. Подбор фильтрующих перегородок для фильтров ГМБ.....	105
3.5. Модернизация фильтров ГМБ турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3	116
3.6. Модернизация фильтров ГМБ турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ на Южноуральской ГРЭС.....	127
3.7. Модернизация фильтров ГМБ турбоагрегата ПТ-60-130 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-2	130
3.8. Рекомендации по нормированию промышленной чистоты турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов и содержания воды.....	135
ГЛАВА 4. ПОИСК ИСТОЧНИКОВ ПОВЫШЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ	
ТУРБИННОГО МАСЛА (МАСЛОДИАГНОСТИКА).....	144
4.1. Общие сведения и теоретические основы маслодиагностики	144
4.2. Электроэрозионное повреждение подшипников турбоагрегата К-500-240 ХТГЗ	149
4.3. Исследование загрязнения турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины К-200-130 Южноуральской ГРЭС.....	152
4.4. Определение источников попадания воды или водяного пара в масло в системе маслоснабжения турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3	163

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОЧИСТКЕ ТУРБИННОГО МАСЛА И КОНТРОЛЮ ЧИСТОТЫ.....	166
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	170
ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ИНДЕКСЫ И СОКРАЩЕНИЯ..	172
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	192
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	192
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	193
Технический акт проведения работ.....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	194
Справка об использовании результатов диссертационного исследования Пшениснова Никиты Анатольевича при проведении научно-исследовательской работы на ТЭЦ ООО «МЕЧЕЛ-ЭНЕРГО	194
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	195
Справка об использовании результатов диссертационного исследования Пшениснова Никиты Анатольевича в учебном процессе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».....	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	196
Справка об использовании результатов диссертационного исследования Пшениснова Никиты Анатольевича в учебном процессе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».....	196

ВВЕДЕНИЕ

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 главного масляного бака (ГМБ). 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 научной 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.,

К. 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 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 турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3.

Объект исследования: паровая турбина тепловой электростанции.

Предмет исследования: процессы загрязнения и очистки в системах маслоснабжения паровых турбин.

Цель работы: исследование влияния процессов загрязнения и очистки на характеристики турбинного масла в системах маслоснабжения турбоагрегатов.

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.

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 работы:

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.

Практическая ценность работы:

1. Проведена модернизация фильтров ГМБ, получены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность применения полиамидных фильтровальных материалов.

2. Разработан алгоритм, позволяющий определить источники повышенного загрязнения турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегата.

3. Разработаны рекомендации по классу чистоты турбинного масла для совмещенных систем смазки подшипников и регулирования турбин по ГОСТ 17216-2001.

4. 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 ГМБ выполнен на основании полученных результатов экспериментальных исследований на турбоагрегатах К-200-130 ЛМЗ, Т-180/210 ЛМЗ, ПТ-60-130 ЛМЗ, Т-100 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.; Международная конференция «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 4 статьи – в журналах, включенных в перечень ВАК. Получено 1 Свидетельство о регистрации программы для 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 б

приложений. Весь материал изложен на 196 страницах, включая 56 рисунков, 41 таблицу, 35 формул и библиографический список, содержащий 152 наименования.

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. Представлен обзор основных работ, посвященных исследованию процессов загрязнения и очистки рабочих жидкостей. Приводятся данные о разработках высокоточных счетчиков частиц, которые не требуют какой-либо периодической калибровки.

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.

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

Представлена математическая модель зависимости чистоты рабочей жидкости в системе маслоснабжения турбоагрегата от процессов загрязнения и очистки.

Анализируется эффективность фильтров маслобака, а также дополнительных средств очистки в системах маслоснабжения турбоагрегатов.

В третьей главе представлены способы повышения эффективности фильтрования турбинного масла в системе маслоснабжения и регулирования турбоагрегатов. Автором проанализировано влияние воздуха, диспергированного в масле, на чистоту фильтрата в системе маслоснабжения турбоагрегата. Определена эффективность фильтров маслобака. Разработана их модернизация.

В четвертой главе приведен метод поиска источников повышенного загрязнения турбинного масла в системе маслоснабжения и регулирования турбоагрегатов.

В заключении приводятся итоги выполненной работы. В приложении помещены: свидетельство о регистрации разработанной программы для ЭВМ; акты и справки, подтверждающие использование и внедрение результатов работы.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ ЧИСТОТЫ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ, МЕТОДАМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕЕ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ И АВТОМАТИЧЕСКИМ СЧЕТЧИКАМ ЧАСТИЦ

1.1. Теоретические сведения о системах маслоснабжения

Масляная система турбоагрегата предназначена для смазывания подшипников турбины (рисунок 1.1) и электрогенератора; уплотнения вала электрогенератора; регулирования и защиты турбины; смазывания и регулирования питательных агрегатов; приема, хранения и регенерации масла. На турбинах большой мощности выделяют систему регулирования; в ней вместо обычного нефтяного масла иногда используют огнестойкую рабочую жидкость.

Турбинное масло является продуктом переработки нефти. После отгона из нефти легкокипящих бензиновых, керосиновых и газойлевых фракций образуется остаток – мазут, продуктом вакуумной перегонки которого являются масляные дистилляты. Турбинное масло получается путем специальной очистки указанных дистиллятов. Качество турбинного масла в значительной мере зависит от способа очистки дистиллятов, поэтому в его названии указывают технологию очистки. Добавлением различных присадок в масло добиваются повышения его эксплуатационных свойств [49].

В отечественной практике принята следующая маркировка турбинных масел: Т-22, Т-30, Т-46, Т-57, где цифры обозначают кинематическую вязкость в сантистоксах ($1 \text{ Ст} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) при температуре 50°C . Выпускаются также масла Тп-22, Тп-22СУ, Тп-22С, ТСП-22, ТСП-22Г и др. Физико-химические показатели турбинных масел должны соответствовать требованиям ГОСТ 32-74 [21] и ГОСТ 9972-2020 [27]. В настоящее время на ТЭС и АЭС поставляется в основном турбинное масло Тп-22С селективной очистки с последующей гидроочисткой по ТУ 38.101821-83 [49].

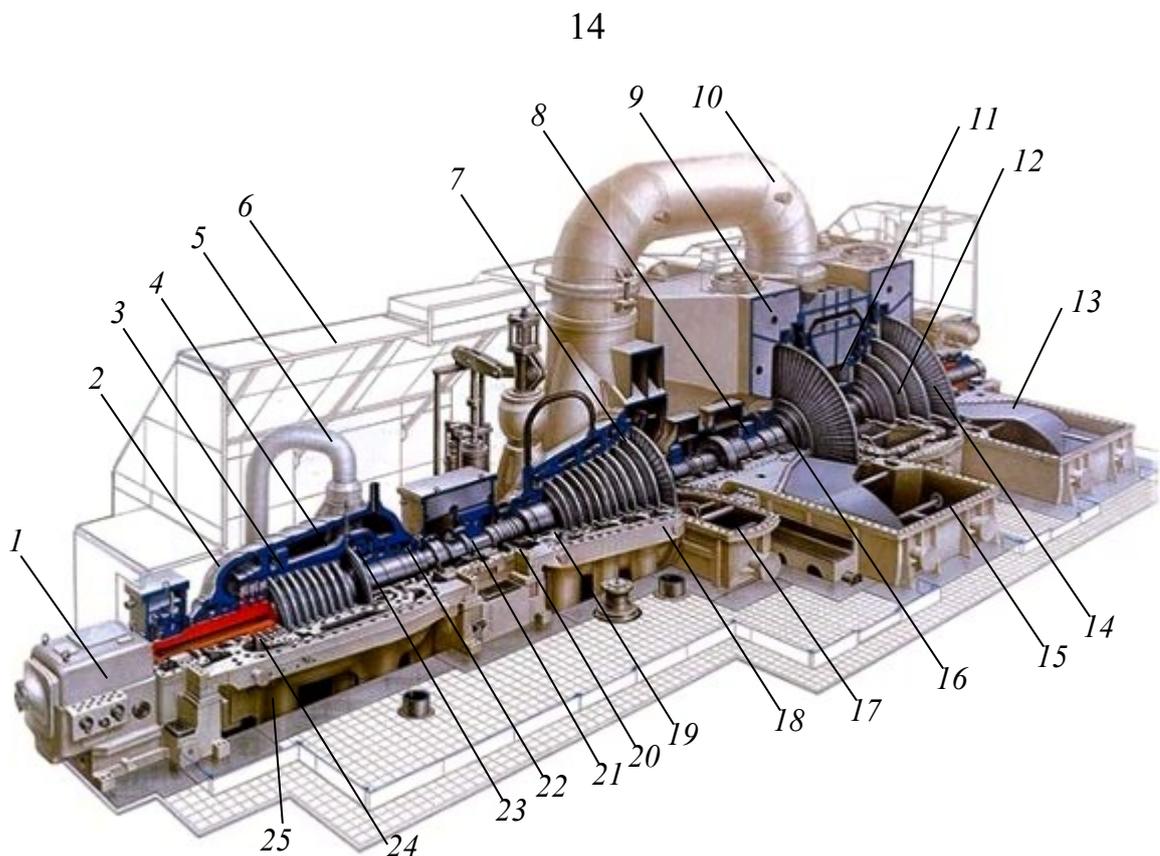


Рисунок 1.1 – Конструкция паровой турбины К-225-12,8 [5]:

1 – блок регулирования и управления турбиной; 2 – верхняя половина внешнего корпуса цилиндра высокого давления (ЦВД); 3 – ротор ЦВД с рабочими лопатками; 4 – внутренний корпус ЦВД; 5 – труба подвода пара к ЦВД; 6 – кожух турбоагрегата; 7 – ротор цилиндра среднего давления (ЦСД) с рабочими лопатками; 8 – опора ротора цилиндра низкого давления (ЦНД); 9 – верхняя половина корпуса ЦНД; 10 – реверсивная труба, перепускающая пар из ЦСД в ЦНД; 11 – паровпускная камера ЦНД; 12 – ротор ЦНД с рабочими лопатками; 13 – выходной патрубок ЦНД, из которого пар поступает в конденсатор; 14 – рабочие лопатки последней ступени ЦНД; 15 – нижняя половина корпуса ЦНД; 16 – переднее концевое уплотнение ЦНД; 17 – выходной патрубок ЦСД; 18 – нижняя половина корпуса ЦСД; 19 – паровпускная камера ЦСД; 20 – нижняя половина средней опоры валопровода; 21 – муфта, соединяющая роторы ЦВД и ЦСД; 22 – заднее концевое уплотнение ЦВД; 23 – паровпускная камера острого пара; 24 – переднее концевое уплотнение ЦВД; 25 – выходной патрубок отвода пара в промежуточный пароперегреватель

Схема циркуляционного маслоснабжения подшипников и других узлов смазывания паротурбинной установки современного энергетического блока показана на рисунке 1.2.

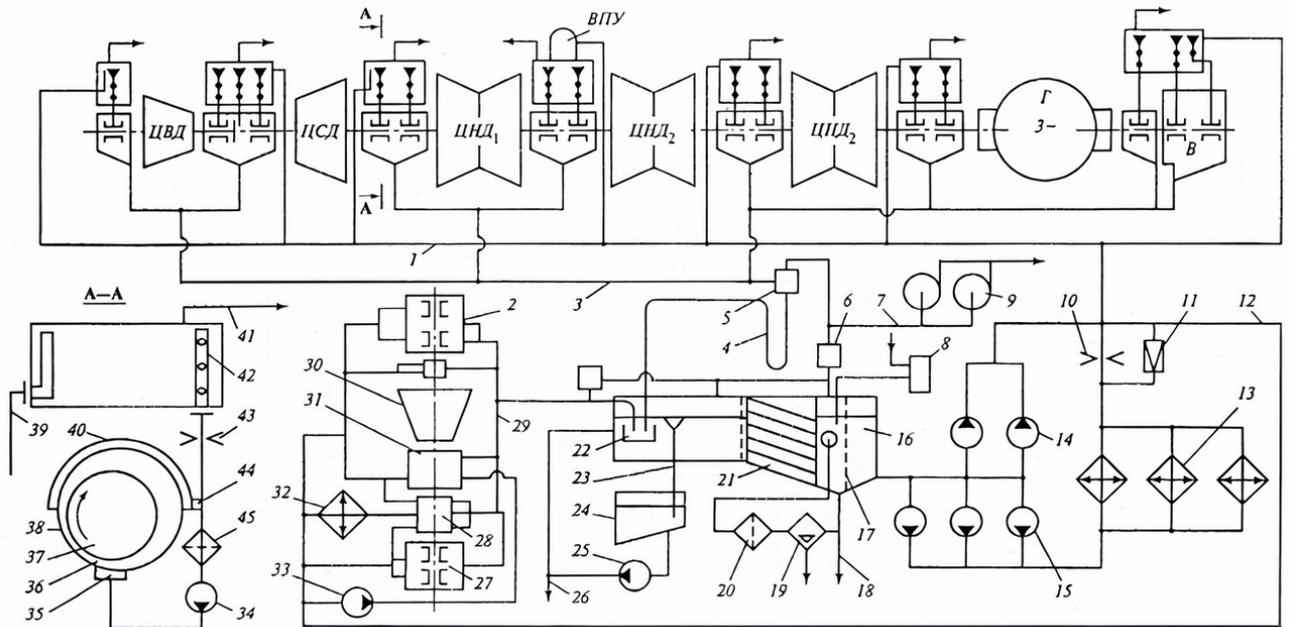


Рисунок 1.2 – Схема маслоснабжения турбоагрегата мощностью 800 МВт [49]:

- 1 – напорный коллектор; 2 – питательный насос ПТН; 3 – сливной коллектор;
 4 – гидрозатвор; 5 – камера расширительная; 6 – маслоотделитель; 7 – воздуховод;
 8 – адсорбер; 9 – эксгаустер; 10 – дроссельная шайба; 11 – редукционный клапан;
 12 – ответвление к ПТН; 13 – маслоохладитель; 14 – аварийный маслонасос;
 15 – главный маслонасос; 16 – отсек отфильтрованного масла; 17 – фильтр;
 18 – аварийный слив; 19 – центрифуга; 20 – фильтр-пресс; 21 – воздухоотделитель;
 22 – камерный гидрозатвор; 23 – перелив; 24 – вспомогательная емкость;
 25 – перекачивающий насос; 26 – дренаж; 27 – бустерный насос; 28 – зубчатый редуктор; 29 – слив масла с ПТН; 30 – турбопривод; 31 – блок регулирования;
 32 – маслоохладитель; 33 – пусковой насос; 34 – насос системы гидростатического подъема шейки вала; 35 – гидростатический карман;
 36 – смазочный зазор подшипника; 37 – вал; 38 – нижний полувкладыш подшипника; 39 – подвод масла к противоаварийному бачку; 40 – верхний полувкладыш подшипника; 41 – воздушник; 42 – дозировочная трубка;

43 – ограничительная шайба; 44 – подвод масла в начало смазочного клина; 45 – фильтр; Г – генератор электрического тока; В – возбудитель; ЦВД – цилиндр высокого давления; ЦСД – цилиндр среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; ВПУ – валоповоротное устройство

Отфильтрованное масло из ГМБ по всасывающему коллектору подводится к трем главным насосам с электроприводом переменного тока и к двум аварийным центробежным насосам с электроприводом постоянного тока. В работе обычно находится один или два главных насоса, третий – резервный – включается автоматически при неисправности работающих. При потере напряжения на шинах собственных нужд, когда главные насосы отключаются и турбину готовят к останову, в систему смазывания подается масло от аварийных насосов, подключенных к шинам аккумуляторной батареи.

Масло из напорного коллектора главных насосов поступает в кожухотрубные маслоохладители (МО) (два из них постоянно работают, третий находится в резерве) и, пройдя редуцирующий клапан, автоматически поддерживающий постоянное давление за клапаном, распределяется по двум ветвям: к подшипникам главного турбоагрегата и к узлам смазывания питательного насоса с турбоприводом. Главный напорный масляный коллектор по отдельным линиям питает семь индивидуальных противоаварийных бачков, расположенных в крышках над подшипниками. Напорный коллектор снабжает маслом пусковой насос системы регулирования, а также подшипники бустерного насоса, зубчатого редуктора, турбопривода и собственно питательного насоса.

Отработанное масло сливается в коллекторы и через вентилируемые гидрозатворы (во избежание выброса масляных аэрозолей из корпусов наружу) поступает в ГМБ – вначале в отсек «грязного» масла, затем через двухступенчатый фильтр грубой очистки (ФГО) – в многоярусный пакет наклонных перегородок (для деаэрации и обезвоживания масла), в промежуточный отсек (отгороженный сетчатыми фильтрами) и, наконец, через двухступенчатый фильтр тонкой очистки (ФТО) – в отсек «чистого» масла. Для полнопоточного фильтрования турбинного

масла обычно применяют сдвоенные плоские вертикальные сетки, закрепленные в рамах и установленные в шандорах ГМБ с возможностью периодической выемки их через люк наружу для очистки от осадка. Поочередное извлечение сеток позволяет производить их чистку в процессе работы установки. Очистка фильтров от осадка производится путем продувки загрязненной сетки сжатым воздухом.

Бак имеет поплавковый указатель уровня с электрической сигнализацией при крайних допустимых верхнем и нижнем уровнях поплавка. Очистку сеток проводят при перепаде уровней масла, находящегося в чистом и грязном отсеках маслобака, превышающем 200 мм.

В фильтрах ГМБ чаще применяют латунные тканые проволочные сетки квадратного плетения (ГОСТ 6613-86 [25]), а в случае необходимости – сетки повышенной антикоррозионной стойкости из нержавеющей стали, никеля, монель-металла. ФГО представляют собой две сетки, выполненные из латунной проволоки с размером ячейки в свету 250-500 мкм, а ФТО две сетки – 100-250 мкм.

Вспомогательная емкость, расположенная под ГМБ, заполняется маслом при останове турбоагрегата через переливную трубу. При пуске турбины это масло с помощью промежуточного перекачивающего насоса подается на заполнение опорожненных трубопроводов, бачков, охладителей и других элементов маслосистемы. К нижней точке ГМБ подключены аварийный слив, центрифуга, пресс-фильтр и другие маслоочистительные аппараты.

Схема масляных коммуникаций усложняется при объединении (совмещении) систем смазывания и маслоснабжения регулирования паровых турбин, предъявляющих повышенные требования к чистоте масла [49].

Под общим понятием «загрязненность» имеется ввиду суммарное количество всех посторонних в масле растворимых, частично растворимых и не растворимых в нем продуктов.

Чаще всего под загрязнением понимают только нерастворимые продукты, представляющие механические примеси, образующие с жидкостью, как правило, тонкие суспензии, частицы которых могут независимо друг от друга перемещаться

в дисперсной среде под влиянием теплового движения или гравитационных и других сил.

Загрязнения появляются и накапливаются в турбинном масле в процессе производства, транспортирования, хранения и применения [11, 16, 59, 66, 101, 117, 135, 146, 151].

Воздух, содержащийся в масле в виде пузырьков, снижает скорость передачи гидравлических импульсов, вызывает пульсацию давления в проточных линиях, уменьшает запас устойчивости системы регулирования. Существует взаимосвязь между аэрацией, обводнением и загрязнением масла, обусловленная качеством самого масла.

Борьба с обводнением является одновременно борьбой с аэрацией масла, поэтому эти вопросы решаются комплексно.

При фильтровании масла сетчатые перегородки способны задерживать значительную часть воздушных пузырьков, в связи с чем это свойство сеток используют для интенсификации воздуховыделения. Сетчатые фильтры также используют для обезвоживания масла [49].

Известны случаи отказов по системам смазки, подшипникам и регулированию из-за повышенного содержания в масле механических примесей [8, 18, 58, 136].

Повышенная загрязненность рабочих жидкостей в энергетике одна из причин отклонений частоты электрического тока за нормальные и допустимые пределы, увеличивает износ упорных колодок и вкладышей подшипников, вызывает электроэрозию и снижает надежность уплотнений вала генератора, ухудшает их эксплуатационные свойства и т.д. [68, 69, 75, 81, 91, 96, 113, 118, 132, 146].

В американском журнале *Machinery Lubrication* приводятся следующие данные, увеличение чистоты масла с 16/13 по ISO 4406 (10-11 класс по ГОСТ 17216-2001) [31] до 14/11 по ISO 4406 (8-9 класс по ГОСТ 17216-2001) [31] класса позволит увеличить срок службы оборудования в 1,5 раза [45, 46, 54, 63].

Исследованиями и опытом эксплуатации рабочих жидкостей в энергетике [51] и машиностроении [17] показано, что на надежность и долговечность

элементов гидросистем в первую очередь влияет гранулометрический состав загрязнений.

Для достижения необходимого уровня чистоты в системах смазки и регулирования турбин за рубежом, ниже описываются применяющихся на сегодняшний день методы очистки [110, 130].

Для паровых турбин лучшим выбором для удаления твердых загрязнений являются поверхностные фильтры. В основном это гофрированные бумажные фильтры, которые собирают загрязнения на своей поверхности, обеспечивая при этом высокую скорость потока при небольшом перепаде давления. Картриджные элементы в камере масляного фильтра должны соответствовать расходу масла, ограничению перепада давления и уровню загрязнения.

Фильтры глубинного типа рассматривают для применений с высокими уровнями загрязнения. В таких случаях поверхностные фильтры быстро теряют свою пропускную способность. Фильтры глубинного типа способны удалять частицы по всей глубине фильтрующего материала, пока фильтр не заполнится грязью и его не придется заменить.

Используя поверхностно-активные свойства фуллеровой земли, древесного угля или активированного глинозема, адсорбирующие фильтры удаляют воду и продукты окисления масла, а также служат фильтрами глубинного типа для удаления твердых загрязнений из масла.

Фильтры из активированного оксида алюминия продлевают срок службы огнестойких гидравлических жидкостей на основе эфиров фосфорной кислоты за счет удаления продуктов разложения. Однако слишком большое количество воды снижает эффективность адсорбирующих фильтров, а также удаляет из масла различные присадки, ухудшая характеристики смазочного материала в турбинах.

Уровень загрязнения масла 0,01% – это примерно максимальная концентрация, с которой эффективно справляется глубинный фильтр. При более высоких концентрациях загрязнений необходимо предварительное отстаивание, центрифугирование и (или) стадия самоочистки.

Предварительное осаждение в маслобаке обычно обеспечивает оптимальную первую ступень очистки масла. Более крупные частицы и вода оседают на дне резервуара, а большая часть воздуха высвобождается на поверхность при достаточном периоде выдержки.

Для турбин с низким уровнем загрязнения масла необходимо время выдержки 5-10 мин. Для смазочных материалов, сильно загрязненных водой и мелкими частицами время осаждения составляет около 30 мин.

Удаление большого количества свободной воды не под силу обычным масляным фильтрам. Для этих целей используется отстаивание или центробежное разделение, которые снижают содержание свободной воды в масле примерно до 20 ppm выше уровня насыщения.

Также используют коалесцентные фильтрующие картриджи, фильтры адсорбирующего типа и вакуумные камеры. Более дорогостоящее барботирование воздухом или азотом можно использовать для удаления растворенной и эмульгированной воды без риска потери присадок к маслу.

Свободная вода, обычно в виде относительно крупных капель, легко удаляется из масла путем осаждения, центрифугирования или коалесценции.

Поскольку часть потока масла в системе циркулирует через байпасный контур, на один фильтрующий картридж обычно можно удалить примерно 0,4-1,1 л воды.

Установки производительностью до 760 л/мин используют постоянные магниты для удаления частиц железа из масла для предотвращения износа элементов машин. Магнитный фильтр обычно встраивается в маслопроводы гидравлических агрегатов и турбинных приводов, подлежащих периодической разборке и очистке.

Байпасные фильтры изначально использовались в паровых турбинах. Благодаря постоянной фильтрации небольшого перепускного потока масла износ от повреждения частицами сводится к минимуму. Байпасные фильтры обеспечивают более тонкую фильтрацию при меньшем перепаде давления.

Объем байпасного потока варьируется от двух до пяти процентов для паровых турбин. Дуплексные фильтры в байпасном потоке позволяют проводить периодическую очистку во время работы, удаляя одновременно только один из двух параллельных блоков.

В последнее время, полнопоточные фильтры стали более популярными, чем байпасные. Полнопоточные фильтры обеспечивают подачу в машину только отфильтрованного масла. Это сводит к минимуму возможность повреждения подшипников и других компонентов системы частицами загрязнений, которые могли бы не попасть в байпасный фильтр.

Дуплексная схема с двумя альтернативными фильтрующими блоками, позволяет заменять один из полнопоточных фильтров, когда он загрязняется. Для защиты от нехватки смазочного материала при засорении фильтрующего элемента срабатывает перепускной клапан.

1.2. Стандарты, устанавливающие классы чистоты рабочей жидкости

Для определения промышленной чистоты рабочих жидкостей в мировой практике используются стандартизованные методы измерения. В соответствии с выбранным стандартом результат указывается в классах или кодах. Далее рассмотрим наиболее распространенные и важные стандарты.

В настоящее время разработан ряд стандартов, устанавливающих классы чистоты рабочей жидкости гидросистем. К ним в первую очередь следует отнести российский ГОСТ 17216-2001 [31]. Он классифицирует чистоту жидкости по гранулометрическому составу, устанавливает 19 классов чистоты жидкости.

В таблице 1.1 приведены характеристики классов чистоты жидкости в соответствии с российским стандартом. По этому стандарту допустимое число частиц в жидкости для последующего класса удваивается. Стандартизированный метод оценки чистоты позволяет контролировать содержание загрязнений турбинного масла в широких пределах.

Таблица 1.1 – Классы чистоты жидкости в соответствии с ГОСТ 17216-2001 [31]

Классы чистоты жидкостей	Число частиц загрязнителя в $(100 \pm 0,5)$ см ³ жидкости при размере частиц, мкм, не более									Масса загрязнителей, % не более	
	от 0,5 до 1	св. 1 до 2	св. 2 до 5	св. 5 до 10	св. 10 до 25	св. 25 до 50	св. 50 до 100	св. 100 до 200	Волокна		
00	800	400	32	8	4	1	Отсутствие	АО	АО	Не нормируется	
0	1600	800	63	16	8	2		Отсутствие			Отсутствие
1		1600	125	32	16	3	Отсутствие		Отсутствие		
2			250	63	32	4		Отсутствие			Отсутствие
3				125	63	8	Отсутствие		Отсутствие		
4				250	125	12		Отсутствие			Отсутствие
5				500	250	25	Отсутствие		Отсутствие		
6				1000	500	50		6			2
7				2000	1000	100	12	4	2		0,000064
8				4000	2000	200	25	6	3		0,000125
9			Не нормируется	8000	4000	400	50	12	4		0,00025
10				16000	8000	800	100	25	5		0,0005
11				31500	16000	1600	200	50	10		0,001
12				63000	31500	3150	400	100	20		0,002
13					63000	6300	800	200	40		0,004
14					125000	12500	1600	400	80		0,008
15						25000	3150	800	160		0,016
16						50000	6300	1600	315	0,032	
17							12500	3150	630	0,064	

Примечание:

1. «Отсутствие» – означает, что при взятии одной пробы жидкости частицы заданного размера не обнаружены или при взятии нескольких проб общее число обнаруженных частиц меньше числа взятых проб.

2. «АО» – абсолютное отсутствие частиц загрязнителя.

3. Зависимость класса чистоты жидкостей от массы содержащегося в ней загрязнителя с учетом числа частиц загрязнителя в жидкости является справочной.

Массы приведены для частиц загрязнителя со средней плотностью 4×10^3 кг/м³ и плотностью жидкости 1×10^3 кг/м³.

ГОСТ 17216-2001 [31] играет главную роль в представлении чистоты масел и топлив во всех областях гражданского и военного применения. Он распространяется не только на Россию, но и на все страны СНГ и некоторые азиатские страны, поставляющие на российский рынок. В зависимости от интерпретации определяются классы чистоты для различных размеров частиц в диапазоне от 0,5 до 200 мкм. ГОСТ 17216-2001 [31] основан на калибровочном стандарте ISO 4402 [128].

Широкое распространение получил Международный стандарт ISO 4406:2021 (таблица 1.2) [31]. Настоящий стандарт устанавливает систему кодирования, применяемую при определении количества твердых частиц в жидкости. ISO 4406 [31] в основном используется в гидравлической промышленности, однако компании в области фильтрации, топливной и автомобильной промышленности также принимают этот стандарт.

Таблица 1.2 – Распределение классификационных чисел в соответствии с Международным стандартом ISO 4406:2021 [31]

Число частиц в 1 см ³		Классификационное число
от	до (включительно)	
1	2	3
2500000	—	>28
1300000	2600000	28
640000	1300000	27
320000	640000	26
160000	320000	25
80000	160000	24
40000	80000	23
20000	40000	22

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3
10000	20000	21
5000	10000	20
2500	5000	19
1300	2500	18
640	1300	17
320	640	16
160	320	15
80	160	14
40	80	13
20	40	12
10	20	11
5	10	10
2,5	5	9
1,3	2,5	8
0,64	1,3	7
0,32	0,64	6
0,16	0,32	5
0,08	0,16	4
0,04	0,08	3
0,02	0,04	2
0,01	0,02	1
0,00	0,01	<1

Классы чистоты в соответствии со стандартом ISO 4406 [31] определяются суммарным количеством частиц в диапазонах размеров >4 мкм(с), >6 мкм(с) и >14 мкм(с). Для соответствия процессу стандартизации ISO размеры частиц были определены заново. Размеры частиц теперь отображаются в виде мкм(с). Дополнительный пункт (с) указывает на то, что счетчик частиц был откалиброван в соответствии со стандартом ISO 11171 [37]. Это позволяет легко

идентифицировать и дифференцировать старые и новые измерения. 1 мкм согласно ISO 4402 [128] равен приблизительно 4 мкм(с) согласно ISO 11171 [37]. Стандарт ISO 4406 [31] основан на калибровочном стандарте ISO 11171 [37]. Используемая калибровочная суспензия называется ISO MTD (ISO Medium Test Dust). Эта суспензия была введена после окончания производства суспензии ACFTD (Air Cleaner Fine Test Dust), которая ранее использовалась для калибровки счетчиков частиц в соответствии с ISO 4402 [128].

Цель кода – упростить представление данных о числе частиц отнесением частиц к классам или кодам, в которых увеличение одного кода удваивает уровень загрязненности последующего.

Первоначальный код в соответствии с ISO 4406 [31] устанавливал два размера представления частиц ≥ 5 и ≥ 15 мкм. Размеры представления частиц были пересмотрены и изменены для использования другой методики калибровки автоматических счетчиков частиц. Установлены размеры ≥ 4 , ≥ 6 и ≥ 14 мкм; последние два размера частиц эквивалентны 5 и 15 мкм. Использован метод калибровки автоматических счетчиков частиц по ISO 4402 [128]. ISO 4402 [128] заменен на ISO 11171 [37].

Измерение частиц оптическим микроскопом по ISO 4407 [35] устанавливает размер частицы как равный ее наибольшему размеру, в то время как автоматический счетчик частиц дает размер эквивалентной частицы по площади ее поперечного сечения, поэтому в большинстве случаев возникает значительное отличие от результатов подсчета частиц микроскопом. Размеры частиц, представленные для измерения микроскопом, ≥ 5 и ≥ 15 мкм не изменяются.

Подсчеты частиц зависят от множества факторов: отбора и подготовки проб, точности счетчика, пробоотборников и их чистоты. При отборе проб внимание должно быть сосредоточено на том, чтобы проба в пробоотборнике соответствовала жидкости в системе.

Код, соответствующий уровню загрязненности, состоит из трех классификационных чисел, позволяющих следующее дифференцирование размеров и распределение частиц и представляющих: первое – число частиц,

равных или больших 4 мкм в 1 см³ рабочей жидкости; второе – число частиц, равных или больших 6 мкм в 1 см³ рабочей жидкости; третье – число частиц, равных или больших 14 мкм в 1 см³ рабочей жидкости.

При подсчете частиц микроскопом код состоит из двух классификационных чисел ≥ 5 и ≥ 15 мкм.

Классификационные числа распределяют по числу подсчитанных частиц, содержащихся в 1 см³ рабочей жидкости (таблица 1.2).

Для обеспечения приемлемого соответствия классификационного числа каждому шагу в таблице соответствует шаговое отношение, равное двум шагам (в основном) для граф наибольшего и наименьшего числа частиц в 1 см³.

Воспроизводимость ниже классификационного числа 8 зависит от реального числа подсчитанных частиц в пробе жидкости. Результат подсчета должен быть больше 20 частиц. Когда результат подсчета частиц в 1 см³ меньше 20, классификационное число указывают символом \geq .

При записи числового кода допускается применять обозначения «*» – слишком много частиц для подсчета, поэтому они не считались или «→» – не считаются.

В отчетах по испытаниям, каталогах и проспектах используют следующую ссылку: «Код твердых загрязнителей соответствует ГОСТ 17216-2001 [31], приложение А которого идентично стандарту ISO 4406 [31]».

За рубежом для оценки уровня загрязненности рабочей жидкости наиболее часто используют стандарты ISO 4406 [31], SAE AS4059 [147] и NAS 1638 [115].

NAS 1638 [115] (таблица 1.3) является предшественником SAE AS4059 [147]. Являясь старейшим стандартом чистоты, он известен большинству пользователей. Изначально разработанный в 1960-х годах как руководство по чистоте гидравлических жидкостей в авиационной промышленности, он быстро стал применяться и в других отраслях. Классы чистоты в соответствии с NAS 1638 [115] определяются дифференцированными значениями в диапазонах размеров: от 5 до 15 мкм, от 15 до 25 мкм, от 25 до 50 мкм, от 50 до 100 мкм и более 100 мкм. Для выражения результатов согласно NAS 1638 [115] автоматические счетчики частиц

обычно калибруются в соответствии со стандартом ISO 4402 [128]. Поскольку в 1964 году, когда был опубликован NAS 1638 [115], счетчики частиц не были разработаны, первые калибровочные эталоны были ретроспективно адаптированы к NAS 1638 [115]. Производство калибровочного материала ACFTD по ISO 4402 [128] прекратилось в 1999 году, и с тех пор калибровки по ISO 4402 больше не эффективны. Компания Ramas GmbH, однако, имеет большой запас этого калибровочного материала ACFTD и в состоянии обеспечить калибровки в соответствии с ISO 4402 [128] по запросу, если клиентские приложения или старые проекты требуют этого стандарта.

Таблица 1.3 – Классы чистоты рабочих жидкостей гидросистем в соответствии с американским стандартом NAS 1638 [115]

Классы чистоты жидкостей	Число частиц загрязнений в объеме жидкости 100 см ³ (не более) при размере частиц, мкм				
	5-15	15-25	25-50	50-100	>100
00	125	22	4	1	0
0	250	44	8	2	0
1	500	89	16	3	1
2	1000	178	32	6	1
3	2000	356	63	11	2
4	4000	712	126	22	4
5	8000	1425	253	45	8
6	16000	2850	508	90	16
7	32000	5700	1012	180	32
8	64000	11400	2025	360	64
9	128000	22800	4050	720	128
10	256000	45600	8100	1140	256
11	512000	91200	16200	2880	512
12	1024000	182000	32400	5760	1024

В классификации NAS 1638 [115] кодовый номер относится к максимальному количеству частиц в пределах определенного диапазона размеров. Большинство пользователей используют единый кодовый номер, основанный на наибольшем количестве частиц в любом из диапазонов размеров. Это самый старый стандарт, принятый большинством промышленных пользователей. NAS 1638 [115] был замещен SAE AS4059 [147], однако он все еще используется.

Американским стандартом NAS 1638 [115] установлено 14 классов чистоты рабочей жидкости гидросистем. По этому стандарту число частиц последующего класса удваивается, а для каждого диапазона распределения частиц умножается примерно на шесть.

SAE AS4059 [147] – это стандарт классификации загрязнения частицами масел и жидкостей. Он был разработан SAE (Society of Automotive Engineers – американская Ассоциация автомобильных инженеров). Изначально он разрабатывался для использования в аэрокосмической промышленности США и Канады. AS означает аэрокосмический стандарт.

SAE AS4059 [147] был разработан на смену стандарту NAS 1638 [115] и с целью устранения существующих недостатков NAS 1638 [115]. Обладает, прежде всего, прослеживаемостью используемого калибровочного эталона. NAS 1638 [115] не имеет прослеживаемости к эталону. SAE AS4059 [147] в основном используется военными и компаниями из авиационной, аэрокосмической и морской нефтегазовой промышленности. В зависимости от применения указывается 5 или 6 классов чистоты. Для 6-ти размерных каналов: > 4 мкм(с), 6 мкм(с), 14 мкм(с), 21 мкм(с), 38 мкм(с) и 70 мкм(с). Для 5-ти размерных каналов: >6 мкм(с), 14 мкм(с), 21 мкм(с), 38 мкм(с) и 70 мкм(с). Это последняя редакция, которая удалила диапазон A-F (6 каналов) и B-F (5 каналов) из стандартного результата отчета. Результат сообщается в самом большом классификационном коде каналов с размером, перед которым стоят буквы срс. Буквы срс обозначают совокупное количество частиц. Например, результат отображается как – SAE AS4059 срс 4. Как и стандарт ISO 4406 [31], SAE AS4059 [147] основан на калибровочном стандарте ISO 11171 [37].

С момента первоначального выпуска стандарта в 1988 году он претерпел несколько изменений. Последняя редакция вышла в 2022 году.

Так же, как и для NAS 1638 [115], код чистоты дается на основе количества частиц в диапазоне размеров частиц 100 мл пробы масла, где код 12 соответствует самому грязному, а код 00 – самому чистому.

Результаты даны на основе 2 разных таблиц. В таблице 1.4 указаны коды чистоты, основанные на количестве частиц в 5 различных диапазонах размера частиц (6-14, 14-21, 21-38, 38-70, >70) и (5-15, 15-25, 25-50, 50-100, >100). Так же обозначался NAS 1638 [115].

Таблица 1.4 – Коды чистоты рабочих жидкостей гидросистем в соответствии с американским стандартом SAE AS4059 [147]

Классы чистоты жидкостей	Число частиц загрязнений в объеме жидкости 100 см ³				
	5-15 мкм	15-25 мкм	25-50 мкм	50-100 мкм	>100 мкм
	6-14 мкм(с)	14-21 мкм(с)	21-38 мкм(с)	38-70 мкм(с)	>70 мкм(с)
12	1024000	182400	32400	5760	1024
11	512000	91200	16200	2880	512
10	256000	45600	8100	1440	256
9	128000	22800	4050	720	128
8	64000	11400	2025	360	64
7	32000	5700	1012	180	32
6	16000	2850	506	90	16
5	8000	1425	253	45	8
4	4000	712	126	22	4
3	2000	356	63	11	2
2	1000	178	32	6	1
1	500	89	16	3	1
0	250	44	8	2	0
00	125	22	4	1	0

В таблице 1.5 указан код, основанный на кумулятивном числе в пределах 6 различных размеров частиц (4, 6, 14, 21, 38, 70 мкм в соответствии с новым стандартом размера частиц) и (2, 5, 15, 25, 50, 100 в соответствии к старому стандарту размера частиц). Различные размеры обычно указываются заглавной буквой.

Таблица 1.5 – Коды чистоты рабочих жидкостей гидросистем в соответствии с американским стандартом SAE AS4059 [147]

Классы чистоты жидкостей	Число частиц загрязнений в объеме жидкости 100 см ³					
	A	B	C	D	E	F
	>1 мкм	>5 мкм	>15 мкм	>25 мкм	>50 мкм	>100 мкм
	>4 мкм(с)	>6 мкм(с)	>14 мкм(с)	>21 мкм(с)	>38 мкм(с)	>70 мкм(с)
12	3200000	1245584	221584	39184	6784	1024
11	1600000	622792	110792	19592	3392	512
10	800000	311396	55396	9796	1696	256
9	400000	155698	27698	4898	848	128
8	200000	77849	13849	2449	424	64
7	100000	38924	6924	1224	212	32
6	50000	19462	3462	612	106	16
5	25000	9731	1731	306	53	8
4	12500	4864	864	152	26	4
3	6250	2432	432	76	13	2
2	3120	1217	217	39	7	1
1	1560	609	109	20	4	1
0	780	304	54	10	2	0
00	390	152	27	5	1	0
000	195	76	14	3	1	0

Классы чистоты рабочей жидкости – это безразмерные величины, характеризующие концентрацию частиц механических включений, находящихся в жидкости. Под концентрацией, в этом случае, понимают количество частиц,

находящихся в заданном объеме жидкости. Например, класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31] требует подсчета частиц в 100 мл жидкости, а ISO коды чистоты рассчитывают по количеству частиц в 1 мл.

В каждом стандарте содержится таблица с диапазонами количеств частиц, для которых присвоен код или класс чистоты масла. В таблице стандарта может быть указано количество всех частиц больших, чем заданное значение размера, например, «все частицы размером более 5 мкм» или «количество частиц с размерами от 5 до 10 мкм». Первый способ подсчета называется кумулятивным или интегральным, он используется в ISO 4406 [31], а второй способ называется дифференциальным, и он используется в ГОСТ 17216-2001 [31] и NAS 1638 [115]. Самым информативным стандартом заслуженно считается SAE AS4059 [147], в котором предусмотрены оба способа подсчета: интегральный и дифференциальный.

Эти два способа счета количества частиц продиктованы двумя большими областями применения этих стандартов: для контроля фильтрования удобен интегральный счет, а для мониторинга во время эксплуатации больше информации дает дифференциальный счет.

Например, классы чистоты турбинного масла при его производстве следует оценивать по интегральному счету, а при использовании этого масла в турбинах предпочтительнее использовать дифференциальный счет, так как это дает больше информации о частицах больших размеров, что важно для надежности работы турбины.

Стандарт DEF STAN 91-91 [116] опубликован Министерством обороны Великобритании. В этом стандарте перечисляются избранные стандарты международных организаций стандартизации, например, методы International Petroleum (IP), Энергетического института Лондона (EI) или методы ASTM (Американское общество испытаний материалов). Стандарт DEF STAN 91-91 [116] применяется в военной и авиационной отрасли. Стандарт ISO 4406 [31] указывается в качестве эталонного стандарта в DEF STAN 91-91 [116]. Результаты измерения выводятся по трем размерным каналам >4 мкм(с), >6 мкм(с) и >14

мкм(с). Калибровка DEF STAN 91-91 [116], как и для ISO 4406 [31], базируется на калибровочном стандарте ISO 11171 [37] (с использованием тестовой пыли ISO MTD).

Китайский военный стандарт GJB 420 [108] был сформулирован для авиационной промышленности и сходен со стандартом SAE AS4059 [147]. Стандарт GJB 420 [108] применяется в военной и авиационной промышленности. Этот стандарт измеряет размеры частиц по шести каналам: >4 мкм, >6 мкм, >14 мкм, >21 мкм, >38 мкм и >70 мкм. Процедура калибровки выполняется по ISO 11171 [37] с тестовой пылью ISO MTD.

Сравнивая данные таблиц 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4, можно сделать вывод о соответствии классов чистоты ГОСТ 17216-2001 [31], NAS 1638 [115], ISO 4406 [31] и SAE AS4059 [147] (таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Соответствие классов чистоты ГОСТ 17216-2001 [31], NAS 1638 [115], ISO 4406 [31] и SAE AS4059 [147]

ГОСТ 17216 [31]	NAS 1638 [115]	ISO 4406 [31]	SAE AS4059 [147]
7 класс	3 класс	14/12/9	4 класс
8 класс	4 класс	15/13/10	5 класс
9 класс	5 класс	16/14/11	6 класс
10 класс	6 класс	17/15/12	7 класс
11 класс	7 класс	18/16/13	8 класс
12 класс	8 класс	19/17/14	9 класс
13 класс	9 класс	20/18/15	10 класс
14 класс	10 класс	21/19/16	11 класс
15 класс	11 класс	22/20/17	12 класс
16 класс	12 класс	23/21/18	13 класс

Американским обществом по испытанию материалов (ASTM) и Американской ассоциацией промышленности (AIA) были разработаны стандарты для определения классов чистоты жидкостей гидравлических систем. На основе

стандартов SAE, ASTM и AIA фирма Cincinnati предложила определять классы чистоты рабочих жидкостей исходя из того, что зависимость количества загрязняющих частиц от их размера подчинена логарифмическому закону. Ф. В. Коли [52] предложил для линеаризации накопленного распределения загрязняющих частиц по размерам использовать сетку lg/lg^2 . На рисунке 1.3 представлен график уровней загрязнения рабочих жидкостей гидравлических систем в соответствии с классами чистоты, предложенными фирмой Cincinnati (таблица 1.7) [52], с использованием сетки lg/lg^2 . При этом было сохранено удвоение количества загрязняющих частиц одного и того же размера для каждого последующего класса.

Таблица 1.7 – Классы чистоты рабочих жидкостей гидросистем, предложенные фирмой Cincinnati [52]

Классы чистоты жидкостей	Число частиц загрязнений в объеме жидкости 100 см ³ (не более) при размере частиц, мкм (кумулятивный подсчет)				
	5-10	10-25	25-50	50-100	>100
00	1410	459	55	6	0
0	2823	921	133	14	1
1	5650	1845	228	29	2
2	11301	3691	457	59	5
3	22604	7383	914	118	10
4	45212	14769	1830	237	20
5	90426	29539	3661	475	41
6	180857	59082	7325	952	83
7	361717	118166	14652	1905	166
8	733437	236335	29307	3812	333
9	1446879	472674	58617	7626	667
10	2893763	945352	117237	15254	1335

Следует отметить, что прямолинейные зависимости при использовании сетки lg/lg^2 не всегда подтверждаются практикой, хотя математическая модель

lg/lg^2 является наиболее приемлемой с этой точки зрения. В то же время, исследования загрязненности гидравлических систем в эксплуатации показывают, что во многих случаях количество загрязняющих частиц в каждой размерной группе в зависимости от класса чистоты подчиняется логарифмическому закону [114].

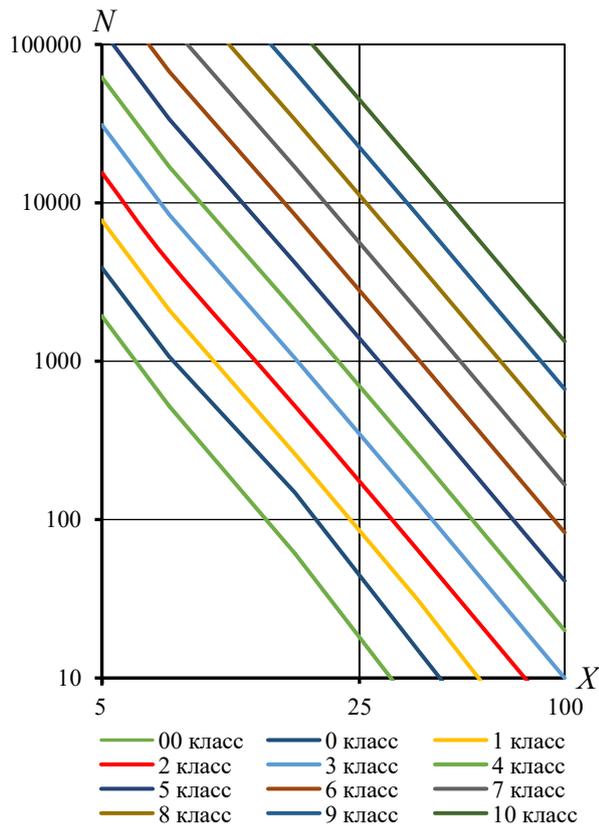


Рисунок 1.3 – Кривые загрязнений рабочей жидкости гидросистем по классам, предложенным фирмой Cincinnati (сетка lg/lg^2): 00, 0, 1...10 – классы чистоты; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

1.3. Методы определения степени загрязненности рабочей жидкости

Из всего многообразия методов определения содержания механических примесей в жидкостях, когда-либо имевших практическое применение,

наибольшее распространение получили: визуальный метод контроля; метод взвешивания частиц механических примесей и метод подсчета их количества (гранулометрический метод) [99, 104, 105, 105].

Наиболее простым методом контроля чистоты рабочей жидкости является визуальный контроль. В этом случае через фильтр тонкой очистки пропускают определенный объем жидкости и затем осматривают поверхность фильтра. По обнаруженным загрязнениям оценивают чистоту. Без применения оптических средств таким способом можно обнаружить частицы размером более 40 мкм. Применяется также оптический фильтр, в корпус которого ставится подсвечивающая лампа и линза с 4 или 10 кратным увеличением. С помощью оптического фильтра возможно обнаружить частицы загрязнений размерами 15-20 мкм [44].

Сущность второго метода заключается в определении весовым способом массы механических примесей, задерживаемых специальными лабораторными фильтрами при фильтровании через них горячего раствора рабочей жидкости в бензине или бензоле (ГОСТ 6370-83 [24] и ГОСТ 12275-66 [29]).

При определении загрязнений масел минерального происхождения по ГОСТ 6370-83 [24], контролируемую пробу (обычно $100 \pm 0,5$ см³) разбавляют подогретым бензином или бензолом до температуры 40°C и 80°C соответственно (отношение объема растворителя к массе пробы от 2 до 4) и тщательно перемешивают. Затем производят фильтрование масла через высушенный и взвешенный с точностью до 0,2 мг беззольный фильтр, установленный в воронке. После фильтрования фильтрованную бумагу с осадком промывают горячим бензином, помещают в стаканчик и высушивают в сушильном шкафу при температуре 100-105°C до тех пор, пока расхождение между двумя последовательными взвешиваниями будет не более 0,4 мг. Затем фильтр со стаканом взвешивают с точностью до 0,2 мг и определяют массовую концентрацию механических примесей. Содержание механических примесей вычисляется как среднее арифметическое из результатов двух параллельных определений.

При анализе по ГОСТ 12275-66 [29] в качестве контрольных используются фильтры мембранные и нитроцеллюлозные № 4 и № 5, имеющие средний размер пор 1,3 и 0,6 мкм. Для определения органической и неорганической части загрязнений беззольный фильтр, через который пропускается контрольная проба масла, сжигается вместе с осевшими на нем загрязнениями. Неорганическую часть загрязнений определяют как разность общей концентрации загрязнений и концентрации органической части загрязнений.

Следует отметить, что описанный метод оценки массы механических примесей имеет недостатки. Часть частиц, размер которых меньше размера пор, проходит через фильтр, их масса не учитывается. Также разбавление масла бензином или другими растворителями и последующая промывка фильтра бензином приводит к дополнительному загрязнению фильтра [44]. Определение содержания механических примесей методом взвешивания требует не менее 3,5-4 часов, в том числе не менее 3-х часов на сушку и охлаждение фильтров до и после фильтрования, а также значительного количества контролируемого продукта и разбавителя. Массовая концентрация загрязнений масла позволяет оценить в турбинных маслах лишь общее содержание загрязнений, что в настоящее время является недостаточным для принятия правильных решений. При одной и той же массовой концентрации в жидкости может быть разное сочетание мелких и крупных частиц загрязнений, что не может достаточно полно характеризовать степень и опасность загрязнения. Метод весьма чувствителен к содержанию в фильтруемом растворе воды. Точность, сходимость и воспроизводимость метода взвешивания во многом зависит от характера и степени загрязнения, свойств лабораторных фильтров и навыков лаборанта.

Для определения гранулометрического состава загрязнений и класса чистоты масла широко используются микроскопические методы контроля. Методы основаны на подсчете под микроскопом с 250 или 500 кратным увеличением количества частиц загрязнений для каждого размерного диапазона (ГОСТ 17216-2001 [31]), оседающих из пробы жидкости на дно осадочного стакана или задержанных на поверхности нитроцеллюлозного мембранного

фильтроэлемента [44]. Подсчет производят последовательно в полях зрения, определяя размер и количество частиц, передвигая предметный столик таким образом, чтобы исключить повторный замер и подсчет частиц загрязнений. Размер частиц, кроме волокон, принимается по наибольшему измерению. При подсчете частицы группируются по размерным диапазонам (фракциям). По этой причине при подсчете частиц определяют не абсолютный размер каждой частицы, а только принадлежность их к той или иной размерной группе.

При использовании первого способа пробу масла (обычно в объеме $100 \pm 0,5 \text{ см}^3$) заливают в чистый стакан с плоским и прозрачным дном и закрывают крышкой. Время отстаивания зависит от его вязкости и для минеральных масел составляет 5-10 часов. Необходимо отметить, что на дно стакана осаждаются только частицы с большей, чем у исследуемого масла, плотностью, а смолистые выделения, ворсинки и частицы размером меньше 2 мкм практически не осаждаются. В проходящем свете после фокусирования на предметном столе микроскопа осажденные частицы хорошо видимы и могут быть подсчитаны оператором либо сфотографированы. Для повышения точности подсчетов производят микрофотографирование полей загрязнений, осевших на дно стакана частиц. Применение микроскопов при 500 кратном увеличении позволяет определить частицы загрязнений с размерами 0,5-1,5 мкм. Предложенный способ определения состава загрязнений имеет несколько недочетов, понижающих его точность. Так, часто наблюдаемая коагуляция осевших на дно стакана частиц усложняет определение истинных размеров загрязнений. При большой концентрации загрязнений, осевших на дно стакана, определить размер и количество загрязнений не представляется возможным. Для проведения анализа необходимо либо изменять объем исследуемого масла, залитого в стакан, либо масло предварительно разбавляют фильтрованным бензином. При использовании микрофотографического метода контроля масла субъективная погрешность оператора может достигать 100%, поэтому определение количества частиц в каждом размерном интервале с необходимой достоверностью может быть произведено на основе статистических методов, а именно при помощи

регрессионного анализа. Число сфотографированных участков пробы выбирают в зависимости от загрязнений масла и допустимой погрешности измерений [44].

Доказано, что используемые в лабораториях предприятий микроскопические методы контроля является весьма трудоемкими и затратными, поэтому все важнее становится проблема создания автоматических средств контроля гранулометрического состава загрязнений рабочих жидкостей. Так, находят применение телевизионные микроскопы.

Для определения размера частиц загрязнений и их количества при помощи телевизионных микроскопов мембранный фильтр с отфильтрованными на нем частицами загрязнения ставится на предметный стол микроскопа. Изображение выводится на экран видеоустройства, на который нанесена калиброванная сетка, с помощью которой определяют размер частиц. Число частиц подсчитывается визуальным методом; при необходимости производится фотографирование полей зрения микроскопа.

Мембранный фильтр необходимо смотреть в проходящем и на отраженном свете. Для просмотра мембранного фильтра в проходящем свете его освещают специальным раствором (гексаном, диоксаном, дихлорэтаном), в парах ацетона. При освещении фильтры накладывают на прозрачное стекло частицами вниз, после высушивания осветленного фильтра частицы прочно консервируются между предметным стеклом и пленкой, в которую превращается мембранный фильтр. Предметный стол перемещается вручную, что усложняет процесс исследования. Дальнейшим совершенствованием телевизионной установки для гранулометрического анализа загрязнений является использование специальных анализирующих приборов для автоматического процесса подсчета частиц загрязнений групп разного размера и сканирующих столиков с программным управлением от микропроцессора по заранее разработанной программе. Использование телевизионных микроскопов в сочетании с вычислительной техникой для осуществления гранулометрического контроля чистоты рабочих жидкостей позволяет уменьшить время контроля в 4 раза и увеличить точность результатов анализа [44].

Межгосударственный стандарт ISO 4407 [35] устанавливает методы определения степени загрязненности твердыми частицами жидкостей, используемых в гидросистемах, путем подсчета частиц на поверхности мембранного фильтра с помощью оптического микроскопа. В стандарте приведены процедуры отделения твердых частиц в жидких пробах с использованием вакуумного фильтрования. Подсчет частиц и анализ изображений проводят двумя ручными методами при использовании системы проходящего или отраженного света. Устанавливаемые настоящим стандартом методы применяют для подсчета частиц размерами не менее 2 мкм, при этом точность результатов зависит от используемой оптической системы и способностей оператора. Все гидравлические жидкости, имеющие широкий диапазон степени загрязненности, могут быть проанализированы по настоящему стандарту. Установленный стандартом метод гарантирует получение точных и согласующихся результатов. Неопределенность измерений возрастает при снижении фильтрованного объема для подсчета более крупных частиц, при наличии мелкого осадка или высокой концентрации частиц – для подсчета более мелких частиц.

В отличие от весового метода, микроскопирование позволяет дать как количественную, так и качественную оценку механических примесей во всем диапазоне классов промышленной чистоты.

Особое внимание для оценки загрязненности турбинного масла заслуживают методы дисперсионного анализа, основанные на их оптических свойствах: поглощение, отражение и рассеяние света. Эти методы являются универсальными, бесконтактными, позволяющими исследовать труднодоступные объекты, не нарушая их исходного состояния.

При исследовании микроструктуры турбинного масла и изучении процессов образования и накопления загрязнений наибольший интерес представляют методы, основанные либо на регистрации светочувствительным элементом (фотодиодом) изменения светового потока от источника света во время перекрытия части светового потока отдельной частицей, перемещающейся с потоком контролируемой жидкости, либо на изменении интенсивности углового

распределения рассеянного света. Последнее связано с тем, что угловое распределение рассеянного света очень чувствительно к изменению числа и размеров частиц дисперсной системы.

Для увеличения точности и ускорения процессов контроля чистоты рабочих жидкостей в России и за рубежом интенсивно разрабатываются автоматические счетчики частиц. Они позволяют производить подсчет частиц различных размерных групп в соответствии с выбранным стандартом. Время анализа около 60 с.

Таким образом, применение метода подсчета числа твердых и мягких частиц для количественной оценки механических примесей по гранулометрическому составу для экспресс-анализа промышленной чистоты и обводненности турбинного масла возможно и целесообразно при замене микроскопа более современными и удобными для этих целей приборами, представляющими собой автоматические счетчики частиц.

На сегодняшний день в России существуют следующие официальные методы измерения счетной концентрации частиц с помощью автоматических счетчиков: ГОСТ 31247-2004 [33] разработан с учетом основных нормативных положений международного стандарта ISO 11500:1997 [33]; ГОСТ 34236-2017 [34] идентичен стандарту ASTM 7619 [57].

Метод количественного анализа только твердых частиц по ГОСТ 31247-2004 [33] применяют для контроля: количества частиц в жидкостях гидравлических систем; качества процессов промывки узлов и гидроагрегатов; работы вспомогательного оборудования и испытательных установок; состояния жидкости в упаковке (таре). Описанный метод имеет ряд существенных недостатков. Попадание воды в масло – распространенное явление при эксплуатации паровых турбин. Тест на содержание воды в масле «потрескивание при нагревании на поверхности до 160°C» может дать приблизительную оценку, а точность определения во многом зависит от навыков лаборанта [125]. Его самым большим ограничением является – субъективность. Ложные срабатывания возможны при наличии летучих растворителей и газов [137]. Счетчики частиц являются

высокоточным и высокочувствительным инструментом и даже незначительное количество эмульгированной воды в контролируемой жидкости может привести к ошибочным показаниям. Если проба содержит достаточно воды для того, чтобы влиять на счет частиц или жидкость темная, ее анализируют после разбавления растворителем (10% жидкой пробы на 90% растворителя). Процесс разбавления вызывает значительные ошибки в результатах подсчета из-за постороннего загрязнения, которое увеличивается в результате разбавления пробы. Согласно стандарту, если данный метод не подходит, следует использовать альтернативные методы подсчета частиц. Если загрязнение пробы очевидно при визуальном контроле (например, содержатся видимые частицы или чистая вода, проба мутная) и вероятность его влияния на работу датчика прибора велика, данную пробу не анализируют методом, приведенным в настоящем стандарте. Турбинные масла уже средней степени окисленности и обводненности имеют такой темный цвет, что визуальное определение загрязнений невозможно.

В ГОСТ 34236-2017 (ASTM 7619) [34] измеряют сумму твердых частиц, диспергированных в пробе капель воды и других частиц автоматическим счетчиком частиц SETA-AvCount (Великобритания, снят с производства) в легких и среднестиллятных топливах. Данный метод не используется для анализа турбинных масел.

Настоящая работа ставит своей целью разработать методику экспресс-анализа чистоты турбинного масла и содержания в нем эмульгированной воды с применением отечественного прибора для контроля чистоты жидкости ПКЖ-904 и с ее помощью исследовать влияние процессов загрязнения и очистки на чистоту рабочей жидкости в системах маслоснабжения паровых турбин. Оперативный контроль чистоты турбинного масла может осуществляться непосредственно на электростанциях.

1.4. Автоматические счетчики частиц

Автоматические счетчики частиц практически полностью заменили собой оптическую микроскопию в качестве основного метода подсчета частиц загрязнений в системах с жидкой смазкой.

Отечественный прибор контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А показан на рисунке 1.4, разработчиком и производителем которого является авиационная и аэрокосмическая промышленность [73].

Работа прибора основана на регистрации светочувствительным элементом (фотодиодом) изменения светового потока от источника света во время перекрытия части светового потока отдельной частицей, перемещающейся с потоком контролируемой жидкости. Рабочая жидкость с загрязняющими частицами проходит через измерительную ячейку датчика. Световой луч от источника света направляется перпендикулярно потоку жидкости и полностью его охватывает, что позволяет контролировать всю жидкость, проходящую через датчик прибора (рисунок 1.5) [14].

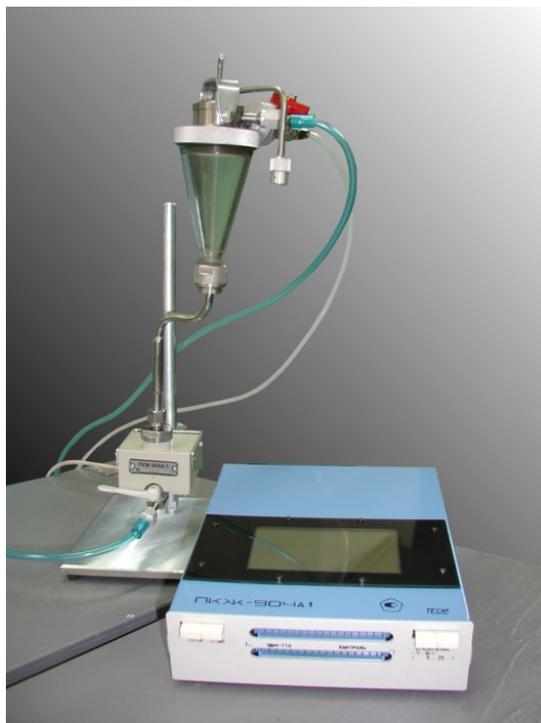


Рисунок 1.4 – Прибор контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А [73]

Он пронизывает поток жидкости и попадает на фотодиод с противоположной стороны. Интенсивность светового потока выбирают исходя из условия получения выходного сигнала фотодиода необходимой стандартной величины. При прохождении загрязняющей частицы через окно датчика, часть светового потока перекрывается, фотодиод выдает сигнал, пропорциональный величине частицы. Мгновенное изменение светового сигнала передается на соответствующий счетчик частиц, предварительно настроенный на различные диапазоны загрязняющих частиц. Изменения электрического сигнала фотодиода, вызванные частицами, находящимися в жидкости, пропорциональны размеру частиц, а длительность их измерений равна времени прохождения частицы чувствительного объема датчика. Электрические сигналы фотодиода усиливаются, анализируются по амплитуде и распределяются по соответствующим размерным диапазонам на табло прибора [14].

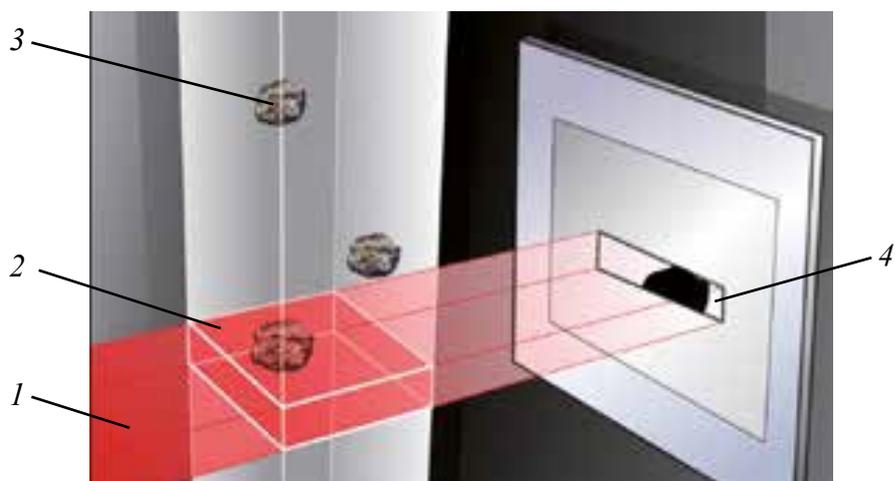


Рисунок 1.5 – Принцип работы автоматического счетчика частиц в жидкости [3]:

- 1 – световой поток от источника света; 2 – измерительная ячейка датчика;
3 – частица загрязнений в потоке жидкости; 4 – фотодиод

Технические характеристики прибора ПКЖ-904 приведены в таблице 1.8 [73].

Результаты измерений индицируются на цифровом табло в шести размерных диапазонах (5-10, 10-25, 25-50, 50-100, 100-200 и более 200 мкм).

Прибор имеет кнопки отключения диапазонов 5-10 и 10-25 мкм. В случае если жидкость содержит более 150000 частиц в 100 см^3 , загорается сигнализатор «перегрузка». Если количество частиц в 100 см^3 жидкости превышает 150000 в 2, 4, 8, 16 и 32 раза загорается один из сигнализаторов уровня загрязненности 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно.

Таблица 1.8 – Технические характеристики прибора ПКЖ-904 [73]

Свойство	Значение
Диапазон размеров измеряемых частиц, мкм	5-10, 10-25, 25-50, 50-100, 100-200, свыше 200
Максимально измеряемая концентрация загрязнений, шт./ 100 см^3 в т.ч. с градацией по размерным диапазонам, шт./ 100 см^3	$4,8 \times 10^6$ $1,5 \times 10^5$
Сходимость показаний, %	
При контроле в потоке Последовательными пробами	не хуже 5 не хуже 10
Параметры контролируемых жидкостей:	
Наибольшее допустимое давление жидкости на входе прибора, МПа (кгс/см ²), не более	0,5 (5)
Диапазон температур контролируемых жидкостей, °С	10-70
Вязкость при температуре от 10 до 70°С, МПа×с, не более	50
Коэффициент светопропускания, %, не менее, при толщине слоя 10 мм	1
Расход жидкости, см ³ /мин	100
Время готовности прибора к работе, мин, не более	5
Время непрерывной работы, ч, не более	8
Электропитание	переменное, 220 В 50 Гц
Потребляемая мощность, Вт, не более	15
Габаритные размеры, мм	350×225×200
Масса (без принадлежностей), кг, не более	3,5

Класс промышленной чистоты контролируемой жидкости определяется по результатам измерений количества частиц во всех диапазонах измеряемых частиц, отнесенных к 100 см^3 в соответствии с ГОСТ 17216-2001 [31].

Для определения дисперсионного состава частиц механических примесей на приборе ПКЖ-904А [73] необходима система подачи сжатого газа (воздух, азот или другие инертные газы), обеспечивающая давление в диапазоне 0-0,5 МПа (0-5 кгс/см²). Давление подбирается опытным путем для обеспечения расхода контролируемой жидкости 100 ± 10 см³/мин и зависит от ее вязкости.

Многолетний опыт производства и эксплуатации, современный уровень метрологического обеспечения при поверке прибора, подтверждают высокую надежность их, точность в условиях лабораторных, цеховых и специальных измерений.

Анализатор промышленной чистоты жидкостей PAMAS S-40 (Германия) – портативный прибор для подсчета частиц загрязнений в жидкостях, таких как гидравлические, турбинные, трансмиссионные и подобные им типы рабочих жидкостей (рисунок 1.6) [3].



Рисунок 1.6 – Анализатор промышленной чистоты жидкостей PAMAS S-40 [3]

Система подсчета количества частиц использует принцип оптического затенения. Усовершенствованная оптическая ячейка и сенсор обеспечивают высокую точность измерений. Используемая в приборе S-40 объемная оптическая ячейка гарантирует, что все проходящие частицы будут зафиксированы. Тем самым обеспечивается представительность анализа, а информация о количестве

частиц разного размера во всем объеме пробы является полной и статистически воспроизводимой.

Метрологические характеристики модели S-40 соответствуют параметрам лабораторных измерений, а малый вес, портативность и прочность позволяют использовать прибор в самых неблагоприятных условиях.

Избыточное давление в аналитической ячейке позволяет избежать образования пузырьков газа во время измерения.

Результаты отображаются на большом, ярком и контрастном дисплее и распечатываются на встроенном принтере. Пользователь может получать результаты в виде кодов ISO, классов чистоты по ГОСТ, NAS и SAE, количества частиц и объема пробы. Уровни доступа закрыты паролями для защиты настроек прибора и результатов измерений.

Внутренняя память для результатов измерений позволяет обслуживать большие парки техники или сложные технологические производства.

Даже при полном разряде основного аккумулятора, сохраняются настройки прибора и результаты измерений благодаря отдельной батарее для сохранения данных. Современное программное обеспечение для скачивания данных делает перенос результатов из прибора в компьютер очень простым.

Технические характеристики анализатора промышленной чистоты жидкостей PAMAS S-40 приведены в таблице 1.9 [3].

Процедура калибровки счетчиков для обеспечения наибольшего соответствия подсчетов, полученных с их помощью, с результатами микроскопии, в течение последних тридцати лет постоянно совершенствуется.

В анализаторе частиц для испытаний смазочных материалов и гидравлических жидкостей LaserNet 200 (США) (рисунок 1.7) [133] реализована передовая в мире технология подсчета частиц в смазочных материалах. Инновационные разработки делают этот прибор простым и удобным в эксплуатации анализатором частиц. Он определяет загрязняющие вещества (песок, волокна) и продукты износа (металлы), которые образуются при износе деталей. Выполняет подсчет с учетом наличия пузырьков воздуха и эмульгированной воды.

Таблица 1.9 – Технические характеристики анализатора промышленной чистоты жидкостей PAMAS S-40 [3]

Свойство	Описание
Допустимая вязкость пробы	До 200 сСт – для лабораторной пробы или при подключении к системам без давления. До 350 сСт – при подключении к системам с давлением
Режимы измерения	Низкое давление: 0-6 бар – измерение лабораторных проб и подключение к системам с низким давлением или без давления. Высокое давление: 3-420 бар – подключение к системам с давлением
Стандарты измерений	ГОСТ 17216 [31], ISO 4406 [31], NAS 1638 [115], SAE AS4059 [147], GJB 420A [108]
Оптический сенсор	Тип: PAMAS HCB-LD-50/50 Максимальная концентрация частиц: 24000 на 1 мл при совпадении 7,8 %. Номинальный расход через прибор: 25 мл/мин
Размерные диапазоны (каналы)	Каналы 4, 6, 10, 14, 21, 25, 38, 70 мкм(с) (калибровка ISO 11171 [37]) используются для расчетов кодировок по ISO 4406 [31] и SAE AS4059 [147]. Каналы 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 мкм (калибровка ISO 4402 [128]) используются для расчета кодировок по ГОСТ 17216 [31], NAS 1638 [115] и ISO 4406 [31] (1987 г.)
Модификации и опции	S-40 SkyDroll: Предназначена для анализа фосфоорганических масел, таких как SkyDroll, HyJet и подобных. Модификация выполнена из материалов совместимых с синтетическими маслами на базе эфиров фосфорорганических кислот. S-40 Lube: Предназначена для анализа только лабораторных проб и подключения к системам с давлением до 6 бар S-40 GO: Анализатор размещен в ударопрочном кейсе для постоянных транспортировок и работы в тяжелых условиях
Программное обеспечение	Используя дополнительное программное обеспечение PAMAS S40 [3] можно использовать через ПК как лабораторный блок. Удобная настройка параметров измерения. Отчет и анализ об измерениях, включая коды чистоты в числовом и графическом представлении
Память	4000 измерений
Управление	Сенсорный дисплей и клавиатура
Преимущества	Полностью русифицированное меню и печать результатов. Аккумулятор для автономной работы до 4 часов
Вес	7,5 кг
Размеры	300×140×300 мм
Электропитание	100-240 В, 50-60 Гц



Рисунок 1.7 – Анализатор частиц для испытаний смазочных материалов и гидравлических жидкостей LaserNet 200 [133]

В системе LaserNet 200 [133] используется запатентованный подход к тестированию жидкости непосредственно из посуды с пробой. Счетчик частиц с технологией подсчета по изображениям (CCD камера) и магнитометр обеспечивают: подсчет частиц и определение кодов чистоты, классификацию износа, подсчет железосодержащих частиц и их распределение по размерам и определяют их общее количество. Образцы рабочей жидкости проходят через проточную кювету, освещенную лазером, а видекамера CCD подсчитывает и классифицирует частицы по данным изображения (рисунок 1.8). Этот метод предоставляет пользователю очень надежный и точный счетчик частиц, который может работать с широким диапазоном грязных и чистых образцов с различной вязкостью.

Способность LaserNet 200 [133] фиксировать фактический силуэт частиц износа обеспечивает возможность «автоматической феррографии» для классификации частиц износа. Все частицы размером более 20 мкм классифицируются нейронной сетью по таким категориям, как резка, усталость,

сильное скольжение, неметаллические, эмульгированная вода, пузырьки воздуха и ВОЛОКНА.

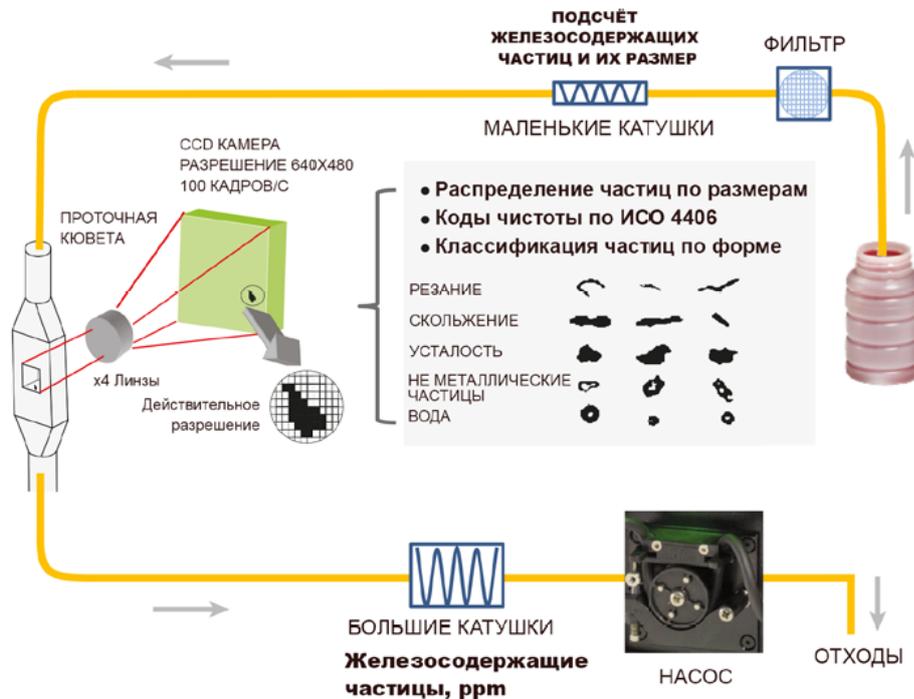


Рисунок 1.8 – Диаграмма потока масла в счетчике частиц LaserNet 200 [133]

Серия LaserNet 200 [133] позволяет специалистам быстро и легко оценить состояние оборудования всего за несколько минут. Проверяя всего несколько миллилитров жидкости, пользователи видят полную картину износа машины и загрязнения частицами. Это позволяет определить эффективность фильтрования, тип возникающего режима износа и изменение концентрации металлических частиц для проведения технического обслуживания.

Технические характеристики анализатора частиц для испытаний смазочных материалов и гидравлических жидкостей LaserNet 200 приведены в таблице 1.10 [133].

В лабораториях, на электростанциях и промышленных объектах LaserNet 200 [133] предлагает высокую функциональность для контроля загрязнения и деградации рабочих жидкостей с целью своевременного обслуживания оборудования.

Таблица 1.10 – Технические характеристики анализатора частиц для испытаний смазочных материалов и гидравлических жидкостей LaserNet 200 [133]

Свойство	Описание
Техника определения форм и подсчета частиц, классификация частиц износа	Прямой анализ силуэтов частиц, получаемых при помощи лазера, и обработка изображений при помощи специального программного обеспечения
Определение количества ферромагнитных частиц	В приборе используются два высокочувствительных магнитометра
Максимальная концентрация частиц	Более чем 5000000 частиц на миллилитр
Поток	Скорость потока зависит от вязкости образца
Диапазон вязкости пробы	До 320 сСт анализируются без разбавления
Калибровка	Не требуется
Ввод пробы	Перистальтический насос
Сажа	Может работать с сильно загрязненными образцами, содержащими более 2% сажи
Данные	Программное обеспечение позволяет отображать накопленные данные в виде графиков и просмотр изображений всех обнаруженных частиц крупнее 20 мкм
Классификация частиц износа	Классификация по типам изнашивания: усталостный износ, абразивный износ, износ скольжения, а также идентифицировать неметаллические частицы, волокна и водяные капли. Прибор распознаёт пузырьки воздуха (>20 мкм) и исключает их из расчетов
Диапазон размера частиц	От 4 мкм до более чем 100 мкм
Количество частиц, распределение по размерам и коды	ISO 4406 [31], NAS 1638 [115], SAE AS4059 [147], ГОСТ 17216 [31] и др.
Капли воды и воздушные пузыри	Воздушные пузыри (>20 мкм) исключаются из расчетов, а капли воды (>20 мкм) используются для вычисления процентного содержания свободной воды на объем образца
Программное обеспечение для обработки данных	Классификация частиц износа с распознаванием формы и одновременным подсчетом их количества и анализом тенденций износа механизмов
Размеры (основной блок)	135×215×405 мм. Компьютер поставляется отдельно с основным блоком
Электропитание	100-240 В/10 Вт
Вес	8,5 кг

Все представленные приборы зарегистрированы в Госреестре средств измерений.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧИСТОТЫ ТУРБИННОГО МАСЛА В СИСТЕМАХ МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ТУРБОАГРЕГАТОВ

2.1. Разработка методики экспресс-анализа чистоты турбинного масла и содержания в нем эмульгированной воды

2.1.1. Цели и задачи экспресс-анализа

Масло, циркулирующее в процессе работы, кроме основных функций – смазывания трущихся поверхностей с целью уменьшения трения и охлаждения деталей, несет диагностическую информацию о техническом состоянии пар трения и всей системы в целом [4, 80, 109, 134, 144].

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

Информация о наличии твердых и мягких частиц в турбинном масле может быть прочитана и записана автоматическими счетчиками частиц в жидкости (в т.ч. и отечественным прибором для контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А [73]).

При циркуляции масла в системе фильтры удаляют из масла твердые частицы и, тем самым, создают возможность постоянно обновлять информацию об износе пар трения и т.д. во время пуска, эксплуатации и останова турбины. Коэффициент очистки турбинного масла характеризует степень снижения штучной концентрации частиц в масле, который также определяется с помощью счетчиков частиц.

Прогнозирование аварийных состояний наиболее эффективно по параметрам

прямых «свидетелей» разрушения – продуктов изнашивания контактирующих тел в подвижном сопряжении [107, 109, 111, 119, 149].

Появилась возможность диагностического контроля состояния подшипников по изменениям содержания твердых частиц в масле на сливе из подшипников.

Ключевым моментом в борьбе с обводнением масла является определение источников попадания воды и (или) водяного пара в систему [47]. Впервые появилась также возможность определить источники обводнения масла по изменениям содержания мягких частиц в нем на сливе из подшипников, регулирования и МО.

Практика показывает, что такие возможности могут принципиально изменить систему организации ремонта оборудования.

В соответствии со стандартом организации СТО 70238424.27.100.053-2013 «Энергетические масла и маслохозяйства электрических станций и сетей. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования» (Приказ НП «ИНВЭЛ» от 12.02.2013 № 05), разработанным ОАО «Фирма ОРГРЭС» и ОАО «ВТИ» [93], измерять чистоту масла необходимо гранулометрическим методом в соответствии с ГОСТ 17216-2001 [31] приборами контроля чистоты жидкости в лаборатории чистоты (рисунок 2.1) [78].



Рисунок 2.1 – Лаборатория чистоты на базе прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А [73]

Они позволяют: контролировать масло 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 (концевых уплотнений турбины и картеров подшипников (КП)) и уровня эксплуатации путем анализа проб масла, отобранных в различных точках работающей системы.

Проблема повышения надежности и долговечности энергетического оборудования не может быть решена без своевременного выявления повышенного износа подшипников, загрязнения и обводнения масла и оперативного принятия необходимых мер (при электроэрозионном износе подшипников, неплотных МО и т.д.). Это станет возможным после внедрения экспресс-анализа чистоты турбинных масел и содержания в них эмульгированной воды с помощью автоматических анализаторов чистоты жидкости.

Разработчиком и производителем отечественного прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А [73] является авиационная и аэрокосмическая промышленность. При внедрении его в энергетику необходимо было решить ряд проблем: в основном связанных, прежде всего, с обводнением турбинного масла в системах маслоснабжения турбоагрегата, а также с поступлением (ингрессией) влаги в пробу масла при ее анализе прибором и т.д.

2.1.2. Устройство и общее функционирование прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А

Датчик прибора ПКЖ-904А [73] крепится в корпусе прибора. Он имеет входной штуцер, к которому присоединяется воронка для контроля отдельных проб масла. На выходе датчика расположен пробковый кран. К штуцеру на выходе крана подсоединяется трубка, которая служит для слива жидкости.

Воронка имеет дренажный штуцер (для стравливания избыточного газа над поверхностью жидкости) и два одинаковых штуцера, один из которых служит для

подвода газа от системы поддавливания. На воронке нанесены риски, ограничивающие объем жидкости 100 см^3 .

На передней панели прибора расположены кнопки: «пуск», «стоп», «отключение диапазонов 5-10, 10-25 мкм».

Кнопка «пуск» служит для выбора режима измерения. При однократном нажатии кнопки «пуск» запускается автоматический режим измерения (режим «таймер»), который автоматически заканчивается через 1 минуту. При двукратном нажатии кнопки «пуск» осуществляется ручной режим измерения, который заканчивается оператором по усмотрению – нажатием кнопки «стоп».

Кнопка «стоп» служит для остановки измерения и чтения данных в памяти прибора (происходит при последующих, после остановки измерения, нажатиях кнопки «стоп»).

Кнопки «отключение диапазонов 5-10, 10-25 мкм» предназначены для отключения (включения) диапазонов измерения 5-10 мкм и 10-25 мкм. При нажатом положении кнопки «5-10» отключается диапазон измерения 5-10 мкм (для контроля чистоты жидкости грубее 12 класса по ГОСТ 17216-2001 [31]). При нажатом положении двух кнопок «5-25» отключаются два диапазона: 5-10 мкм и 10-25 мкм (для контроля жидкостей грубее 14 класса по ГОСТ 17216-2001 [31]). При отжати правой кнопки «5-25» включается диапазон 10-25 мкм, а при отжати левой кнопки «5-10» включается диапазон 5-10 мкм.

На задней панели прибора расположены: тумблер «сеть», клемма заземления, предохранитель, разъем «датчик» для подсоединения жгута датчика, фирменная табличка, на которой выполнена заводская маркировка прибора и сетевой шнур.

Результаты измерения индицируются на экране «жки» прибора в столбце «количество» в диапазонах: 5-10, 10-25, 25-50, 50-100, 100-200, свыше 200 мкм и автоматически сохраняются в памяти прибора (49 измерений).

При превышении концентрации загрязнений величины $150000/100 \text{ см}^3$ на экране «жки» высвечивается надпись «перегрузка», при превышении концентрации загрязнений $150000/100 \text{ см}^3$ в 2, 4, 8, 16, 32 раза, на табло «жки»

высвечивается соответствующая надпись: «перегрузка×2», «перегрузка×4», «перегрузка×8», «перегрузка×16», «перегрузка×32».

Прибор позволяет осуществлять измерения в автоматическом режиме (в режиме «таймер»), когда начало измерения осуществляется вручную при нажатии кнопки «пуск» прибора, а окончание измерения происходит автоматически через 60 с после начала измерения и в ручном режиме (при нажатии кнопки «пуск» дважды), окончание измерения осуществляются оператором вручную нажатием кнопки «стоп» прибора.

При работе в ручном режиме в правом нижнем углу экрана отображается надпись время, и происходит отсчет времени от 0 до 99 мин, после чего происходит обнуление показаний времени.

Ниже приведены основные пиктограммы на экране «жки» прибора.

При включении прибора (подключение к сети питания 220 В 50 Гц и установке тумблера «сеть», расположенного на задней панели прибора, в верхнее положение) на экране «жки» устанавливается изображение, представленное на рисунке 2.2.

РАЗМЕР, МКМ	КОЛИЧЕСТВО	
5- 10	0	
10- 25	0	
25- 50	0	
50-100	0	
100-200	0	
св 200	0	
КЛАСС		ТАЙМЕР 00:00

Рисунок 2.2 – Экран «жки» при включении прибора

При однократном нажатии кнопки «пуск» прибор работает в автоматическом режиме (в режиме «таймер»), на экране «жки» устанавливается изображение, представленное на рисунке 2.3.

РАЗМЕР, МКМ	КОЛИЧЕСТВО	
5- 10	31613	>12
10- 25	1756	10
25- 50	879	12
50-100	702	15
100-200	158	15
св 200	18	14
КЛАСС		ТАЙМЕР 00:17

Рисунок 2.3 – Экран «жки» при работе прибора в режиме «таймер»

С нажатием кнопки «пуск» начинается процесс измерения. В столбце «количество» отображается текущее значение количества частиц в соответствующих размерных диапазонах. Справа от показаний по размерным диапазонам индицируется текущее значение класса чистоты жидкости по каждому размерному диапазону. В правом нижнем углу экрана напротив надписи «таймер» происходит отсчет времени от 0 до 1 минуты.

По истечении 1 минуты процесс измерения автоматически завершается, на экране «жки» устанавливается изображение, представленное на рисунке 2.4.

РАЗМЕР, МКМ	КОЛИЧЕСТВО	
5- 10	107994	>12
10- 25	6000	10
25- 50	2999	12
50-100	2400	15
100-200	540	15
св 200	60	14
КЛАСС		15
		ТАЙМЕР 01:00

Рисунок 2.4 – Экран «жки» при завершении работы прибора в режиме «таймер»

Напротив надписи «класс» высвечивается класс чистоты контролируемой жидкости (представляет собой справочную величину), определяемый по наихудшему значению из значений классов по диапазонам.

Результаты измерения записываются оператором и сохраняются в памяти прибора (память рассчитана на сохранение 49-ти измерений).

При нажатии кнопки «пуск» дважды прибор работает в ручном режиме (оператор останавливает процесс измерения вручную, нажатием кнопки «стоп»).

Экран «жки» имеет вид, представленный на рисунке 2.5.

РАЗМЕР, МКМ	КОЛИЧЕСТВО	
5 – 10	83095	13
10 – 25	4616	11
25 – 50	2308	13
50 – 100	1847	15
100 – 200	414	15
СВ 200	47	14
КЛАСС		ВРЕМЯ 00:46

Рисунок 2.5 – Экран «жки» при работе прибора в ручном режиме

С нажатием кнопки «пуск» дважды начинается процесс измерения. В столбце «количество» отображается текущее значение количества частиц в соответствующих размерных диапазонах. В правом нижнем углу отображается надпись время, происходит отсчет времени от начала измерения.

Оператор останавливает процесс измерения вручную нажатием кнопки «стоп». На табло будут представлены результаты за весь период измерения.

Для определения класса чистоты жидкости по ГОСТ 17216-2001 [31] показания в соответствующих размерных диапазонах должны быть отнесены к 100 см³ жидкости.

Экран «жки» чтения данных в памяти прибора имеет вид, представленный на рисунке 2.6.

Чтение данных в памяти происходит после остановки измерения в автоматическом или ручном режимах. Последовательное нажатие кнопки «стоп» позволяет листать страницы памяти (всего их четыре), при этом последние

значения будут находиться на последней (четвертой) странице в последних строчках.

КП	5-10	10-25	25-50	50- -100	100- -200	СВ 200
15	001763	000098	000049	00039	00009	0001
15	001791	000100	000049	00040	00009	0001
15	001792	000100	000050	00039	00009	0001
15	001739	000096	000049	00038	00009	0001
15	001760	000098	000049	00040	00008	0001
15	003399	000189	000094	00076	00016	0002
15	007527	000418	000209	00167	00038	0004
15	003670	000203	000102	00082	00018	0002
15	108030	006001	003001	02401	00540	0060
15	006064	000337	000168	00136	00030	0003

Рисунок 2.6 – Экран «жки» чтения данных в памяти прибора

2.1.3. Отбор проб масла

Для получения достоверных результатов при контроле механических примесей в масле в системах смазки подшипников и регулирования турбоагрегатов важное значение имеет правильный отбор проб.

Пробы должны отбираться таким образом, чтобы концентрация и состав содержащихся в них загрязнений количественно и качественно соответствовали наличию загрязнений в контролируемой системе или емкости.

Место отбора проб должно быть не только легко доступным, но и наиболее информативным, т.е. максимально характеризующим работоспособность системы или изнашивание агрегатов и подшипников, или качества работы средств фильтрации.

При отборе проб необходимо выполнить три основных условия.

Во-первых, отбор проб должен производиться при заданном рабочем расходе жидкости в системе. Причем время циркуляции перед отбором должно быть таким, чтобы загрязнения от потенциального источника загрязнений успели подойти к

точке отбора пробы. Время предварительной прокачки должно соответствовать смене трех объемов жидкости в системе.

Во-вторых, скорость потока во входном сечении пробоотборника по величине и направлению должно совпадать с рабочей скоростью потока жидкости. В противном случае из-за влияния инерционных сил на движущиеся в потоке частицы загрязнений, возможно искажение результатов контроля по крупным частицам (более 50 мкм) до 50% [94].

В-третьих, желательно, чтобы режим течения жидкости был установившимся, т.е. место отбора должно отстоять не менее, чем на 2-3 и 10 диаметров трубы от его начала, при ламинарном и турбулентном режиме течения соответственно. Причем место отбора обязательно должно быть внизу при горизонтальном расположении трубопровода. Установка заборного устройства пробоотборников на вертикальных трубопроводах не рекомендуется из-за возможного там осаждения частиц в момент взятия пробы.

В любом случае сечение заборного устройства должно быть не менее 0,3-0,5 диаметра трубопровода.

В некоторых случаях применяются пробоотборники, заборная часть которых установлена непосредственно внутри потока. В этом случае наклон оси заборной части к оси потока не должен превышать 20-30°, причем зона отбора должна быть на расстоянии 0,1-0,2 радиуса трубопровода от нижней стенки трубопровода.

При контроле мелких частиц (не более 10-20 мкм) последние два требования не являются обязательными.

Рекомендуемая схема пробоотборника на горизонтальном трубопроводе представлена на рисунке 2.7 [94].

Такие пробоотборники вносят минимальные искажения в результат контроля чистоты жидкостей в пределах 5-13 классов чистоты (ГОСТ 17216-2001 [31]). Перед взятием пробы для анализа при работающей системе вначале сливается объем жидкости, несколько превышающий объем полости заборной части пробоотборника, так как в этом объеме осаждаются и скапливаются частицы загрязнений из потока. Отбор масла производить в чистую посуду вместимостью

500-1000 мл. При взятии пробы острым наконечником иглы прокалывается герметичная пленка колбы, а затем открывается кран. Перед взятием пробы необходимо промыть посуду контролируемой жидкостью, интенсивно взбалтывая в течение 30 с, заполненную не более $2/3$ ее вместимости.

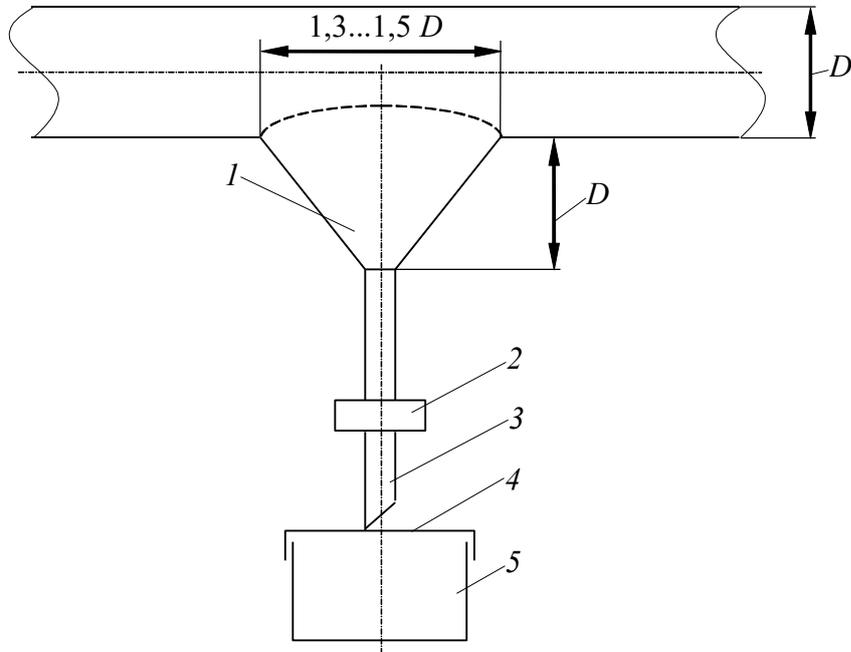


Рисунок 2.7 – Схема пробоотборника: 1 – заборная часть; 2 – кран;
3 – конический наконечник; 4 – синтетическая пленка; 5 – колба

Отбор проб масла, как правило, производится в следующих точках маслосистемы турбоагрегата: из грязного и чистого отсеков ГМБ, из кранов штатных пробоотборников МО и на сливе масла с подшипников турбины через смотровые окна с помощью специального пробоотборника (рисунок 2.8).

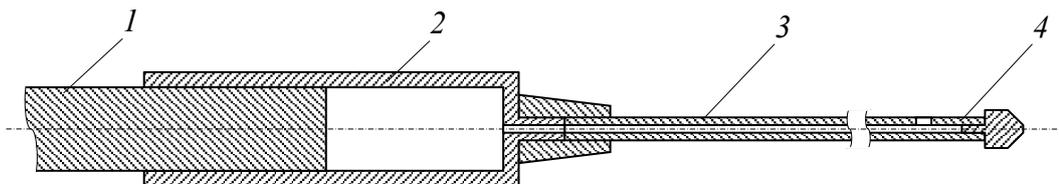


Рисунок 2.8 – Пробоотборник: 1 – поршень; 2 – цилиндр; 3 – наконечник;
4 – заборная часть для отбора проб из потока

При отборе проб масла из средств хранения, главное внимание должно быть обращено на то, чтобы в отбираемое для анализа масло не попали посторонние загрязнения, поэтому нельзя при отборе проб пользоваться грязными и влажными пробоотборниками. Налив пробы из пробоотборника в посуду для ее транспортировки и хранения должен осуществляться по возможности закрытой струей, а сама посуда должна быть сухой и чистой.

Как показывают измерения, уровень загрязненности и обводненности турбинного масла в различных точках системы маслоснабжения подшипников и регулирования различен (таблица 2.1 и 2.2). Отсюда видно, что после фильтра тонкой очистки в чистом отсеке ГМБ чистота масла достаточно стабильна.

Таблица 2.1 – Класс промышленной чистоты турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-100 ГМЗ

Размер частиц, мкм	Число частиц загрязнений в 100 мл турбинного масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования, место отбора проб			
	Чистый отсек ГМБ, № пробы		Слив с подшипников в грязный отсек ГМБ	Слив с регулирования в грязный отсек ГМБ
	1	2		
5-10	7101	5665	14506	5976
10-25	2355	1780	5489	1817
25-50	337	200	658	238
50-100	21	17	30	20
100-200	9	2	8	4
>200	8	2	4	4
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	8-9	8	10	8

Контроль чистоты масла вблизи фильтра больше характеризует техническое состояние самого фильтра, а не системы. В то же время чистота масла после потребителей (подшипников и регулирования) в линии слива быстро изменяется в зависимости от различных причин и поэтому более информативна для контроля именно работоспособности системы. Поэтому класс чистоты обычно

регламентируется в двух точках: после фильтра в линии нагнетания (или в чистом отсеке ГМБ) и в сливной магистрали перед фильтром.

Таблица 2.2 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле в системе смазки подшипников и регулирования турбоагрегата Т-100 ТМЗ

Размер капель воды, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования, место отбора проб			
	Чистый отсек ГМБ, № пробы		Слив с подшипников в грязный отсек ГМБ	Слив с регулирования в грязный отсек ГМБ
	1	2		
5-10	19445	17655	15124	25574
10-25	8598	7503	8328	18613
25-50	856	833	1005	2232
50-100	22	31	20	42
100-200	5	10	3	9
>200	17	16	2	8
Капель воды >5 мкм	28944	26050	24482	46478

Класс чистоты устанавливается для гидравлических систем только в процессе их эксплуатации при установившихся режимах, т.е. тогда, когда количество частиц загрязнителя, поступающих в масло, равно количеству частиц, задерживаемых фильтрующими элементами [61, 87].

Погружной пробоотборник для взятия пробы масла заданного уровня и измерения воздуха, твердых механических примесей и эмульгированной воды в ГМБ показан на рисунке 2.9 [49].

Пробоотборник состоит из прозрачного стакана емкостью 100 мл, к верхней части которого прикреплена прозрачная катушка с комплектом измерительных трубок различного диаметра, протарированных в объемных единицах.

К крышке катушки привернута трубка, через которую проходит шток. Крышка плотно прижата к катушке пружиной (на рисунке 2.9 не показана).

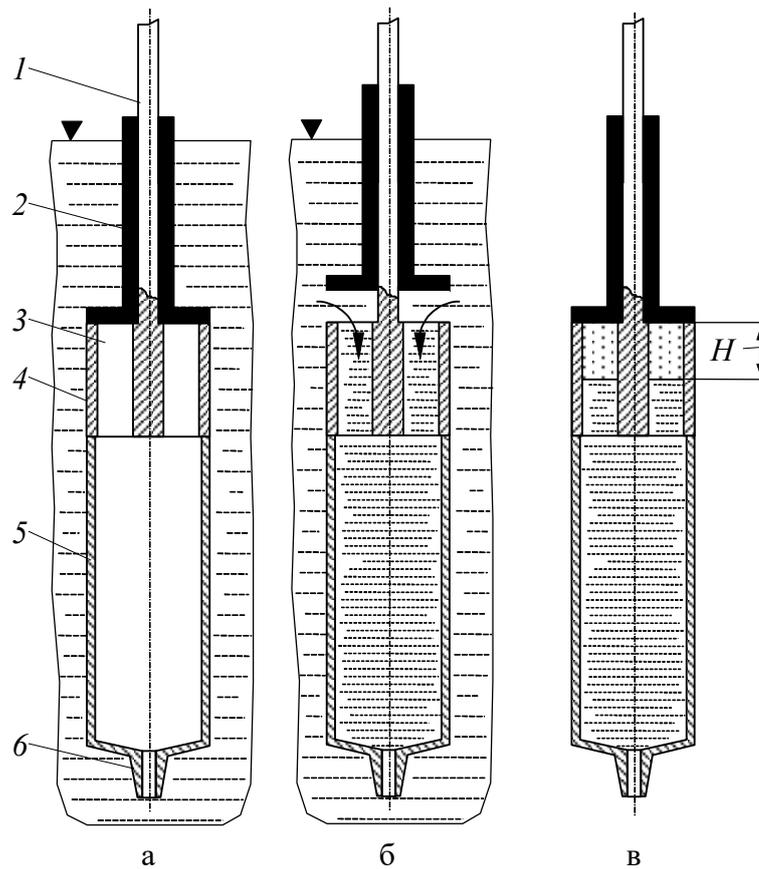


Рисунок 2.9 – Погружной пробоотборник аэрированного масла: 1 – шток; 2 – измерительная трубка; 3 – прозрачный стакан; 4 – прозрачная катушка; 5 – трубка; 6 – сливной наконечник; а, б, в – этапы работы пробоотборника

Закрытый пробоотборник осторожно погружают в исследуемую точку ГМБ. После нагрева в течение 2-3 минут поднимают крышку катушки. Время заполнения пробоотборника маслом не менее 40 с.

Закрытый пробоотборник оставляют в потоке масла на 5-6 мин. После того как выделятся все воздушные пузырьки и разрушится пена, пробоотборник извлекают из ГМБ. В вертикальном положении измерительных трубок линейкой оценивают высоту воздушной прослойки H и определяют абсолютный объем воздуха ϑ'' в отобранной пробе смеси $\vartheta_{см}$.

Относительное объемное воздухосодержание рассчитывают по формуле [48]:

$$\varphi' = \frac{\vartheta''}{\vartheta_{см} - \alpha \cdot \Delta t}, \quad (2.1)$$

где α – температурный коэффициент объемного расширения масла; Δt – разность температур масла в ГМБ в момент отбора пробы и в приборе в момент измерения.

Если пробоотборник не извлекать из ГМБ сразу же после взятия пробы и процесс выделения не сопровождать охлаждением масла, то вторым членом в знаменателе формулы можно пренебречь. В противном случае возможны погрешности измерения.

Затем масло сливается из пробоотборника через наконечник в чистую посуду для хранения, транспортировки и анализа на приборе ПКЖ-904А [73].

Движение масла в ГМБ, как правило, неустановившееся, турбулентное. Поэтому для получения более достоверных результатов измерения, отбирать пробу масла в каждой заданной точке ГМБ следует не менее трех раз.

Воздух по высоте ГМБ распределяется неравномерно: возле дна обычно масло бывает без воздуха; на поверхности масла в ГМБ скапливается пена, содержание воздуха в которой достигает 30-40% (по объему). Поэтому судить об эффективности воздуховыделения из масла в ГМБ только по измерениям в одной, произвольно выбранной точке ГМБ, неправильно. Обычно снимают эпюру аэрации масла, т.е. определяют воздухосодержание масла в точках смещенных на расстояниях 100-200 мм по глубине ГМБ, а затем строят графическую зависимость.

Для приближенной оценки среднего содержания воздуха на выходе из ГМБ (не прибегая к измерениям локальных скоростей) можно воспользоваться методом, изложенным в [48].

2.1.4. Аппаратура, оборудование, материалы, документация

Для проведения контроля чистоты турбинного масла необходимо: прибор для контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А [73] с эксплуатационными документами по ГОСТ 2.601-2019 [36] и документами метрологической аттестации; стеклянная лабораторная посуда вместимостью 500-1000 мл по

ГОСТ 23932-90 [32]; разбавитель – чистый керосин ТС-1 ГОСТ 10227-2013 [28]; диспергатор типа УЗУ-0,25 или УЗДН-2Т; вакуумный сушильный шкаф; система подачи сжатого газа – диоксид углерода, обеспечивающая давление в диапазоне 0-0,5 МПа (0-5 кгс/см²) и включающая в себя: баллон ГОСТ 949-73 [22] с диоксидом углерода высокого давления ГОСТ 8050-85 [26] высшего сорта, редуктор углекислотный ГОСТ 13861-89 [30] с манометром с верхним пределом измерения 0,6 МПа (6 кгс/см²), фильтр воздушный 5 мкм; стенд для очистки гидравлических смесей и масел типа СОГ-904.

2.1.5. Подготовка разбавителя, химической посуды, пробы масла и прибора

Разбавитель следует очистить от механических примесей на стенде для очистки гидравлических смесей и масел типа СОГ-904, фильтрованием или отстаиванием, обеспечивающими разбавителю промышленную чистоту не грубее 4-5 класса по ГОСТ 17216-2001 [31].

Для достижения надежных измерений чистоты масла необходимо тщательно подготовить пробоотборник и посуду, выполняя следующие операции: промыть пробоотборник и посуду водным раствором моющего средства; промыть дистиллированной водой и высушить. В посуду залить очищенный разбавитель не более 2/3 ее вместимости. Посуду закрыть крышкой и интенсивно взбалтывать в течение 30 с; произвести ополаскивание ее стенок разбавителем. Пользуясь принятым методом счета частиц на приборе ПКЖ-904А [73], определить число частиц размером 10-25 мкм (принятым для контроля в 100 см³ разбавителя) после очистки посуды. Полученное число частиц умножить на отношение объема налитого в посуду разбавителя к вместимости посуды. Полученное число определяет уровень чистоты посуды. Чистота посуды должна быть такой, чтобы число частиц контролируемого размера (10-25 мкм) составляло не более 10% от числа частиц этого размера в 100 см³ рабочей жидкости, подлежащей контролю.

Отбор турбинного масла производить с помощью пробоотборника в чистую посуду вместимостью 500-1000 мл в соответствии с рекомендациями раздела 2.1.3. Если пробоотборник необходимо перенести в другое помещение, поместить его в пакет из полиэтилена. Перед контролем, масло, разбавитель или смесь масла с разбавителем следует хорошо перемешать, интенсивно взбалтывая его в течение 30 с в посуде, заполненной жидкостью не более 2/3 ее вместимости и поместить пробу в ультразвуковую ванну на 30-60 с. Подсоединить воронку прибора к системе подачи газа под давлением, как показано на рисунке 2.10.

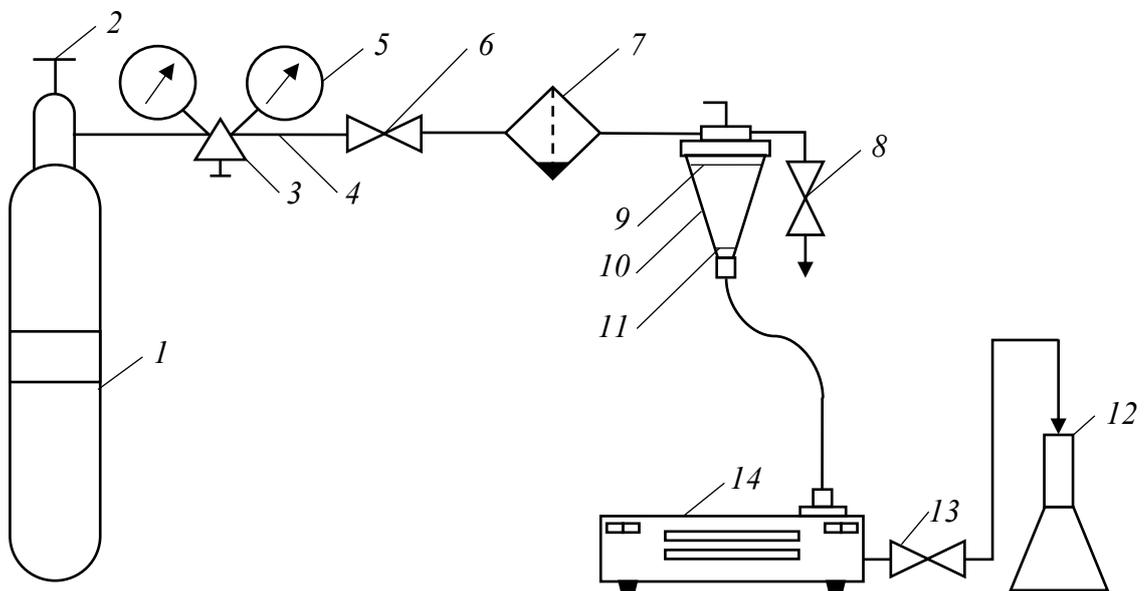


Рисунок 2.10 – Схема подсоединения прибора ПКЖ-904А [73] для контроля отдельных проб масла: 1 – баллон со сжатым газом; 2 – вентиль запорный; 3 – газовый редуктор; 4 – шланг; 5 – манометр; 6 – кран подачи газа; 7 – воздушный фильтр; 8 – воздушник; 9 – верхняя кольцевая отметка; 10 – воронка прибора; 11 – нижняя кольцевая отметка; 12 – мензурка; 13 – кран прибора; 14 – прибор ПКЖ-904А [73]

Подготовить прибор ПКЖ-904А [73] к работе согласно паспорту, для чего: выполнить заземление прибора в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.003-2014 [20]; нажать кнопку «пуск». При этом на табло прибора не должны происходить

изменения показаний количества частиц в соответствующих размерных диапазонах.

Для удобства эксплуатации рекомендуется датчик прибора всегда оставлять заполненным жидкостью, чтобы ее свободная поверхность находилась на уровне нижней кольцевой отметки на воронке.

2.1.6. Определение чистоты турбинного масла и содержания в нем эмульгированной воды

Перед дисперсионным анализом каждой пробы контролируемого масла гидравлический тракт прибора следует промыть чистым керосином. Для этого налить 100-120 см³ чистого керосина в воронку прибора, закрыть крышку воронки. Открыть запорный вентиль и кран подачи газа (рисунок 2.10), регулятором редуктора по манометру установить давление газа 0,2 МПа (2 кгс/см²), открыть кран прибора, при совмещении уровня жидкости с нижней кольцевой отметкой воронки закрыть кран прибора и кран подачи газа. Нажать кнопку «пуск» прибора. На экране «жки» прибора в столбце количество высвечиваются нули. Если датчик заполнен жидкостью полностью и в нем отсутствуют пузырьки воздуха, то при закрытом кране и нажатой кнопке «пуск» показания прибора не должны изменяться.

В случае присутствия в чувствительной зоне датчика прибора газовых пузырей, открыть кран подачи газа и с помощью редуктора довести расход жидкости через гидравлический тракт прибора до максимального значения, но не превышая давление 0,5 МПа (5 кгс/см²). Провести прокачку с указанным расходом до удаления пузырей.

Залить в воронку прибора 120-130 см³ подготовленной пробы турбинного масла и подобрать экспериментально, в зависимости от вязкости контролируемого масла, давление газа с помощью редуктора, по показаниям манометра, обеспечивающее расход жидкости через прибор 100 ± 10 см³/мин. Расход измерять

на сливе прибора с помощью мерной емкости с ценой деления 10 мл и секундомера или таймера прибора. Одновременно выполняется промывка гидротракта прибора и заполнение датчика контролируемой жидкостью.

Для определения дисперсионного состава частиц примесей на приборе ПКЖ-904А [73] в воронку прибора залить 120-130 см³ подготовленной пробы турбинного масла и подать газ под давлением, обеспечивающим расход контролируемой жидкости 100±10 см³/мин, сделать выдержку (от 1 до 3 минут) для удаления из жидкости газовых пузырей, открыть кран прибора и слить в мензурку избыток жидкости. При достижении свободной поверхности контролируемой жидкости верхней кольцевой отметки на воронке нажать кнопку «пуск» (автоматический режим), через 60 с измерение автоматически прекратится или дважды нажать кнопку «пуск» (ручной режим), а при достижении свободной поверхности контролируемой жидкости нижней кольцевой отметки на воронке нажать кнопку «стоп». Закрывать кран прибора не допуская, чтобы свободная поверхность контролируемой жидкости ушла за пределы видимости и закрыть кран подачи газа. Записать показания экрана «жки».

Перед дисперсионным анализом каждой пробы контролируемого масла необходимо сбросить избыточное давление газа с помощью воздушника.

Анализ пробы масла на приборе проводить трехкратно. Содержание частиц принятых размерных групп (N_i) в контролируемой жидкости вычисляют, как среднее арифметическое результатов трех измерений.

Дисперсионный состав примесей, полученный в результате обработки показаний прибора, следует записать в журнал регистрации результатов анализа.

Если при дисперсионном анализе пробы контролируемого масла на экране «жки» включается сигнализатор «перегрузка», это означает, что концентрация частиц в жидкости превышает 150000 частиц в 100 см³. Необходимо повторить измерения, нажав предварительно кнопку «отключение 5-10». При этом отключаются индикаторы первого диапазона (5-10 мкм) и подсчет частиц в жидкости производится начиная с размера 10 мкм. Если при повторном измерении вновь включается сигнализатор «перегрузка», необходимо нажать вторую кнопку

«отключение 5-25», отключив оба диапазона (5-10 мкм, 10-25 мкм) и еще раз повторить измерение. Подсчет частиц в жидкости производится начиная с размера 25 мкм [74].

Если при дисперсионном анализе пробы контролируемого масла на экране «джи» включается сигнализатор «перегрузка×2», «перегрузка×4», «перегрузка×8», «перегрузка×16», «перегрузка×32», это означает, что концентрация частиц загрязнений в жидкости размером более 5 мкм превышает 150000 частиц в 100 см³ в 2, 4, 8, 16 и 32 раза. По сигнализатору «перегрузка» можно ориентироваться в какой пропорции разбавить контролируемое масло (таблица 2.3), чтобы измерить концентрацию загрязнений [74].

Таблица 2.3 – Пропорции разбавления сильнозагрязненного масла

Светятся сигнализаторы	Класс чистоты по ГОСТ 17216-2001 [31] (ориентировочно)	Отключить диапазоны мкм	Разбавление контролируемая/чистая частей
Перегрузка	13	5-10	1/1
Перегрузка и уровень 1	14	5-10	1/1
Перегрузка и уровень 2	15	5-10 10-25	1/2-1/3
Перегрузка и уровень 3	16	5-10 10-25	1/2-1/6
Перегрузка и уровень 4	17	5-10 10-25	1/7-1/15
Перегрузка и уровень 5	Свыше 17 в 2 раза	5-10 10-25	1/16-1/31

Смесь загрязненного турбинного масла с очищенным керосином или турбинным маслом (разбавителем) должна соответствовать техническим требованиям прибора по концентрации частиц примесей, светопропусканию и вязкости.

Залить разбавитель в воронку прибора до верхней кольцевой отметки, что соответствует 100 см³, завернуть крышку воронки и подать газ под давлением, обеспечивающим расход контролируемой жидкости 100±10 см³/мин, сделать

выдержку (от 1 до 3 минут) для удаления из жидкости газовых пузырей. Нажать кнопку «пуск» (автоматический режим) и открыть кран прибора, через 60 с измерение автоматически прекратится или дважды нажать кнопку «пуск» (ручной режим) и открыть кран прибора, а при достижении свободной поверхности контролируемой жидкости нижней кольцевой отметки на воронке нажать кнопку «стоп», закрыть кран прибора и закрыть кран подачи газа. Записать показания экрана «жки». Повторить указанное выше измерение до получения устойчивых идентичных показаний экрана «жки», отличающихся один от другого (по сумме всех диапазонов) не более, чем на 30%.

Надежность и достоверность результатов измерений дисперсионного состава частиц примесей на приборе ПКЖ-904А [73] не снижается если объем контролируемого масла в случае его разбавления по прежнему составляет 100 см^3 и, следовательно, объем смеси будет возрастать с ростом кратности разбавления, а количество измерений, необходимых в этом случае для оценки чистоты контролируемой жидкости в смеси определяют как:

$$n = \frac{V}{100}, \quad (2.2)$$

где V – объем смеси контролируемой жидкости, см^3 .

Содержание частиц принятых размерных групп (N_i) в контролируемом масле вычисляют из приведенной ниже формулы, как среднее арифметическое результатов n измерений. Из усредненных показателей экрана «жки» по каждой размерной группе частиц необходимо вычесть соответствующие показания табло, полученные при контроле чистоты разбавителя на приборе. Полученные результаты умножить на кратность разбавления k ,

$$N_i = \frac{k+1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n N_{ijcm} - k \cdot N_{ip}, \quad (2.3)$$

где N_{ijcm} – количество частиц в i размерном диапазоне j пробы смеси жидкости; N_{ip} – количество частиц в i размерном диапазоне в 100 см^3 разбавителя.

Дисперсионный состав загрязнений, полученный в результате обработки показаний прибора следует записать в журнал.

Автоматический счетчик частиц ПКЖ-904А [73] позволяет также производить дисперсионный анализ твердых загрязнений турбинного масла после обезвоживания каждой пробы, которое идет интенсивно при нагреве масла под вакуумом.

Количество микрокапель воды (мягких частиц) в каждой пробе масла оценивается, как разность двух измерений (суммарного количества частиц и твердых загрязнений в каждой пробе).

Результаты дисперсионного анализа и гранулометрическую характеристику частиц твердых загрязнений следует использовать для определения чистоты контролируемого масла по ГОСТ 17216-2001 [31], представленном в таблице 1.1.

Класс промышленной чистоты масла по ГОСТ 17216-2001 [31] следует устанавливать по числу в пробе частиц размерной группы 10-25 мкм, как оказывающей основное влияние на снижение показателей надежности агрегатов гидросистем [7].

2.1.7. Поступление (ингрессия) влаги в пробу масла при ее анализе автоматическим счетчиком частиц

Благодаря современным инженерным решениям процедура измерения чистоты жидкости оператором автоматическими счетчиками частиц стала достаточно банальной.

Счетчики частиц являются высокоточным и высокочувствительным инструментом. Из-за этого данные об аномальном количестве частиц может быть трудно анализировать, так как приборы восприимчивы ко многим загрязнениям, которые могут привести к ошибочным показаниям. Многие из этих загрязнений могут быть неочевидными для оператора или считаться безвредными.

Данные, собранные в лабораториях, показывают, что загрязнение влагой может неблагоприятно повлиять на точность и воспроизводимость измерений оптическими счетчиками частиц [152].

Считается, что 80% всех зарегистрированных проблем со счетчиками частиц можно отнести к неправильному отбору и загрязнению проб. При обнаружении отклонений от нормы или при невозможности воспроизвести подсчеты, подозрение падает на неисправность датчиков, пробоотборников, счетчиков, лазеров и других чувствительных электронных компонентов [152].

Однако опыт показывает, что чаще всего оборудование работает исправно, а регистрируемые подсчеты точны (хотя, возможно, и не соответствуют реальным частицам в жидкости). Источник отклонений обычно находится в подготовке проб, процедурах подсчета и факторах окружающей среды.

В автоматическом пробоотборнике HIAC компании Pacific Scientific ABS-2 (США) [127] для создания градиента давления используется атмосферный воздух для прохождения жидкости через датчик. Воздух проходит двойную очистку: через осушитель для удаления влаги и через фильтр из боросиликатного стекла для удаления твердых частиц.

Если фильтр неисправен, то частицы, находящиеся в окружающем воздухе, попадают в пробу жидкости. В результате концентрация частиц в жидкости увеличится и не будет репрезентативной.

Если срок годности осушителя истек, то он больше не будет удалять водяной пар из воздуха, и в пробы может попасть влага. Результат добавления влаги более тонкий, чем добавление твердых частиц.

Если образец является гидрофильным, как, например, некоторые синтетические смазки на основе сложных эфиров, добавленная влага, скорее всего, растворится в жидкости, не влияя на количество частиц. Количество добавленной влаги будет настолько незначительным, что объем и свойства жидкости останутся неизменными.

В случае гидрофобного образца, такого как смазка на минеральной основе, влага может мешать обычному подсчету частиц. Водяной пар, введенный в масло, может конденсироваться и образовывать эмульсию, создавая капли воды микронного размера, диспергированные в масле, так называемые мягкие частицы. Это название было выбрано потому, что эти частицы видны оптическим датчиком

прибора и подсчитываются, но они не являются частицами в традиционном смысле. Мягкие частицы не могут быть отфильтрованы из образца так же, как твердые.

Масло имеет показатель преломления, отличный от показателя преломления воды, что делает капли воды видимыми для счетчика частиц. Это приводит к ложным подсчетам из-за загрязнения пробы водой.

В случае образца масла на минеральной основе неисправный осушитель может привести к попаданию влаги в масло. Поскольку вода имеет большую плотность и не смешивается с маслом, влага будет эмульгироваться. По мере того, как образец проходит через датчик, водяные капли будут регистрироваться как частицы и вносить свой вклад в общий подсчет.

Данные счета частиц проб дизельного топлива приведены в таблице 2.4 и 2.5, а обобщенные результаты измерений представлены на рисунках 2.11 и 2.12.

В каждом последующем измерении (прогоне одного и того же образца через датчик прибора) количество частиц постоянно увеличивается.

Доступ (ингрессия) влаги воздуха в образец может показаться маловероятным источником загрязнения даже для тех, кто имеет большой опыт в подсчете частиц.

Таблица 2.4 – Данные счета частиц в дизельном топливе, проба 1 [152]

Размер, мкм	Дизельное топливо, № прогона		
	1	2	3
2	4888	5680	7361
5	440	1039	2461
10	58	556	1811
15	20	391	1432
20	10	224	878
25	4	83	356
30	3	38	136
50	0	3	8

Таблица 2.5 – Данные счета частиц в дизельном топливе, проба 2 [152]

Размер, мкм	Дизельное топливо, № прогона		
	1	2	3
2	2702	2788	4782
5	220	428	2082
10	34	262	1680
15	17	216	1389
20	6	152	996
25	2	59	479
30	0	24	164
50	0	4	8

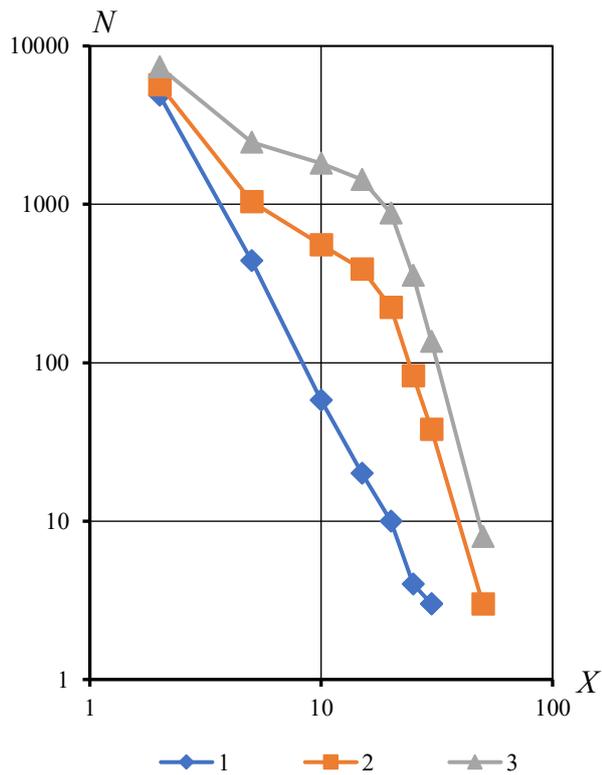


Рисунок 2.11 – Кривые загрязнений дизельного топлива, проба 1 [152]:
 1-3 – прогон пробы; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg)

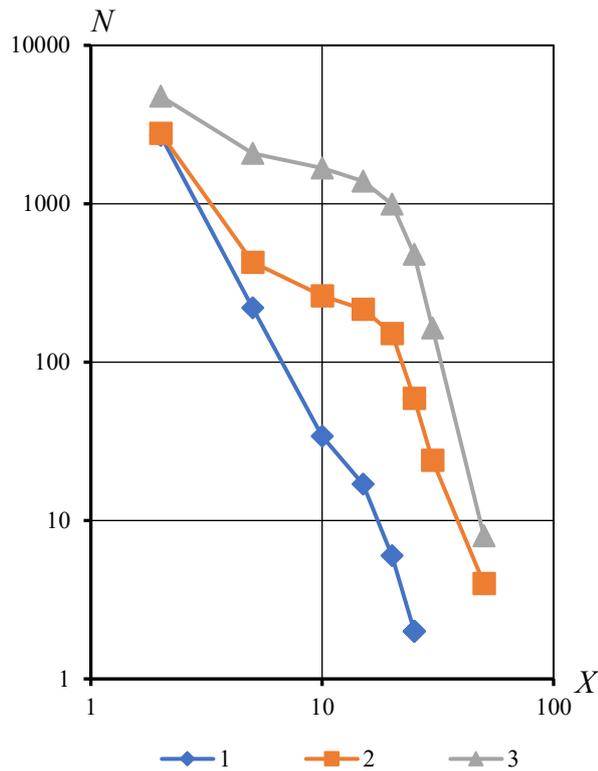


Рисунок 2.12 – Кривые загрязнений дизельного топлива, проба 2 [152]:
1-3 – прогон пробы; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg)

Типичное распределение количества частиц дает линейную аппроксимацию на логарифмических графиках, что и видно при первом прогоне проб. Однако, по мере увеличения количества прогонов количество частиц становится повышенным и аномальным.

Форма кривой в сочетании с опытом анализа данных позволяют предположить, что причиной аномалии является вода или воздух. Поскольку образцы были дегазированы, а дизельное топливо гидрофобно, вода была наиболее вероятным источником частиц.

Тщательный анализ используемых процедур отбора проб и методов подсчета частиц позволил исключить наиболее типичные источники загрязнения проб. При осмотре оборудования было обнаружено, что осушитель выработал ресурс. После его замены воспроизводимость результатов счета частиц была восстановлена [152].

Для проведения контроля чистоты турбинного масла прибором контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А [73] необходима система подачи сжатого газа, обеспечивающая давление в диапазоне 0-0,5 МПа (0-5 кгс/см²).

Используемый газ – диоксид углерода высокого давления ГОСТ 8050-85 [26] высшего сорта в баллоне ГОСТ 949-73 [22].

Данные счета частиц проб свежего турбинного минерального масла Тп-22С на установке (рисунок 2.10.) с помощью прибора ПКЖ-904А [73] приведены в таблице 2.6, а обобщенные результаты измерений представлены на рисунке 2.13.

Таблица 2.6 – Данные счета частиц в свежем турбинном минеральном масле ТП-22С

Размер, мкм	Свежее турбинное минеральное масло ТП-22С, № прогона		
	1	2	3
5-10	1473	1404	1510
10-25	782	798	899
25-50	125	170	202
50-100	14	16	19
100-200	6	9	11
>200	1	4	2
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	7	7	7

Данные счета частиц проб свежего моторного синтетического масла 5W-30 приведены в таблице 2.7, а обобщенные результаты измерений представлены на рисунке 2.14.

Распределение количества частиц дает линейную аппроксимацию на логарифмических графиках (рисунки 2.13 и 2.14). В каждом последующем измерении (прогоне одного и того же образца через датчик прибора) сохраняется воспроизводимость результатов измерений, как для турбинного масла на минеральной основе, так и для синтетического моторного масла.

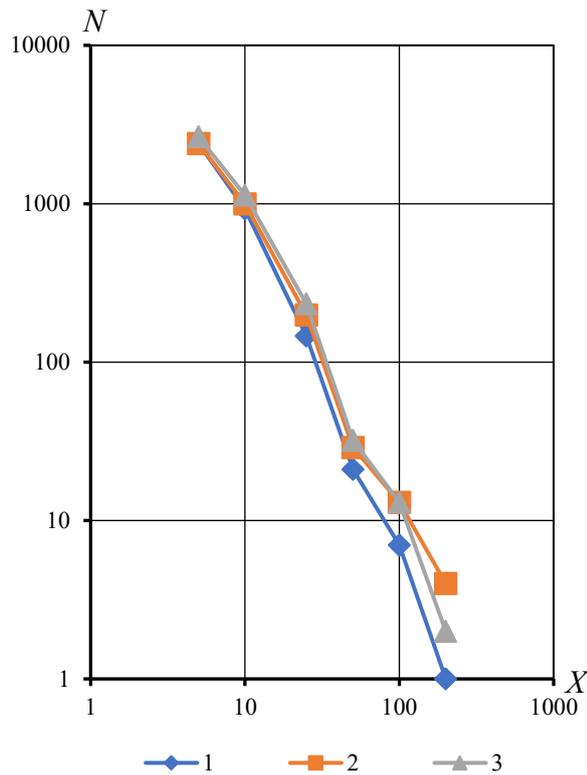


Рисунок 2.13 – Кривые загрязнений свежего турбинного минерального масла Тп-22С: 1-3 – прогон пробы; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg)

Таблица 2.7 – Данные счета частиц в свежем моторном синтетическом масле 5W-30

Размер, мкм	Свежее моторное синтетическое масло 5W-30, № прогона		
	1	2	3
5-10	6030	6263	6079
10-25	2906	3001	2937
25-50	492	508	498
50-100	49	69	56
100-200	21	18	14
>200	4	7	13
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	9	9	9

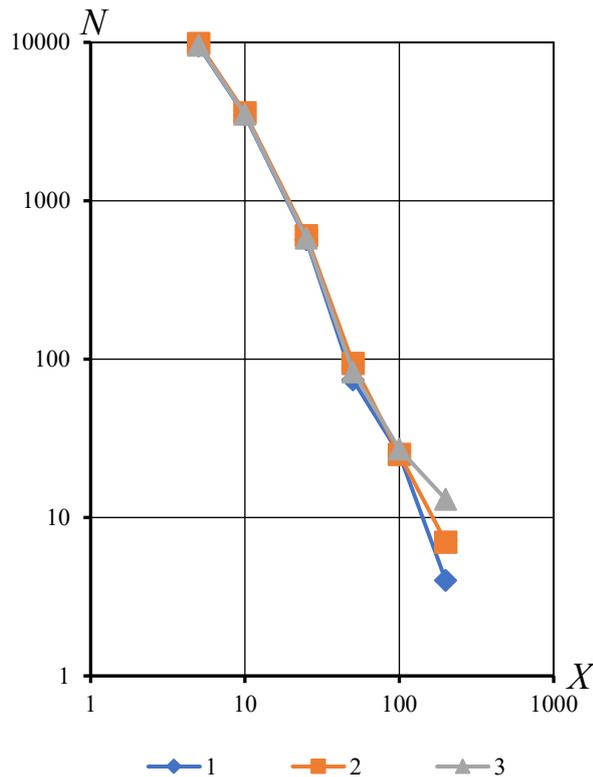


Рисунок 2.14 – Кривые загрязнений свежего моторного синтетического масла 5W-30: 1-3 – прогон пробы; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg)

2.1.8. Программное обеспечение для систематизации полученных данных на приборе контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А

Для контроля за состоянием оборудования необходимо сохранять и систематизировать данные, полученные в результате анализа проб масла. Для этой задачи целесообразно использовать специальное программное обеспечение. Для работы с прибором ПКЖ-904А [73] была разработана программа позволяющая упростить обработку данных, полученных в результате анализа проб.

Программа получает в качестве входных данных: номер пробы, дату и время измерения, предприятие, наименование агрегата, место отбора пробы, а также количество загрязняющих масло частиц в шести размерных диапазонах (5-10,

10-25, 25-50, 50-100, 100-200, более 200 мкм). Есть возможность найти среднеарифметическое число частиц в случае, когда производится несколько последовательных измерений одной пробы (рисунки 2.15 и 2.16).

Калькулятор класса чистоты

Файл... Информация о пробе

Номер пробы: 1

Дата измерения:

Время измерения:

Предприятие:

Агрегат:

Место отбора пробы:

Жидкость:

Комментарий:

Результаты измерений Отчёт по пробе

Изменить количество измерений Рассчитать

	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3
▶ 5-10			
10-25			
25-50			
50-100			
100-200			
>200			

Отсутствие перегрузки ▾

Перегрузка по: 5-10 10-25

Рисунок 2.15 – Стартовый экран

Калькулятор класса чистоты

Файл... Информация о пробе

Номер пробы: 1

Дата измерения: 01.01.2023

Время измерения: 00:00

Предприятие: НПО ЭнергоСервис

Агрегат: К-200-130

Место отбора пробы: Маслохлодитель №1

Жидкость: Тп-22С

Комментарий:

Результаты измерений Отчёт по пробе

Изменить количество измерений Рассчитать

	Измерение 1	Измерение 2	Измерение 3
5-10	4560	4672	4581
10-25	1920	1867	2022
25-50	152	158	163
50-100	27	29	35
100-200	6	4	7
▶ >200	2	3	3

Отсутствие перегрузки ▾

Перегрузка по: 5-10 10-25

Рисунок 2.16 – Пример заполнения данных о измерении

Если проба масла имеет высокий уровень загрязнения, в программе есть возможность указать уровень перегрузки прибора.

Программа определяет класс промышленной чистоты согласно ГОСТ 17216-2001 [31] по всем диапазонам частиц, а также приблизительный код чистоты по ISO 4406 [31] и записывает полученные результаты в базу данных для отслеживания динамики изменения чистоты в процессе эксплуатации турбоагрегата (рисунок 2.17).

	Число частиц	Класс чистоты по ГОСТ 17216
▶ 5-10	4604	9
10-25	1936	8
25-50	157	8
50-100	30	9
100-200	5	8
>200	2	7

Рисунок 2.17 – Отчет по пробе

Для создания программного обеспечения использовалась программа Visual Studio и язык программирования C#. На программу для контроля чистоты турбинного масла получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617923 «Программа для определения и контроля промышленной чистоты турбинного масла» [90].

2.2. Зависимость чистоты рабочей жидкости в системе маслоснабжения турбоагрегата от процессов загрязнения и очистки

2.2.1. Аналитическое решение задачи.

Экспериментальное определение чистоты и поступления загрязнений в турбинное масло в системе маслоснабжения турбоагрегата

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 [61, 87].

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

$$W_i = 1 - \varphi_i, \quad (2.4)$$

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

$$\varphi_i = \frac{N_{iu} - N_{if}}{N_{iu}}; \quad (2.5)$$

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:

$$N_{i1} = N_{i0} \cdot W_i + N_i; \quad (2.6)$$

$$N_{i2} = N_{i0} \cdot W_i^2 + N_i \cdot W_i + N_i; \quad (2.7)$$

...

$$N_{in} = N_{i0} \cdot W_i^n + N_i \cdot W_i^{n-1} + N_i \cdot W_i^{n-2} + \dots + N_i \cdot W_i + N_i, \quad (2.8)$$

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

Разделив обе части уравнения (2.8) на N_i , получим уравнение в безразмерной форме

$$\frac{N_{in}}{N_i} = \frac{N_{i0}}{N_i} \cdot W_i^n + W_i^{n-1} + W_i^{n-2} + \dots + W_i + 1. \quad (2.9)$$

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

$$N_{in} = \frac{N_i}{1-W_i}. \quad (2.10)$$

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

$$N_{if} = N_i \cdot \frac{W_i}{1-W_i}, \quad (2.11)$$

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

$$N_i = N_{in} - N_{if}. \quad (2.12)$$

В циркуляционной системе маслоснабжения турбоагрегата уровень чистоты масла в установившемся режиме стабилизируется. Это предполагает постоянную скорость поступления загрязнений и постоянную эффективность удаления при фильтровании. Если какое-либо из этих условий изменится, баланс будет потерян и восстановится на другом уровне, т.е. количество частиц, поступающих в масло в результате ингрессии, должно равняться количеству частиц, удаленных при фильтровании. Для надежной работы оборудования, это стабильное состояние чистоты рабочей жидкости должно находиться в пределах нормы.

Зависимость между классами чистоты рабочей жидкости маслосистем по ГОСТ 17216-2001 [31] и поступлением твердых частиц N_i размером 10-25 мкм для

различных значений фракционного коэффициента пропускания W_i показана на рисунке 2.18.

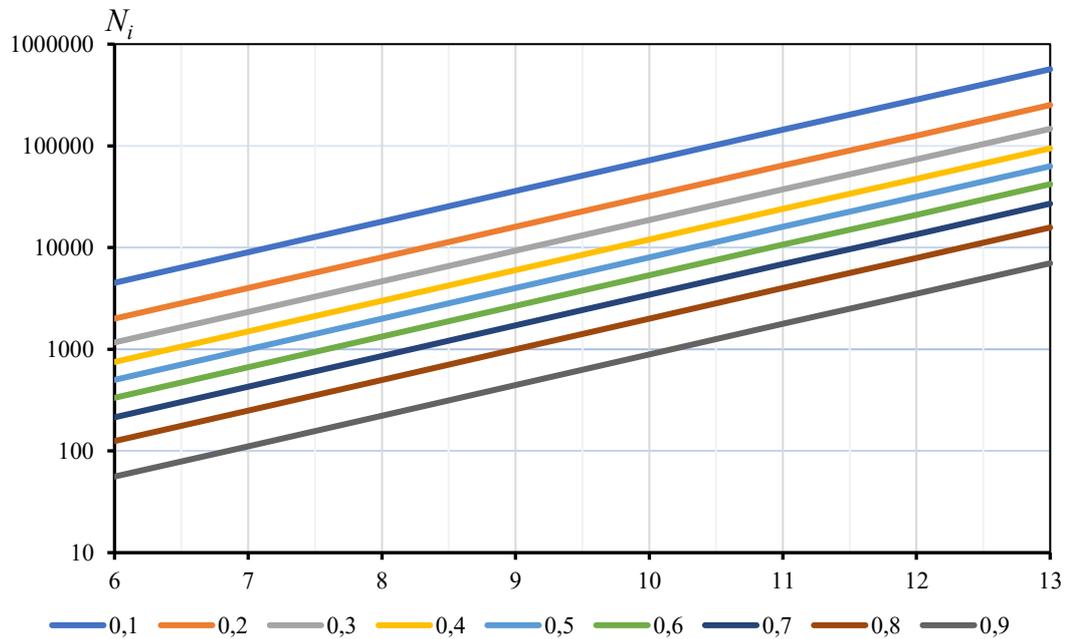


Рисунок 2.18 – Зависимость между классами чистоты масла и поступлением твердых частиц N_i размером 10-25 мкм для различных W_i : 0,1-0,9 – коэффициент пропускания частиц 10-25 мкм; N_i – поступление твердых частиц загрязнений 10-25 мкм в каждые 100 мл рабочей жидкости (lg); 6-13 – классы чистоты по ГОСТ 17216-2001 [31]

Измерения чистоты турбинного масла и поступления загрязнений в рабочую жидкость производились в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-100 ТМЗ. В этой системе приемный грязный отсек ГМБ отделен от чистого встроенным двухступенчатым фильтром грубой и тонкой очистки. В качестве фильтрующих перегородок в двухступенчатом фильтре использовались латунные тканые проволочные сетки с квадратными ячейками размером 700 и 140 мкм для первой ступени фильтра грубой очистки и второй – тонкой очистки соответственно.

Оценка твердых загрязнений в масле по гранулометрическому составу производилась с помощью прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904В [73]

путем анализа отдельных проб масла, отобранных во время работы турбоагрегата под нагрузкой. Масло на анализ отбиралось из потока в зонах турбулентного движения жидкости из отсеков вблизи фильтра при установившемся режиме, когда количество твердых частиц загрязнений, образующихся в системе, равно количеству частиц, задерживаемых фильтрующими перегородками [61].

Данные счета частиц проб масла из грязного отсека и фильтрата из чистого отсека ГМБ приведены в таблице 2.8, обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц в масле на рисунке 2.19, где применена «сетка Сincinnati» $lg N=f(lg^2 X)$ [52]. По оси абсцисс отложен квадрат логарифма размера загрязняющей частицы, по оси ординат – логарифм общего количества частиц, имеющих размеры более чем установленные, в соответствии с правилами накопленного счета.

Таблица 2.8 – Промышленная чистота турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегата Т-100 ТМЗ до и после фильтра

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, место отбора проб	
	Грязный отсек ГМБ	Чистый отсек ГМБ
5-10	50440	10058
10-25	14318	2956
25-50	1361	218
50-100	225	39
>100	48	22
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	10-11	8-9

Чистота масла оценивалась по числу в пробе частиц размерной группы 10-25 мкм, оказывающих основное влияние на снижение показателей надежности агрегатов гидросистем, и соответствует 8-9 классам ГОСТ 17216-2001 [31].

Следует отметить, что на практике подтвердилась аналитическая зависимость (рисунок 2.18) с использованием полулогарифмической сетки.

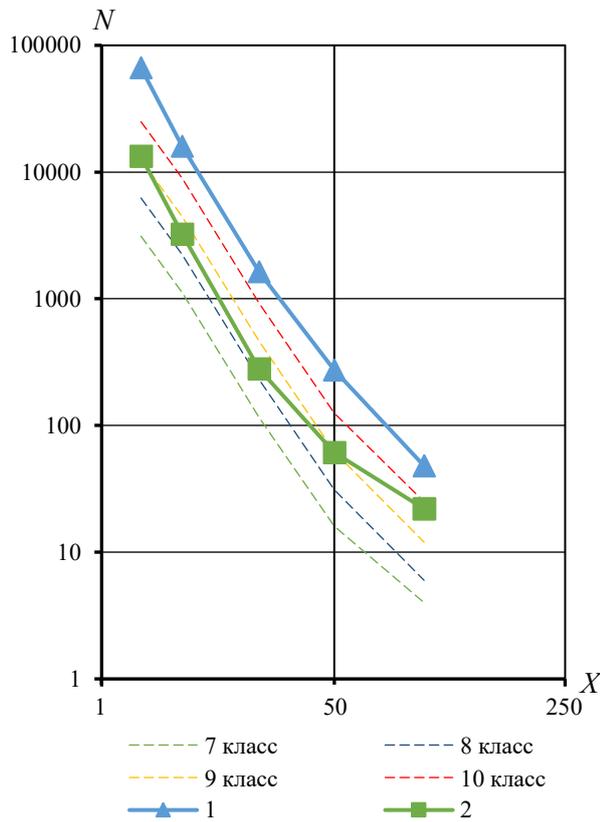


Рисунок 2.19 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения турбоагрегата Т-100 ТМЗ: 1 – масло из грязного отсека ГМБ; 2 – фильтрат из чистого отсека ГМБ; 7-10 классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

2.2.2. Анализ и экспериментальное определение эффективности фильтрации турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегата

В системах маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегатов предусмотрено полнопоточное фильтрование рабочей жидкости, т.е. вся рабочая жидкость, подаваемая насосом в гидросистему, проходит через двухступенчатые фильтры грубой и тонкой очистки (рисунок 1.2). По мере загрязнения фильтров перепад давления на фильтрующих перегородках возрастает. При достижении

критических значений перепада давления необходимо производить очистку фильтров [49].

Эффективность работы фильтра определяют с помощью коэффициента пропускания частиц W_i i -й фракции по формуле (2.4), а фракционный коэффициент отсева φ_i , характеризующий степень снижения концентрации частиц i -й фракции в жидкости до и после фильтра по формуле (2.5).

Последовательно установленные фильтры позволяют уменьшить коэффициент пропускания частиц i -й фракции.

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

$$N_{if1} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i1}); \quad (2.13)$$

$$N_{if2} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i1}) \cdot (1 - \varphi_{i2}); \quad (2.14)$$

$$N_{if3} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i1}) \cdot (1 - \varphi_{i2}) \cdot (1 - \varphi_{i3}); \quad (2.15)$$

...

$$N_{ifn} = N_{iu} \cdot \prod_{n=1}^{\infty} (1 - \varphi_{in}). \quad (2.16)$$

Коэффициент пропускания частиц при многоступенчатом фильтровании можно вычислить по выражениям

$$W_i = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - \varphi_{in}); \quad (2.17)$$

$$W_i = \prod_{n=1}^{\infty} W_{in}. \quad (2.18)$$

При условии $\varphi_{in} = \text{const}$ ($W_{in} = \text{const}$) формулы (2.17) и (2.18) приобретают вид

$$W_i = (1 - \varphi_{in})^n; \quad (2.19)$$

$$W_i = W_{in}^n. \quad (2.20)$$

Зависимость коэффициента пропускания твердых частиц W_i многоступенчатого фильтра от коэффициента пропускания ступени W_{in} при различном количестве ступеней фильтрования n показана на рисунке 2.20.

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 [64].

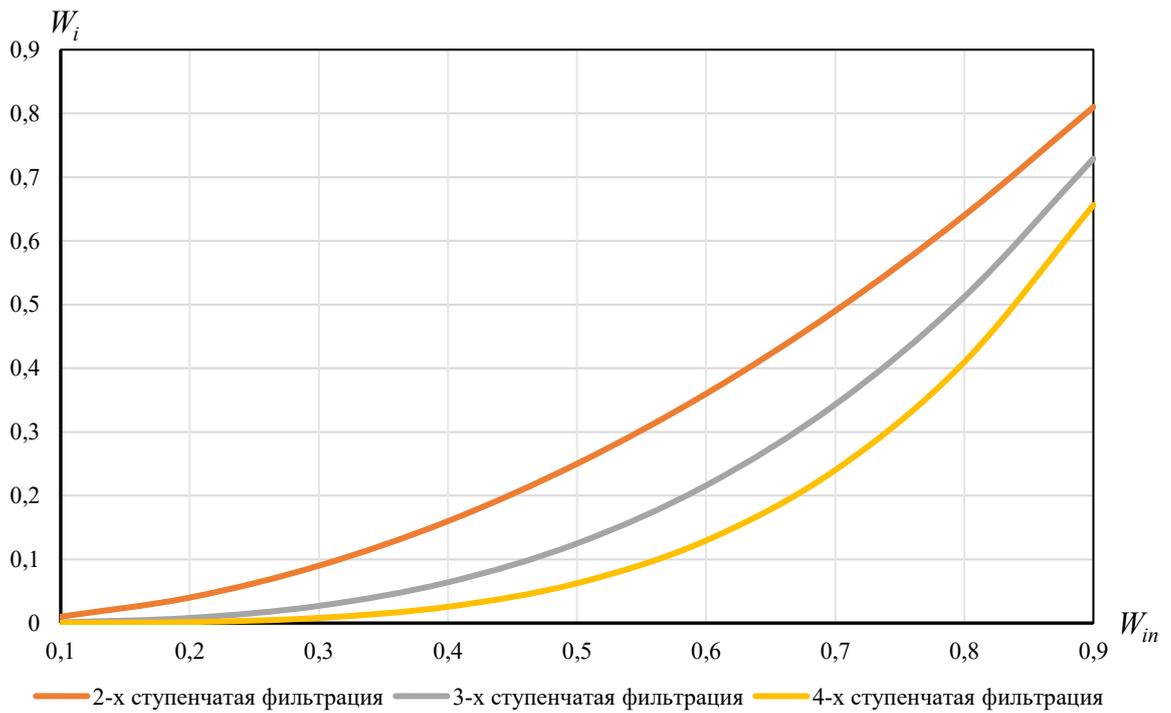


Рисунок 2.20 – Зависимость коэффициента пропускания твердых частиц W_i многоступенчатого фильтра от W_{in} ступени для различных значений количества ступеней фильтрования n

В условиях работы гидравлической системы загрязнения непрерывно поступают в систему и удаляются фильтром. Для того чтобы оценить эффективность многоступенчатых фильтров в системе маслоснабжения турбоагрегата, необходимо проанализировать, как изменение коэффициента пропускания W_i в процессе многоступенчатого фильтрования влияет на чистоту масла в работающей системе.

Число твердых частиц i -й фракции в фильтрате определяется по формуле (2.11). В условиях многоступенчатой фильтрации число твердых частиц i -й фракции в фильтрате (при условии $W_{in}=const$ для всех ступеней фильтрования)

$$N_{ifn} = N_i \frac{W_{in}^n}{1-W_{in}^n}. \quad (2.21)$$

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

$$m = \frac{N_{if1}}{N_{ifn}} = \frac{1-W_{in}^n}{W_{in}^{n-1}-W_{in}^n}, \quad (2.22)$$

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 2.21.

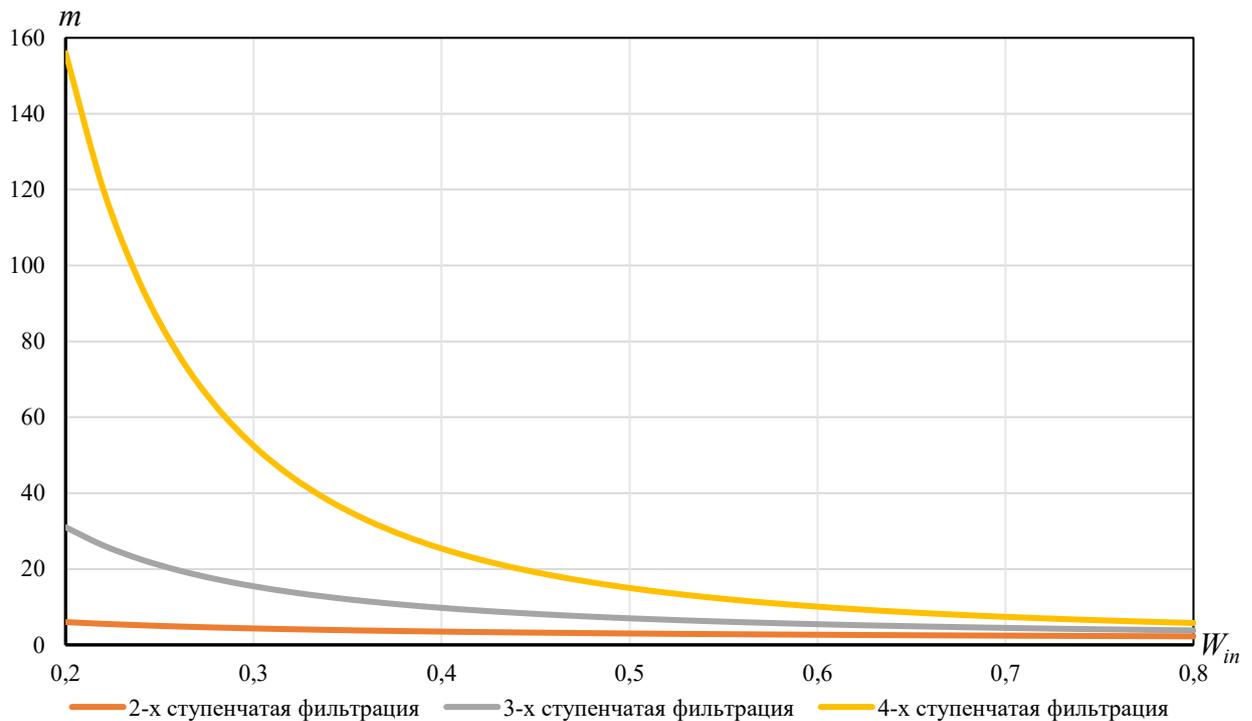


Рисунок 2.21 – Кратность уменьшения количества твердых частиц в фильтрате m в зависимости от различных значений W_{in} ступени для различных значений количества ступеней фильтрования n

На турбоагрегате К-200-130 ЛМЗ Южноуральской ГРЭС была произведена оценка эффективности работы фильтров грубой и тонкой очистки с одной и двумя ступенями [64].

При одноступенчатом фильтровании были последовательно установлены фильтр грубой очистки с перегородкой из полиамидного фильтрующего материала с ячейками размером 450 мкм и фильтр тонкой очистки с перегородкой из такого же материала с ячейками размером 250 мкм. При двухступенчатом фильтровании были последовательно установлены две ступени ФГО и две ступени ФТО с такими же фильтрующими перегородками.

Результаты подсчета частиц твердых загрязнений в пробах масла из чистого отсека ГМБ турбоагрегата приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Промышленная чистота турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования К-200-130 ЛМЗ

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, чистый отсек ГМБ	
	2 ступенчатое фильтрование	1 ступенчатое фильтрование
5-10	6189	19191
10-25	908	3579
25-50	144	320
50-100	35	53
100-200	9	15
>200	16	6
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	7-8	9-10

Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло при работе фильтров в одну и две ступени фильтрования — на рисунке 2.22.

При переходе от одноступенчатого фильтрования к двухступенчатому чистота масла стала выше, а количество в нем твердых частиц размерами более 5 мкм уменьшилось в 3,2 раза.

Коэффициент пропускания твердых частиц размерами более 5 мкм одноступенчатого фильтра, рассчитанный по формуле (2.22) – $W_{i1}=0,45$, а коэффициент пропускания двухступенчатого фильтра, рассчитанный по формуле (2.20) – $W_{i2}=0,2$.

Данные счета частиц твердых загрязнений проб масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ Челябинской ТЭЦ-3 с аналогичными фильтрующими перегородками приведены в таблице 2.10.

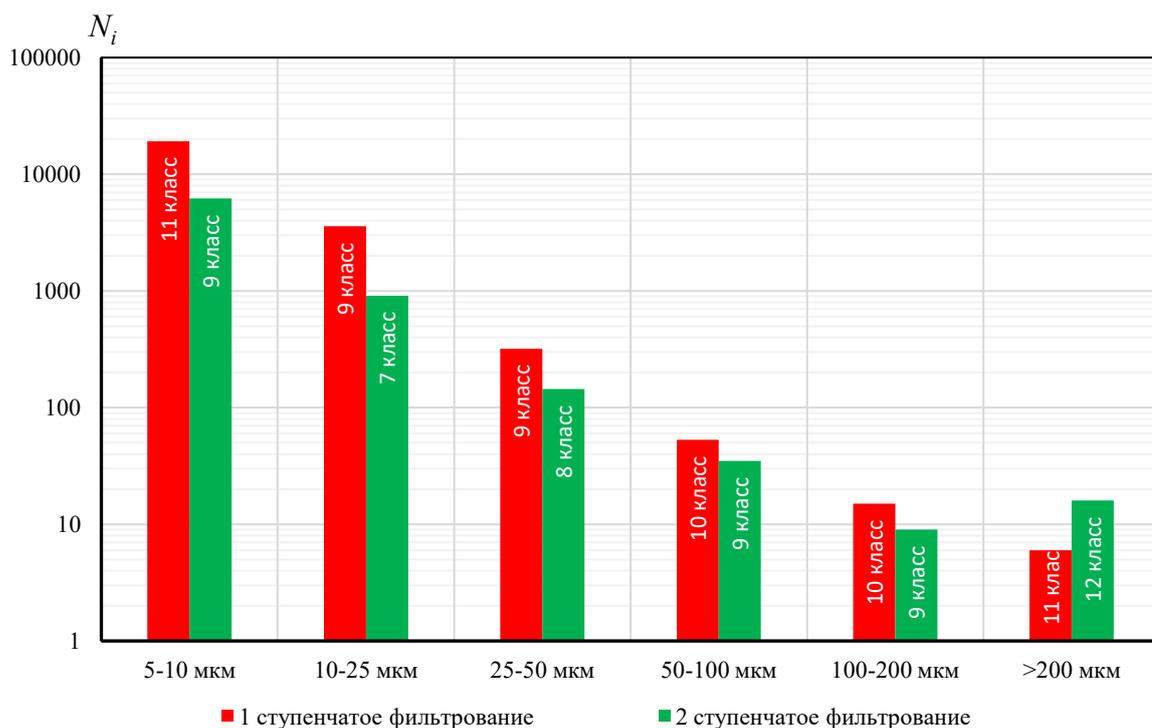


Рисунок 2.22 – Количество частиц в пробах масла (класс чистоты по ГОСТ 17216-2001 [31]) системы смазки подшипников и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ в чистом отсеке ГМБ: 5-10 мкм, 10-25 мкм, ..., 200 мкм – размерные группы частиц; N_i – общее число частиц в 100 мл пробы (lg)

Таблица 2.10 – Промышленная чистота турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования Т-180/210 ЛМЗ

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла	
	Чистый отсек ГМБ	Грязный отсек ГМБ
5-10	1991	11296
10-25	646	3152
25-50	147	438
50-100	11	16
100-200	0	0
>200	0	0
Класс чистоты ГОСТ 17216-71 [31]	7	8-9

Коэффициент пропускания твердых частиц размерами более 5 мкм двухступенчатого фильтра, рассчитанный по формуле (2.4) по данным таблицы 2.10 – $W_{i2}=0,21$.

Практика показывает, латунные сетки, закрепленные в рамках ГМБ, не всегда обеспечивают нормативную чистоту рабочей жидкости. В сложившейся ситуации на ТЭС используют дополнительное маслоочистительное оборудование [8]. Такая очистка может быть выполнена только части расхода масла, чтобы не создавать опасность срыва давления при засорении фильтра [100]. Для удобства эксплуатации их выполняют в виде стационарных или передвижных маслоочистительных установок (МОУ), обеспечивающих фильтрование масла [65]. Установка подключается к ГМБ. Забор масла осуществляется из грязного отсека, сброс масла – в чистый отсек (байпасирование). Расход на МОУ, как правило, не превышает 10% потока масла, циркулирующего в системе смазки [8].

Представляется целесообразным проанализировать эффективность дополнительных средств очистки в системах маслоснабжения турбоагрегатов при работе под нагрузкой.

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

$$N_{if1} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i1}); \quad (2.23)$$

$$N_{if2} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i2}); \quad (2.24)$$

$$N_{if3} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{i3}); \quad (2.25)$$

...

$$N_{ifn} = N_{iu} \cdot (1 - \varphi_{in}). \quad (2.26)$$

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

$$N_{if} = N_{if1} \cdot b_1 + N_{if2} \cdot b_2 + N_{if3} \cdot b_3 + \dots + N_{ifn} \cdot b_n = \sum_{n=1}^{\infty} N_{ifn} \cdot b_n, \quad (2.27)$$

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

Коэффициент пропускания частиц при байпасном фильтровании можно вычислить по выражениям

$$W_i = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot (1 - \varphi_{in}). \quad (2.28)$$

$$W_i = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot W_{in}. \quad (2.29)$$

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 2.23.

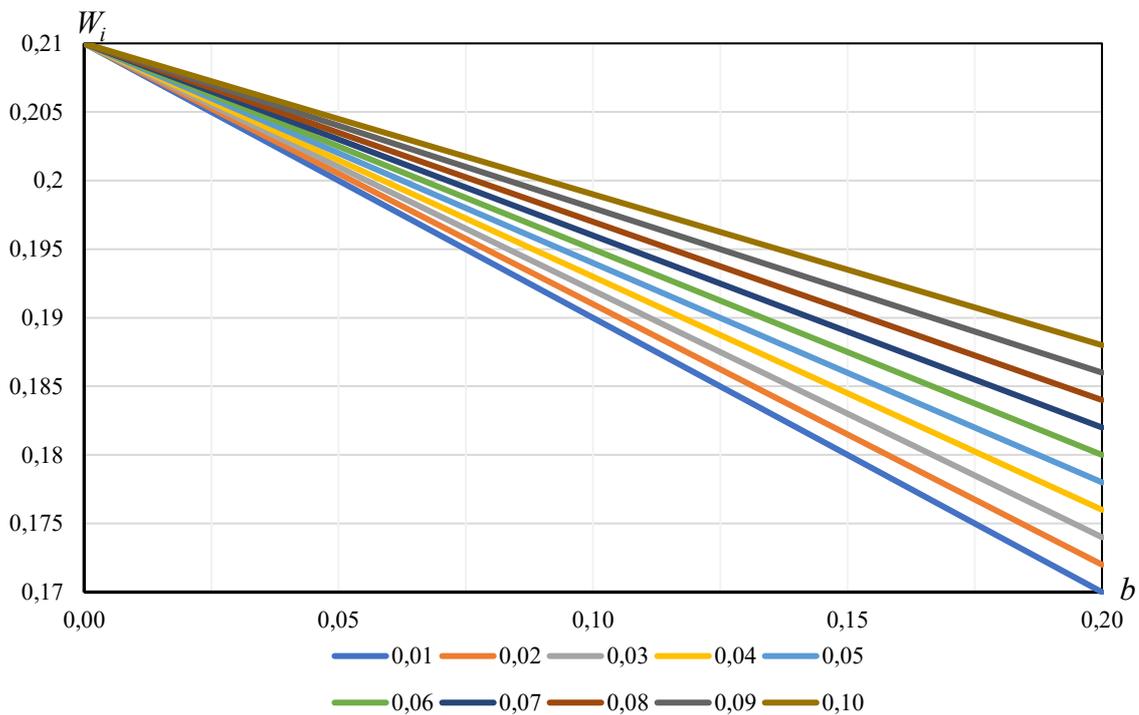


Рисунок 2.23 – Зависимость коэффициента пропускания твердых частиц W_i от значений байпасирования b для различных значений W_{ib} байпаса при $W_{ir}=0,21$; 0,01-0,1 - коэффициент пропускания частиц байпаса W_{ib} ; W_i - коэффициент пропускания частиц фильтра; b - коэффициент байпасирования

При байпасном фильтровании 10% потока масла циркулирующего в системе смазки на работающей турбине с эффективностью штатных фильтров ГМБ $W_{ir}=0,21$ и байпасного фильтра $W_{ib}=0,04$ [93] снижение количества твердых частиц в фильтрате (в чистом отсеке ГМБ) рассчитанного по формуле (2.11) составит 10% (пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения

количества частиц прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А $\pm 30\%$, сходимость показаний при контроле последовательными пробами не хуже 10% [73]).

Следует отметить, применение байпасных фильтров в системе маслоснабжения подшипников в процессе эксплуатации турбоагрегата под нагрузкой малоэффективно из-за низкой пропускной способности. К недостаткам таких МОУ могут быть отнесены: высокая стоимость, периодичность работы и повышенные эксплуатационные расходы [8].

ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРОВАНИЯ ТУРБИННОГО МАСЛА (МОДЕРНИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ ГМБ)

3.1. Общие сведения и теоретические основы

При фильтровании рабочей жидкости через пористую перегородку сопротивление перегородки прохождению жидкости растет, так как уменьшается эффективное сечение пор. Уменьшение эффективного сечения пор происходит даже в случае, когда размеры частиц, загрязняющих жидкости меньше размеров пор.

Различают следующие виды фильтрования [39, 43, 45, 83, 89, 103]:

1. Фильтрование с полным закупориванием пор происходит в том случае, когда каждая пора закупоривается одной твердой частицей.

2. Фильтрование с постепенным закупориванием пор многими твердыми частицами происходит, когда размер частицы, загрязняющей масло меньше размера поры. Она может вместе с жидкостью пройти через пористую перегородку, но может и задержаться внутри перегородки в результате механического торможения в местах выступов или впадин. Частица, задержавшаяся в поре, уменьшает эффективное сечение поры и увеличивает вероятность осаждения в этом месте последующих частиц. Твердая частица может задержаться внутри пористой перегородки в результате адсорбции (прилипания) на стенках поры.

Фильтрование с постепенным закупориванием пор многими твердыми частицами называется стандартным видом или стандартным законом фильтрования. Стандартный вид фильтрования возникает в тех случаях, когда концентрация загрязнений в рабочей жидкости гидросистем не превышает 0,063% [52] и имеют место благоприятные условия осаждения твердых частичек в порах. Если закупоривание пор фильтровальной перегородки происходит относительно

быстро, то необходимо периодически производить замену ее или очищать, так как она может быть разрушена из-за повышающегося перепада давления.

3. Фильтрация с образованием осадка имеет место в тех случаях, когда загрязняющая частица с размерами меньшими, чем размер поры, не входит в пору, а остается на поверхности перегородки. Накапливаясь на поверхности пористой перегородки, эти мелкие частицы образуют вокруг поры сводики, задерживающие другие частицы.

По виду осадка и пористой перегородки фильтрация классифицируется следующим образом: несжимаемый осадок и пористая перегородка; сжимаемый осадок и пористая перегородка.

Условно считают, что при фильтрации рабочих жидкостей образуется несжимаемый осадок на несжимаемой пористой перегородке, так как в рабочей жидкости гидросистем загрязнения, вызванные износом металлических трущихся деталей гидравлического оборудования, составляют абсолютное большинство по сравнению с другими загрязнениями (волокна, смолистые осадки и т.д.).

Исследованиями установлено, что недеформируемые (несжимаемые) механические примеси в рабочих жидкостях гидроприводов составляют 80-85% от общего количества загрязнений.

Анализ загрязнений рабочей жидкости гидравлических систем тракторов, выполненный в Челябинском филиале научно-исследовательского тракторного института [6] позволил установить, что основную часть механических примесей в рабочей жидкости составляют продукты неорганического происхождения. Органическая часть механических примесей представляет собой в основном продукты окислительных процессов в рабочей жидкости.

Фильтрация с образованием осадка на пористой перегородке возникает в тех случаях, когда концентрация загрязнений в рабочей жидкости гидросистем составляет 0,15% и более.

4. Фильтрация промежуточного вида происходит в тех случаях, когда концентрация загрязнений в рабочей жидкости – 0,063-0,15%. Этот вид фильтрации является промежуточным между фильтрацией с постепенным

закупориванием пор многими твердыми частицами и фильтрованием с образованием осадка.

В системах маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегатов предусматривается полнопоточное фильтрование рабочей жидкости, т.е. вся рабочая жидкость, подаваемая насосом в гидросистему, проходит через двухступенчатые фильтры грубой и тонкой очистки (рисунок 1.1). В процессе фильтрования рабочей жидкости через фильтры перепад давления на фильтрующих перегородках возрастает, что необходимо для поддержания постоянного расхода через них.

Основные уравнения для различных видов фильтрования, в том числе и для случая с постоянным расходом рабочей жидкости через пористую перегородку, и их вывод рассмотрены в трудах В. А. Жужикова [43].

В производственных условиях под фильтрованием, в частности турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегата, следует понимать не только разделение суспензии на фильтрат и осадок, но и последующие операции – удаление осадка на фильтре.

Для предотвращения проникновения тонкодисперсной твердой фазы в поры фильтрующей перегородки и повышения проницаемости образующегося слоя осадка часто применяют фильтровальные вспомогательные вещества (ФВВ) [43, 55, 79]. По мнению авторов [54] фильтрование с применением ФВВ является практически единственным эффективным способом разделения тонких суспензий.

В качестве ФВВ применяют различные материалы: диатомит, перлит, целлюлозу, синтетические и другие материалы. В качестве вспомогательных могут служить и вещества, обладающие адсорбционной способностью: древесный и активированный уголь, силикагель, цеаниты и др. Вспомогательные вещества добавляются в исходную суспензию (текущее дозирование); возможны и другие способы их применения.

При добавлении ФВВ в суспензию концентрация твердых веществ в ней увеличивается, что способствует образованию сводиков над входами в поры и препятствует проникновению в них тонкодисперсных частиц. Поскольку ФВВ

зачастую адсорбируют коллоидные, смолистые примеси, то скорость фильтрования и качество фильтрата можно значительно повысить текущим дозированием.

На практике наиболее простое использование ФВВ реализуется добавлением его в суспензию.

К вспомогательным веществам предъявляются следующие требования: химическая и термическая стабильность, высокая задерживающая способность, незначительное удельное сопротивление. Характеристики различных вспомогательных веществ и способы их применения подробно рассмотрены в [54, 79].

Даже незначительные следы поверхностно активных веществ сообщают пузырьку свойства твердого шарика, увеличивают диссипацию энергии, затрудняют коалиценцию и тормозят подъем пузырьков на поверхность. Пузырьки диаметром 0,01 см 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) [53].

По данным Г. Уоллиса [60] можно обнаружить аналогию в поведении пузырьков газа, капель жидкости и взвешенных твердых частиц в двухфазных системах. Исходя из этого, можно предположить, что текущее дозирование в рабочую жидкость пузырьков воздуха и доведение суммарной концентрации твердых и мягких частиц в ней до 0,15% и более будет способствовать образованию сводиков над входами в поры и препятствовать проникновению в них тонкодисперсных частиц.

Находящиеся в жидкости пузырьки воздуха оказывают дополнительное сопротивление фильтрованию (эффект Жамена) [9, 41, 43, 150]. Следует, однако, уточнить в каких пределах изменение суммарной концентрации твердых и мягких частиц в рабочей жидкости пузырьки воздуха оказывают дополнительное сопротивление фильтрованию.

3.2. Фильтрация аэрированного масла в системе смазки подшипников и регулирования турбоагрегата

Воздух в маслах находится в растворенном состоянии и в виде пузырьков. Растворимость воздуха в маслах при нормальных условиях от 8 до 12% [49]. Растворимость воздуха зависит от химической структуры масла, поверхностного натяжения, плотности, температуры окружающей среды и парциального давления растворяющегося воздуха.

Аэрация масла происходит за счет механического перемешивания при прокачке, транспортировке и заправке, а также при изменении парциального давления и температуры. Образовавшиеся пузырьки частично растворяются и частично всплывают, а определенное их количество остается в масле. Скорость всплытия пузырьков зависит от вязкости и плотности жидкости, а также коэффициента диффузии воздуха в углеводородной среде [82]. В присутствии загрязнений и поверхностно-активных веществ она резко снижается [19].

При работе системы маслоснабжения паровых турбин масло перемешивается с газами: атмосферным воздухом, водородом, газообразными продуктами окисления. Часть газа растворяется в нем, другая – образует механическую смесь различной структуры. Наибольший контакт между маслом и воздухом происходит в не герметизированных масляных системах. Газ в жидкости может существовать также в виде мельчайших, порядка долей микрона, газовых зародышей, адсорбированных на поверхности механических примесей [2]. Из этих зародышей при различных возмущениях жидкости спонтанно возникают газовые пузыри больших размеров. Причем выделение газа резко увеличивается на границе жидкость – твердое тело, особенно в пористых материалах с развитой удельной поверхностью. При прохождении аэрированного масла через фильтр пузырьки воздуха задерживаются на поверхности, забивая поры. В порах при изменении давления и температуры масла происходит образование пузырьков за счет перехода растворенного воздуха в свободный, что также приводит к забивке пор фильтрующей перегородки.

По некоторым данным [87] размер воздушных пузырьков и количество диспергированного воздуха оказывает существенное влияние на процесс фильтрования при небольших скоростях, соответствующих малым перепадам давления на фильтровальном материале.

Установилось мнение, что присутствие нерастворенного газа в рабочей жидкости гидросистем ухудшает работу последних [56].

Рабочие жидкости в системах маслоснабжения паровых турбин (минеральные и синтетические масла) 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 50-500 мкм, равномерно распределенных по всему объему масла [52].

Исследование фильтрования азрированного масла проводилось в системе маслоснабжения подшипников турбоагрегата Т-100 ТМЗ [63, 77]. В ней приемный отсек для грязного масла отделен от чистого отсека встроенными фильтрами грубой и тонкой очистки. В качестве фильтрующих перегородок использовали латунные тканые проволочные сетки квадратного плетения (ГОСТ 6613-86 [25]) с ячейками размером 700 и 140 мкм для фильтров грубой и тонкой очистки соответственно.

В опытах оценивалась задерживающая способность фильтрующих перегородок по отношению к твердым частицам при фильтровании азрированного и деазрированного масла.

Оценка твердых загрязнений в пробах масла по гранулометрическому составу производилась с помощью прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904В [73] путем анализа отдельных проб масла, отобранных во время работы турбоагрегата под нагрузкой. Масло на анализ отбиралось из потока в зонах турбулентного движения жидкости из отсеков вблизи фильтра при установившемся режиме, когда количество твердых и мягких частиц, образующихся в системе, равно количеству частиц, задерживаемых фильтрующими перегородками. Данные счета твердых частиц проб масла из

грязного отсека и фильтрата (из чистого отсека и в опыте при фильтровании деаэрированного масла) приведены в таблице 3.1, обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц в масле на рисунке 3.1.

Таблица 3.1 – Загрязненность масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины Т-100 ТМЗ до и после фильтров и фильтрата деаэрированного масла

Место отбора проб	Число частиц в 100 мл масла размером, мкм				
	5-10	10-25	25-50	50-100	>100
Из грязного отсека ГМБ	50440	14318	1361	225	48
Фильтрат аэрированного масла из чистого отсека ГМБ	10058	2956	218	39	22
Фильтрат деаэрированного масла	48085	12133	1323	156	31

Исследована способность фильтров задерживать твердые частицы суспензии (масла из грязного отсека) после того, как из нее были удалены пузырьки газа.

Результаты дисперсионного анализа твердых загрязнений в пробах масла использовали для оценки чистоты рабочей жидкости по ГОСТ 17216-2001 [31].

При фильтровании деаэрированного масла (двухфазной системы) коэффициент отсева твердых частиц размерной группы 10-25 мкм – $\varphi_i^d=0,15$. Концентрация твердых частиц в пробах масла из грязного отсека не превышает 0,002% (низкоконцентрированная суспензия высокодисперсной фазы). Стандартный вид процесса фильтрования возникает в тех условиях, когда концентрация загрязнений в рабочей жидкости гидросистем не превышает 0,063%.

При фильтровании аэрированного масла коэффициент отсева твердых частиц размерной группы 10-25 мкм – $\varphi_i^d=0,79$. Мягкие частицы (пузырьки газа) в трехфазной системе при фильтровании аэрированного масла увеличивают коэффициент отсева твердых частиц размерной группы 10-25 мкм более чем в 5 раз.

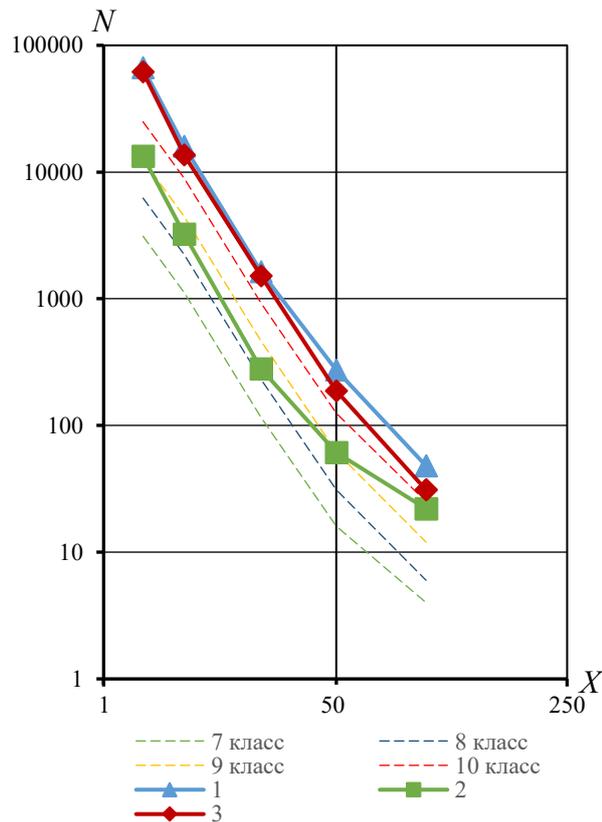


Рисунок 3.1 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата Т-100 ТМЗ: 1 – масло из грязного отсека ГМБ; 2 – фильтрат из чистого отсека ГМБ; 3 – фильтрат деаэрированного масла; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg);

X – размер частиц, мкм (lg^2)

Фильтрация с образованием осадка на пористой перегородке (шламовый режим) возникает, когда концентрация загрязнений 0,15% и более. Очевидно, при добавлении мягких частиц (пузырьков газа) в суспензию концентрация дисперсных фаз в ней увеличивается и может изменить режим процесса фильтрации и таким образом влиять на качество фильтрата, как это имеет место при использовании ФВВ. Последний способ повышения эффективности фильтров ГМБ широко применяется в системах маслоснабжения паровых турбин.

Теоретические основы фильтрования разработаны для двухфазных систем. Процесс фильтрования с участием трех фаз отличается большой сложностью вследствие большого числа параметров, влияющих на него [83].

При исследовании проб масла, взятых в указанных точках системы смазки подшипников, получены следующие результаты: пробы из чистого отсека отнесены к 8-9 классам, а пробы из грязного отсека – к 11 классу ГОСТ 17216-2001 [31].

За насосом сжатые пузырьки быстро растворяются, поэтому фильтры, установленные на всасывании, более эффективны. ВНИИгидроприводом, а также зарубежными фирмами (например, фирмой Розайн) доказано, что установка всасывающих фильтров с тонкостью фильтрования 74 мкм по своей эффективности эквивалентна установке фильтров на линии нагнетания с тонкостью фильтрования 25 мкм [52].

3.3. Задачи и цели модернизации фильтров ГМБ турбоагрегатов

В задачи работы входило определение причин частых отказов в системе регулирования турбоагрегатов и повышенного износа подшипников. Работа проводилась с целью: обоснования физического механизма процесса загрязнения рабочей жидкости в системе маслоснабжения, рекомендации необходимого класса промышленной чистоты турбинного масла в дополнение к действующим нормативам и достижения требуемой чистоты в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегатов [62, 96].

Для очистки турбинного масла от загрязнений чаще всего применяют сетчатые фильтры, закрепленные в рамах и установленные в шандорах ГМБ (рисунок 3.2). В качестве фильтрующих перегородок, как правило, используют латунные тканые проволочные сетки квадратного плетения ГОСТ 6613-86 [25] (рисунок 3.3). Приемный отсек ГМБ грязного масла отделен от чистого отсека встроенными двухступенчатыми фильтрами грубой и тонкой очистки.

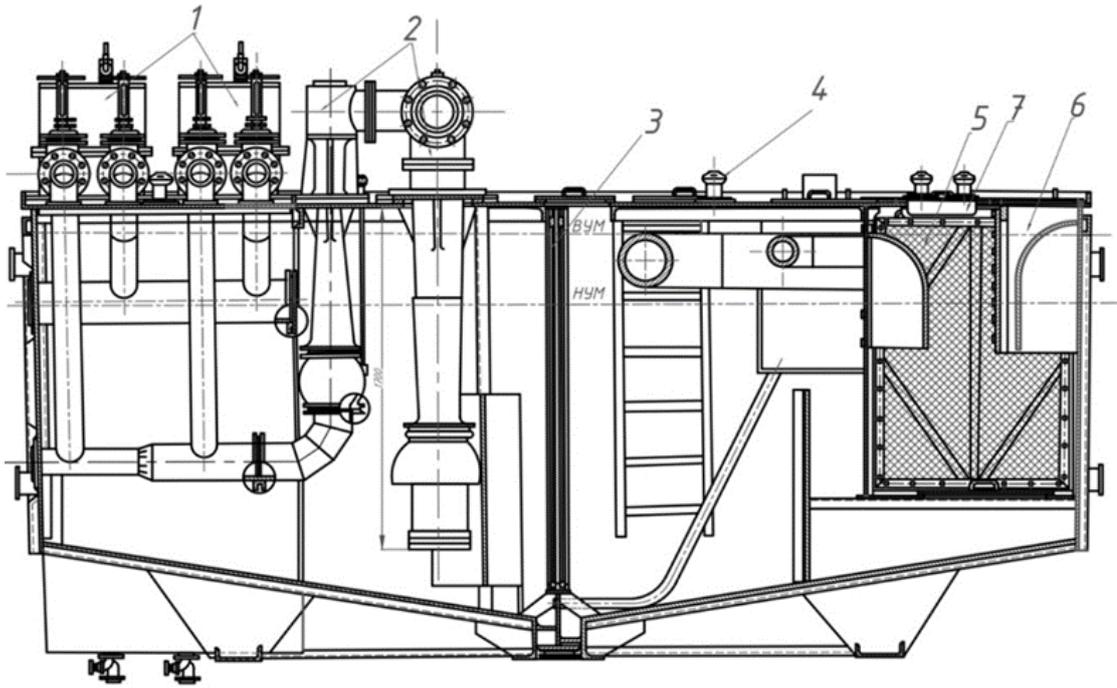


Рисунок 3.2 – ГМБ объемом 22 м³ к турбинам ПТ-50/60-130 ТМЗ:
 1 – маслоохладитель; 2 – инжекторная группа; 3 – двухступенчатый фильтр тонкой очистки; 4 – дефлектор; 5 – двухступенчатый фильтр грубой очистки; 6 – сито для заливки масла; 7 – приемный отсек; ВУМ – верхний уровень масла; НУМ – нижний уровень масла

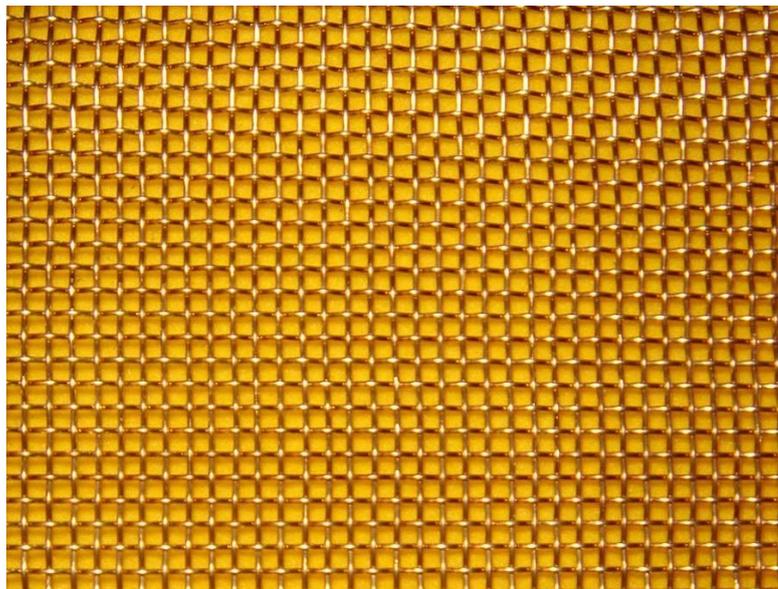


Рисунок 3.3 – Латунная тканая проволочная сетка квадратного плетения

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 ГМБ. В свою очередь цветные металлы и продукты коррозии являются катализаторами окислительных процессов в масле [69, 92]. Латунные сетки, как правило, не обеспечивают необходимую (нормативную) чистоту рабочей жидкости [61].

Повышенная загрязненность рабочих жидкостей в энергетике одна из причин отклонений частоты электрического тока за нормальные и допустимые пределы, увеличивает износ подшипников, вызывает электроэрозию и снижает надежность уплотнений вала генератора, ухудшает их эксплуатационные свойства и т.д.

Повысить надежность системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегатов можно за счет увеличения эффективности фильтров.

Установленные недостатки существующей системы очистки масла привели к необходимости подбора нового фильтрующего материала и размеров ячеек фильтрующих сеток в каждой ступени фильтра грубой и тонкой очистки ГМБ, который обеспечил бы необходимую чистоту турбинного масла при удовлетворительной характеристике фильтра.

Оценка загрязнений в масле по гранулометрическому составу производилась по методике экспресс-анализа (раздел 2.1) путем анализа отдельных проб масла, отобранных во время работы турбоагрегата под нагрузкой.

3.4. Подбор фильтрующих перегородок для фильтров ГМБ

Фильтровальные материалы (перегородки) являются самой существенной частью фильтров [79]. От правильного выбора фильтровальных материалов зависит качество полученного фильтрата и производительность фильтра [1, 70, 71, 76, 85, 86, 88, 97, 98].

Характеристики фильтрующих перегородок (форма и размер пор, химическая активность материала из которого они изготовлены и др.) сильно влияют на ход процесса фильтрования и его эффективность. Кроме того, те или иные характеристики перегородки приобретают большее или меньшее значение в зависимости от типа фильтровального оборудования. Так, например, для фильтров ГМБ первостепенное значение имеют высокое сопротивление разрыву, истиранию, износу, качество уплотнения фильтрующей перегородки, а также способность легко освобождаться от осадка.

Большое значение для повышения эффективности работы фильтров имеет предварительная подготовка суспензии [83].

Правильно подобранный фильтрующий материал является одним из определяющих факторов нормальной работы фильтров.

Рассмотрим какие факторы влияют на выбор фильтрующего материала [142]:

1. Материал, из которого изготовлена фильтрующая перегородка, должен быть совместим с фильтруемой жидкостью. Рабочие жидкости могут вызывать коррозию металлического фильтра. В свою очередь, коррозия может привести к загрязнению фильтруемой жидкости, существенно увеличивая гидравлическое сопротивление и снижая ресурс и срок службы фильтрующего элемента.

2. Расход зависит от двух основных параметров – давления и сопротивления. Вязкость жидкости непосредственно влияет на сопротивление. Если все остальные параметры неизменны, то двукратное увеличение вязкости фильтруемой жидкости приведет к двукратному увеличению гидравлического сопротивления фильтра.

3. Температура рабочей жидкости может одновременно влиять на ее вязкость, на скорость коррозии фильтра и на совместимость фильтрующего материала с фильтруемой жидкостью. Высокая температура способствует ускорению коррозии.

4. Гидравлическое сопротивление чистого фильтра складывается из сопротивлений каркаса фильтроэлемента и фильтрующего материала. Для жидкости определенной вязкости фильтрующий материал с меньшими размерами ячеек будет создавать больше сопротивление потоку. При протекании жидкости

через фильтр, результатом является падение давления. Падение давления на фильтре называется дифференциальным давлением. Задержанные частицы частично или полностью перекрывают ячейки (поры) фильтрующего материала, увеличивая гидравлическое сопротивление фильтра и перепад давления.

Следовательно, выбирая фильтр, нужно создать достаточное давление для поддержания требуемого расхода жидкости вплоть до полного использования эффективной грязеемкости (ресурса) фильтра.

5. Объем ячеек (пор), является важнейшей характеристикой. Фильтрующий материал с наибольшим объемом ячеек (пор) при прочих равных условиях будет наилучшим выбором с точки зрения наибольшего ресурса и наименьшего начального удельного перепада давления на чистом материале. Для одинакового размера ячеек (пор) объем ячеек (пор) больше при меньшем диаметре волокон. При разработке каждого конкретного фильтра должны учитываться и другие факторы, такие как его прочность, стоимость фильтрующего материала и конструкции и т.д.

6. Фильтр должен обладать эффективностью, которая предусмотрена конкретным технологическим процессом. Выбор фильтра с размерами ячеек (пор) меньше необходимого может быть неправильным экономически. Нужно помнить, что более тонкий фильтр потребует более частой регенерации, замены, и, следовательно, больших затрат. При эмпирическом выборе фильтрующей перегородки надлежит руководствоваться следующим основным правилом: фильтрующая перегородка должна обладать максимальным размером ячеек (пор) и одновременно обеспечивать получение достаточно чистого фильтрата [43].

Выбранный фильтр должен не только задерживать частицы из жидкости, но и удерживать их. Фильтрующие материалы, ячейки (поры) которых могут увеличиваться под действием возрастающего перепада давления, могут выпускать накопленные загрязнения. Фильтрующий элемент с фиксированными ячейками (порами) – это материал, структура которого не изменяется при переменных условиях фильтрования. Недопустимы разрывы сетки под действием перепада давления. Основными параметрами эффективности фильтра являются способность захвата и способность удержания загрязняющих частиц.

7. Регенерация фильтров – степень очистки загрязненных фильтров. Ключевым фактором является способность фильтров восстанавливать показатели эффективности после очистки.

Фильтровальный материал для фильтров ГМБ должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Надежно задерживать возможно большее количество твердых и мягких частиц;
2. Иметь небольшое гидравлическое сопротивление при максимальной удельной пропускной способности;
3. Не изменять физико-химических, механических свойств и геометрических размеров при контакте с турбинным маслом и при воздействии ударных, тепловых и вибрационных нагрузок;
4. Иметь хорошие технологические и конструктивные свойства для изготовления фильтров ГМБ;
5. Легко и многократно регенерироваться от загрязнений;
6. Иметь высокий ресурс и длительный срок службы;
7. Иметь хорошие экономические показатели;
8. После использования легко утилизироваться, не загрязняя окружающую среду.

Фильтрующие свойства перегородок оцениваются качественными и количественными параметрами. К первым относят размер ячеек фильтрующих сеток и максимальный размер частиц, прошедших через фильтрующую перегородку; ко вторым – коэффициент отфильтровывания, коэффициент пропускания и т.д.

Качественные критерии не дают достаточно полной оценки фильтровальных материалов, так как они не отражают эффективности отделения частиц загрязнений размером меньше размеров ячеек сетки. Пренебрежение мелкими частицами загрязнений недопустимо из-за процессов коагуляции [12]. Количественные критерии оценки также не одинаково отражают качество фильтровальных материалов. Полнота отсева загрязнений, характеризующаяся массовым или

объемным коэффициентом отсева, не имеет явно выраженной функциональной зависимости между общим содержанием и распределением частиц по размерам. Этот критерий не несет информации о дисперсионном составе загрязнений.

Попытка связать оценку фильтрующих свойств с распределением пор по размерам пока не увенчалась успехом. Это объясняется, прежде всего, тем что процесс фильтрования не однозначен чистому рассеиванию. Это хорошо иллюстрируется опытами, в которых совмещены результаты определения поровой структуры фильтрующих сеток, дисперсионный состав загрязнений в фильтрате и эффективность отфильтровывания частиц загрязнений фильтровальным материалом. Остальные количественные критерии базируются на некоторых конкретных значениях коэффициентов отфильтровывания φ_i и пропускания W_i , которые связаны между собой зависимостью (2.4). Эти параметры характеризуют способность фильтра задерживать частицы загрязнений во всем диапазоне их размеров, однако, точность полученных данных зависит от степени достоверности результатов анализа дисперсионного состава загрязнений.

Ниже описываются несколько применяющихся на сегодняшний день методов оценок эффективности фильтров [142]:

1. Номинальная тонкость фильтрования. Часть производителей фильтров для оценки их эффективности используют номинальную тонкость фильтрования. Этот параметр был определен Национальной ассоциацией по гидравлическим приводам (NFPA, США): «Произвольный, выбранный производителем размер частиц в микронах, соответствующий удалению определенной процентной доли от общего числа частиц данного или большего размера». Строгое определение этого параметра встречается очень редко, а также он не воспроизводим.

Следует отметить, что это гравиметрический тест. Гранулометрический метод – подсчет количества частиц до и после фильтра является более показательным.

2. Абсолютная тонкость фильтрования. Организация NFPA определила абсолютную тонкость фильтрования следующим образом: «Максимальный диаметр твердых частиц сферической формы, пропускаемых фильтром при

определенных условиях тестирования». Этот параметр определяет максимальный размер ячеек (пор) фильтра. Он применяется к фильтрующим материалам цельной структуры.

Для определения абсолютной тонкости фильтрования фильтроэлементов применяются несколько общепризнанных тестов, выбор которого зависит от производителя, типа фильтрующего материала, а иногда от отрасли, в которой применяется фильтр. Всегда фильтры тестируются в составе целевых систем.

3. Оценка эффективности фильтров с помощью коэффициента фильтрования Бета (β). Наиболее современным методом оценки эффективности фильтров является определение коэффициента фильтрования – Бета (β). Коэффициент фильтрования β определяется с помощью теста «OSU F-2 для определения характеристик фильтра», который был разработан Оклахомским государственным университетом.

Оценка эффективности фильтров по коэффициенту фильтрования подходит для определения характеристик самых разных фильтрующих элементов.

Для любого фильтра можно построить профиль эффективности фильтрования, если в потоке до фильтра и за ним посчитать частицы тестового загрязнения для нескольких различных размеров частиц.

Коэффициент эффективности фильтрования определяется по формуле:

$$\beta_i = \frac{N_{iu}}{N_{if}}, \quad (3.1)$$

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

Эффективность фильтрования частиц определенного размера в процентах:

$$\% = \frac{\beta_{i-1}}{\beta_i} \times 100. \quad (3.2)$$

Большинство производителей фильтров и фильтрующих элементов для оценки эффективности фильтров в лабораторных условиях используют стандартные общепринятые промышленные методики, опираясь на стандарт ГОСТ Р ИСО 16889-2011 [38].

Тонкость очистки в [49] определяется размером ячейки сеток в свету, уменьшение которого ограничивается ростом гидравлического сопротивления, а

также сетки тонкой очистки обладают малой механической прочностью, и они способны быстро загрязняться. Необходимая площадь сетчатых фильтров F , м², определяется следующей зависимостью (справедливой при $a > 10^{-5}$ м):

$$F = 50 \frac{Q\mu}{\Delta P(a - 10^{-5})}, \quad (3.3)$$

где Q – расход масла, м³/с; μ – динамическая вязкость, Па·с; ΔP – перепад давления на сетке, Па; a – размер квадратной ячейки в свету, м.

Например, если $Q=0,07$ м³/с (252 м³/ч), и $\mu=0,02$ Па·с (масло Тп-22с при 48°С), $\Delta P=260$ Па (30 мм масляного столба), $a=18 \cdot 10^{-5}$ м (180 мкм), то $F=3,37$ м². Для сетки с размером ячейки $a=20 \cdot 10^{-5}$ м (200 мкм), $F=2,27$ м².

При фильтровании масла сетчатые перегородки способны задержать значительную часть воздушных пузырьков, в связи с чем это свойство сеток используют для интенсификации воздуховыделения [56]. Чтобы пузырьки не деформировались и не продавливались через сетку, необходимы низкие скорости потока на подходе к сетке (0,05—0,06 м/с) и перепады давления ΔP , Па, не превышающие значений, вычисленных по формуле [49]:

$$\Delta P = 2\sigma k' a^{-1} \cos \theta, \quad (3.4)$$

где σ – поверхностное натяжение на границе масло-воздух, Н/м; a – размер ячейки в свету, м; k' – коэффициент, учитывающий геометрию ячейки сетки; θ – краевой угол.

Для нефтяного масла Тп-22с и проволочных сеток по ГОСТ 6613-86 [25] можно принимать $\theta=16^\circ$, $k'=1,2$. В частности, если $\sigma=0,03$ Н/м, $a=63 \cdot 10^{-6}$ м, $\cos\theta=0,866$, то $\Delta P=990$ Па (114 мм масляного столба).

Как упоминалось ранее, широкому распространению этого способа очистки масла препятствуют два недостатка: сетки тонкой очистки обладают малой механической прочностью; они способны быстро загрязняться.

С помощью фильтровальных перегородок можно удалять из масла не только твердые механические примеси, пузырьки воздуха, но и воду. Большая часть водозадерживающих тканей эффективно удаляют воду лишь при небольших скоростях фильтрования – не более 0,00267 м³/(с·м²). Скорость отделения воды из масла зависит от их общей загрязненности, химического состава, температуры,

режима фильтрации, физико-химических свойств фильтровального водоотделяющего материала.

Вместимость бака турбины К-200/130 ЛМЗ составляет 28 т, а расход масла 4 т/мин. Следовательно, в баке каждый литр масла находится 7 мин. В баках-отстойниках традиционной горизонтальной конструкции отсутствует равномерное движение масла. Наряду с «мощной» транзитной струей существуют интенсивные круговоротные зоны, области с вторичной «вялой» циркуляцией и застойные, «мертвые» участки. Из-за выраженной струйности потока его действительные скорости оказываются в 2-5 раз выше теоретической, рассчитанной в предположении отсутствия застойных и вихревых зон. Время пребывания масла в таком баке, а следовательно, и эффективность выделения примесей соответственно уменьшаются. Для формирования надлежащей структуры потока в баке устанавливают дырчатые перегородки, уступы, сетки. Не всегда эти мероприятия оказываются эффективными [49].

Коэффициент гидравлического сопротивления сетки ζ зависит от ее геометрических параметров и числа Рейнольдса, вычисленного по характерному размеру сетки. Ввиду сложности задачи точное теоретическое определение коэффициентов гидравлического сопротивления пока не представляется возможным, и их значения могут быть найдены только опытным путем. Зависимость коэффициента сопротивления сеток от условий течения и их геометрических параметров экспериментально исследована в работе [46], в которой для определения коэффициента гидравлического сопротивления незагрязненной плетеной сетки из проволоки круглого поперечного сечения при малых числах $Re < 50$ рекомендуется следующее эмпирическое соотношение:

$$\zeta \approx \frac{22}{Re} + k''(1 - S) + \left(\frac{1}{S} - 1\right)^2. \quad (3.5)$$

Здесь Re – число Рейнольдса; k'' – коэффициент, определяющий состояние поверхности проволоки; S – коэффициент живого сечения сетки (таблица 3.2).

Соотношение (3.5) широко используется в инженерной практике для определения гидравлического сопротивления плетеных сеток.

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}, \quad (3.6)$$

где w – скорость потока в наиболее узком сечении, м/с; d – в задачах внешнего обтекания характерный линейный размер обтекаемого тела (диаметр проволоки), м; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Для сетки с $S=0,46$, $w=0,04$ м/с, $d=60 \cdot 10^{-4}$ м, $\nu=0,23 \cdot 10^{-4}$ м²/с (масло Тп-22с при 48°С) число Рейнольдса $Re=0,1$. Коэффициент гидравлического сопротивления вычисленный по соотношению (3.5) для проволоки с обычным состоянием поверхности ($k''=1,3$ [46]) $\zeta \approx 222$.

В последнее время в промышленной практике все больше применяются синтетические материалы: полиамидные (нейлон, капрон, амид) и др. Их свойства подробно описаны в [43, 50, 55]. Почти все синтетические ткани устойчивы к действию кислот и щелочей. Высокую температуру (выше 100°С) [12] выдерживают нитроновые, полиамидные, фторолоновые ткани. Характеристики латунных тканых проволочных сеток (ГОСТ 6613-86 [25]) и аналогичных сеток из полиамидных мононитей (ГОСТ 4403-91 [23]) приведены в таблице 3.2.

Регенерация фильтров, т.е. степень очистки загрязненных фильтров при прочих равных условиях определяется адгезией частиц загрязнений к очищаемой поверхности, чем она больше, тем труднее ее очистить. Целесообразность выбора тех или иных фильтрующих материалов обуславливается соотношением свойств частиц загрязнений жидкости и фильтрующей перегородки. От величины адгезии к частицам осадка зависит задерживающая способность перегородки. В непрерывно действующем фильтре осадок должен обладать минимальной адгезией к фильтрующему материалу. Это свойство поры перегородка-осадок определяется также физико-химическими свойствами этой поры, в частности, величиной поверхностного натяжения твердого тела σ [55]. Значение σ синтетических материалов для фильтровальных тканей в 1,4-33,0 раза меньше материала проволочных сеток чаще всего применяемых для очистки турбинного масла.

Таблица 3.2 – Характеристики латунных тканых проволочных сеток и аналогичных сеток из полиамидных монопоней

Номинальный размер стороны ячейки в свету, мкм	ГОСТ 6613-86 [25]. Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками из цветных металлов		ГОСТ 4403-91 [23]. Сетки тканые с квадратными ячейками из синтетических монопоней	
	Коэффициент живого сечения, %	Диаметр проволоки, мкм	Коэффициент живого сечения, %	Диаметр монопоней, мкм
99	–	–	44,0	50
100	39,1	60	38,5	60
140	37,0	90	44,5	71
142	–	–	54,6	50
157	–	–	52,3	60
160	37,9	100	45,5	80
180	36,0	120	46,0	60
200	39,1	120	–	–
212	–	–	41,0	120
224	42,4	120	42,5	120
250	45,6	120	46,0	120
265	–	–	43,0	150
280	44,4	140	–	–
300	–	–	46,5	150
315	44,0	160	44,0	150
355	47,0	160	47,5	150
390	–	–	47,0	180
400	51,0	160	–	–
450	47,9	200	48,0	200
500	44,4	250	49,5	200

Фильтрующий материал и правильный выбор размера ячеек фильтрующих сеток в каждой ступени фильтра грубой и тонкой очистки 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 [23]): номинальный размер ячеек 400-450 (+14-50) мкм – для фильтров грубой очистки и 200-250 (± 25) мкм – для грубой и тонкой очистки (рисунок 3.4). Производство таких сеток организовано в Российской Федерации.

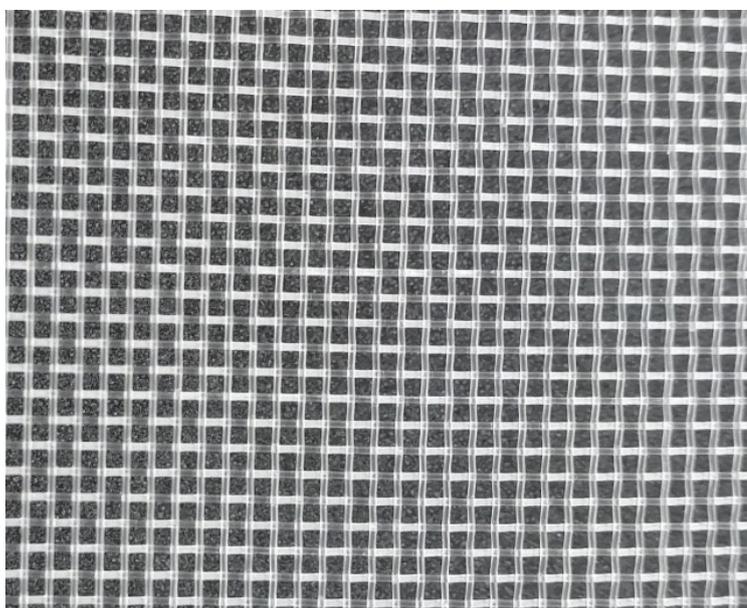


Рисунок 3.4 – Ткань из полиамидных мононитей

Подбор фильтрующих перегородок производится эмпирически [43, 83].

Окончательный выбор фильтрующих перегородок для конкретных условий эксплуатации систем маслоснабжения подшипников и регулирования паровых турбин сделан в результате исследований физико-химических свойств ткани из полиамидных мононитей, фильтрующих показателей и промышленных испытаний.

3.5. Модернизация фильтров ГМБ турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3

Штатные фильтры испытывались в условиях эксплуатации системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины Т-180/210 ЛМЗ. В качестве фильтрующих перегородок используются латунные тканые проволочные сетки с квадратными ячейками размером 700 и 250 мкм для фильтров грубой и тонкой очистки соответственно.

Данные счета твердых частиц проб масла приведены в таблице 3.3, обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц в масле – на рисунке 3.5.

Таблица 3.3 – Промышленная чистота турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ до и после модернизации фильтров ГМБ

Размер частиц, мм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, чистый отсек ГМБ	
	До модернизации фильтров ГМБ	После модернизации фильтров ГМБ
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 [31]	9	7

Промышленная чистота масла оценивалась по числу в пробе твердых частиц размерной группы 10-25 мкм, оказывающих основное влияние на снижение показателей надежности агрегатов гидросистем.

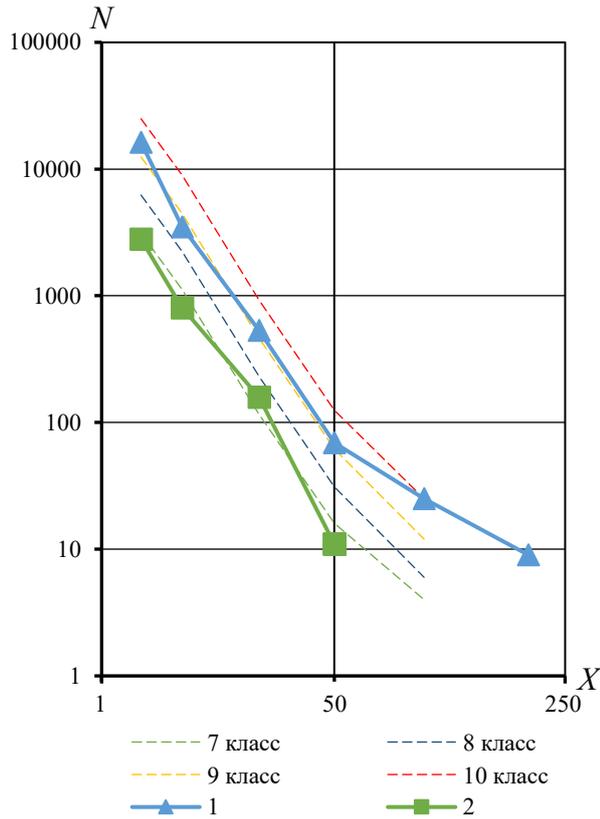


Рисунок 3.5 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ: 1 – фильтрат из чистого отсека ГМБ до модернизации фильтров; 2 – тоже – после модернизации фильтров; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

В опытах сравнивалась задерживающая способность фильтрующих перегородок фильтров ГМБ по отношению к мягким частицам (каплям воды) при фильтровании аэрированного, обводненного и загрязненного масла.

Данные счета капель эмульгированной воды проб масла из чистого отсека ГМБ в опытах при фильтровании обводненного масла фильтрами с перегородками из латунных сеток приведены в таблице 3.4.

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

Таблица 3.4 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ до и после модернизации фильтров ГМБ

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

Как уже упоминалось ранее, из-за трудности количественного определения и сочетания требований подбор фильтрующих перегородок производился опытным путем.

В двухступенчатом фильтре грубой очистки 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 фильтре тонкой очистки вместо латунной сетки с размером ячеек 250 мкм при модернизации установлена полиамидная ткань с теми же размерами ячеек.

Результаты сравнительных испытаний фильтров грубой и тонкой очистки с фильтрующими перегородками из полиамидной ткани в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ приведены в таблице 3.3 и 3.4. Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло, в чистом отсеке ГМБ после установки полиамидных сеток вместо латунных (модернизация фильтров ГМБ) приведены на рисунке 3.5.

После модернизации фильтров грубой и тонкой очистки количество твердых частиц в пробах из чистого отсека ГМБ с размерами более 5 мкм уменьшилось в 5,8 раза, чистота соответствует 7 классу ГОСТ 17216-2001 [31]. Количество капель эмульгированной воды в масле в пробах из чистого отсека ГМБ с размерами более 25 мкм уменьшилось в 4,7 раза.

Задерживающая способность фильтрующих перегородок из полиамидной ткани по отношению к мягким частицам при фильтровании обводненного масла значительно выше, чем латунных сеток.

Результаты сравнительных испытаний латунных сеток и полиамидной ткани в качестве фильтрующих перегородок в двухступенчатом фильтре грубой очистки приведены в таблице 3.5 и на рисунке 3.6.

Таблица 3.5 – Промышленная чистота турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ до и после модернизации фильтра грубой очистки

Размер частиц, мм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, чистый отсек ГМБ	
	До модернизации ФГО	После модернизации ФГО
5-10	12769	4424
10-25	2957	1134
25-50	464	199
50-100	44	13
100-200	16	1
>200	9	0
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	9	7-8

Заметим также, после модернизации фильтра грубой очистки масло стало чище в системе маслоснабжения турбоагрегата, а количество твердых загрязнений в нем (в чистом отсеке ГМБ) с размерами более 5 мкм уменьшилось в 2,8 раза и соответствует 7-8 классу ГОСТ 17216-2001 [31].

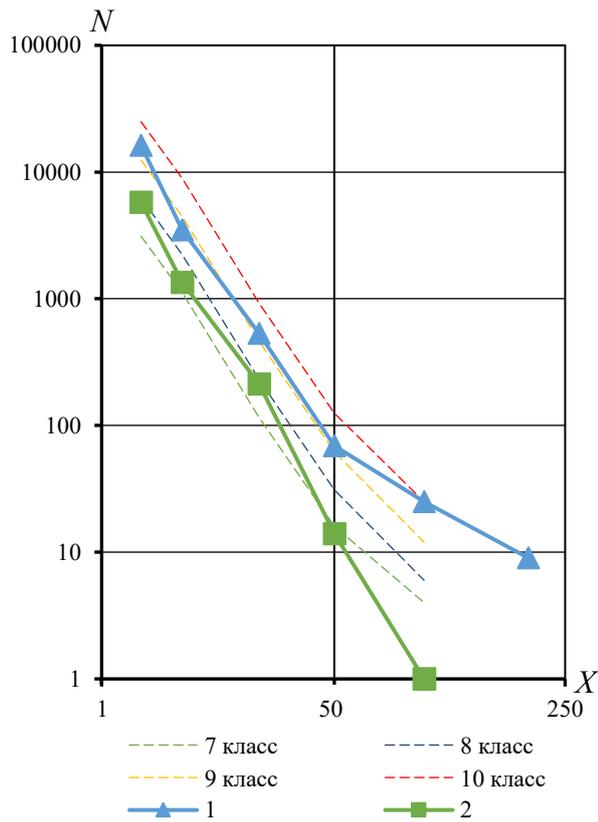


Рисунок 3.6 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ: 1 – фильтрат из чистого отсека ГМБ до модернизации ФГО; 2 – тоже – после модернизации ФГО; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

Данные об изменении загрязненности масла в различных точках системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины после замены во второй ступени двухступенчатого фильтра грубой очистки фильтрующей перегородки из полиамидной ткани с размерами ячеек 450 мкм на аналогичную с размерами – 250 мкм приведены в таблице 3.6, 3.7 и 3.8. Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло в пробах из системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины, показаны на рисунках 3.7 и 3.8.

Таблица 3.6 – Промышленная чистота турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ до и после замены фильтрующей перегородки второй ступени ФГО

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, место отбора проб			
	До замены 2-ой ступени ФГО		После замены 2-ой ступени ФГО	
	МО № 1	Чистый отсек ГМБ	МО № 1	Чистый отсек ГМБ
5-10	2266	2534	1599	2447
10-25	984	913	504	791
25-50	247	210	86	135
50-100	13	12	9	9
100-200	1	1	1	1
>200	0	1	1	0
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	7	7	6	7

Таблица 3.7 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ до замены фильтрующей перегородки второй ступени ФГО

Размер капель воды, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла, место отбора проб					
	МО № 2	Чистый отсек ГМБ	КП № 1	КП № 2	КП № 3	КП № 4
5-10	8117	4976	64276	28041	965	1025
10-25	4612	3156	29173	10037	630	831
25-50	1080	411	3135	984	136	226
50-100	17	1	26	8	0	10
100-200	1	1	1	1	0	0
>200	1	0	0	0	0	1
Капель воды >5 мкм	13828	8545	96611	39071	1731	2093

Таблица 3.8 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ после замены фильтрующей перегородки второй ступени ФГО

Размер капель воды, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла, место отбора проб						
	МО № 1	МО № 2	Чистый отсек ГМБ	КП № 1	КП № 2	КП № 3	КП № 4
5-10	209	1230	1274	12196	3307	1363	2201
10-25	270	1317	916	7256	2418	683	1239
25-50	85	415	182	971	806	105	141
50-100	3	8	5	12	75	2	7
100-200	0	0	0	2	3	0	1
>200	0	0	0	0	2	0	0
Капель воды >5 мкм	567	2970	2377	20437	6611	2153	3589

После замены фильтрующей перегородки во второй ступени фильтра грубой очистки масло стало чище в системе маслоснабжения, а количество твердых частиц в нем с размерами более 5 мкм уменьшилось в пределах от 1,1 до 2,1 раза и соответствует 7 классу промышленной чистоты ГОСТ 17216-2001 [31].

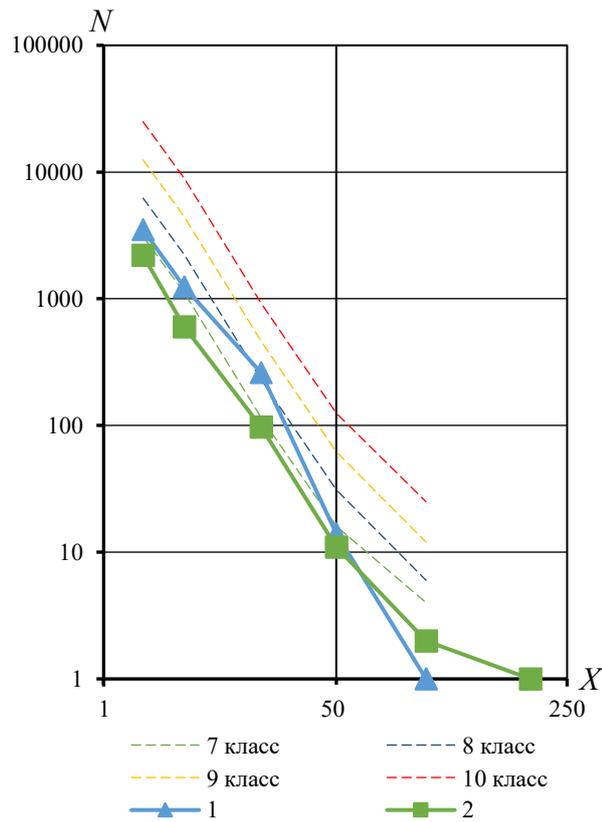


Рисунок 3.7 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ (МО № 1): 1 – до замены фильтрующей перегородки второй ступени ФГО; 2 – тоже – после замены; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

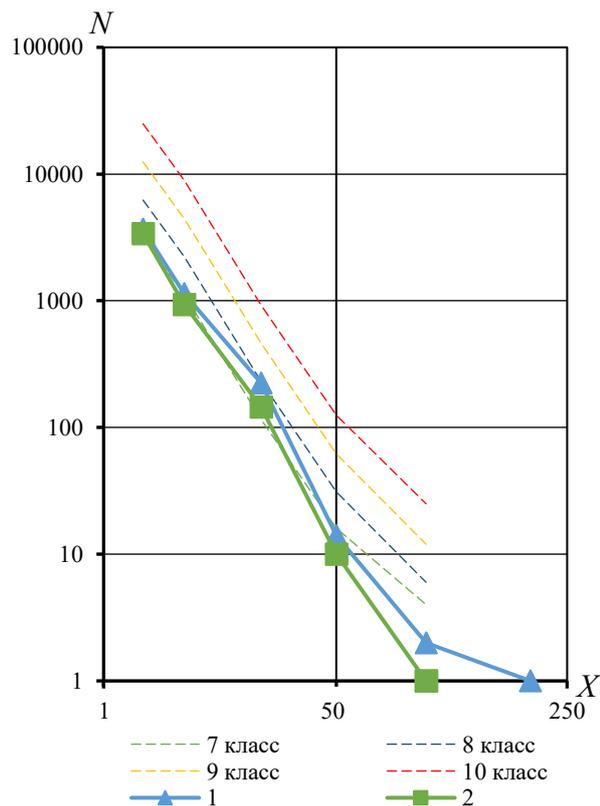


Рисунок 3.8 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ (чистый отсек ГМБ): 1 – до замены фильтрующей перегородки второй ступени ФГО; 2 – тоже – после замены; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

В процессе эксплуатации масляной системы определялась также эффективность регенерации фильтров с фильтрующей перегородкой из полиамидной ткани. Загрязненный фильтр из полиамидной ткани до и после продувки сжатым воздухом показан на рисунках 3.9, 3.10 и 3.11.

Эффективность регенерации фильтрующих сеток из полиамидного материала выше, чем латунных.

Наблюдения показали: фильтры удерживают определенное количество прилипших загрязнений в виде слоя (рисунок 3.9), который легко удаляется (продувкой загрязненной сетки сжатым воздухом) при фильтровании сухого масла,

а при фильтровании обводненного – он уходит с них в отстой ГМБ [96]. По мере накопления его возникает опасность повторного загрязнения масла.



Рисунок 3.9 – Загрязненный фильтр с фильтрующей перегородкой из полиамидной ткани



Рисунок 3.10 – Фильтр с фильтрующей перегородкой из полиамидной ткани после продувки сжатым воздухом



Рисунок 3.11 – Очистка загрязненного фильтра с фильтрующей перегородкой из полиамидной ткани струей сжатого воздуха

Окончательный выбор фильтрующих перегородок для конкретных условий эксплуатации систем маслоснабжения подшипников и регулирования паровых турбин сделан в результате исследований физико-химических свойств ткани из полиамидных мононитей, фильтрующих показателей и промышленных испытаний.

Он удовлетворяет следующим основным требованиям:

1. Обеспечивает чистоту масла 7-8 класс ГОСТ 17216-2001 [31] в чистом отсеке ГМБ;
2. Механическая прочность полиамидной сетки выше латунной (разрывная нагрузка полоски ткани 50×200 мм не менее 83 и 115 кгс для фильтров тонкой и грубой очистки соответственно);
3. Не оказывает отрицательного влияния на физико-химические свойства масла, не загрязняет его в процессе эксплуатации;
4. Обладает способностью к многократной регенерации (при очистке струей сжатого воздуха);
5. Гидравлическое сопротивление полиамидной сетки меньше, чем латунной при расчетной удельной пропускной способности в 3-4 раза;
6. Обладает свойствами необходимыми для эффективного удаления капель эмульгированной воды из масла при фильтровании;

7. Ресурс и срок службы выше, чем у латунной сетки;
8. Имеет хорошие конструктивные характеристики, легко подвергается обработке, соединению, герметизации и другим операциям при изготовлении фильтров ГМБ;
9. Имеет хорошие экономические показатели. Дешевле латунной и нержавеющей сеток, а также зарубежных аналогов.

Следует заметить, что аналитическая зависимость на рисунке 2.18 подтверждается практикой, из которой следует, что эффективно работающие фильтры ($\varphi_i=0,8$) в системе маслоснабжения подшипников и регулирования паровых турбин не обеспечивают чистоту масла 7-8 класс ГОСТ 17216-2001 [31], если поступление твердых частиц загрязнений 10-25 мкм N_i в каждые 100 мл жидкости более 10^4 (чаще всего при повышенном износе подшипников, а также низком качестве масла, ремонта и т.д.).

При эксплуатации турбины после ремонта, когда чистота масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования была ниже 7-8 класса (ГОСТ 17216-2001 [31]) чувствительность системы регулирования несколько снизилась (увеличилось время срабатывания золотников системы регулирования).

3.6. Модернизация фильтров ГМБ турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ на Южноуральской ГРЭС

Штатные фильтры испытывались в условиях эксплуатации системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины К-200-130 ЛМЗ. В качестве фильтрующих перегородок используются латунные тканые проволочные сетки с квадратными ячейками размером 700 и 250 мкм для фильтров грубой и тонкой очистки соответственно.

Данные загрязнений проб масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины представлены в таблице 3.9 и 3.10, обобщенные

результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло в чистом отсеке ГМБ – на рисунке 3.12.

Таблица 3.9 – 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 и ФТО	После замены 2-ой ступени 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 [31]	9-10	8	7-8

Таблица 3.10 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-200-130 ЛМЗ до и после модернизации фильтров ГМБ

Размер капель воды, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла, чистый отсек ГМБ	
	До модернизации	После модернизации
25-50	126096	29565
50-100	2367	690
100-200	50	98
>200	0	9
Капель воды >25 мкм	128513	30362

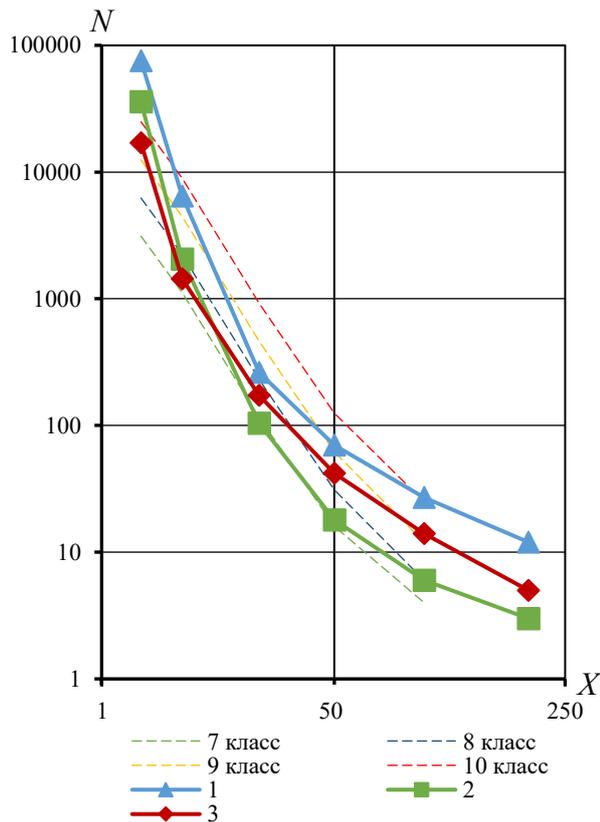


Рисунок 3.12 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ: 1 – фильтрат из чистого отсека ГМБ до модернизации ФГО и ФТО; 2 – тоже – после модернизации ФГО и ФТО; 3 – тоже – после замены 2-ой ступени ФТО; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

Уровень чистоты масла 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 фильтре грубой очистки вместо латунной тканой проволочной сетки с размером ячеек 700 мкм (предусмотренной техническими требованиями завода-изготовителя) установлена при модернизации ткань из полиамидных мононитей с номинальным размером ячеек 400 мкм. В

двухступенчатом фильтре тонкой очистки вместо полиамидной сетки с размером ячеек 250 мкм во второй ступени фильтра установлена при модернизации ткань из полиамидных мононитей с номинальным размером ячеек 100 мкм.

Результаты сравнительных испытаний фильтров ГМБ с фильтрующими перегородками из полиамидной ткани в системе маслоснабжения подшипников и регулирования приведены в таблице 3.9 и 3.10. Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло в чистом отсеке ГМБ, после установки полиамидных сеток вместо латунных (модернизации фильтров ГМБ) приведены на рисунке 3.12.

После модернизации фильтров ГМБ масло стало чище, а количество твердых частиц в нем (в чистом отсеке ГМБ) с размерами более 5 мкм уменьшилось в 4,5 раза; промышленная чистота соответствует 7-8 классу ГОСТ 17216-2001. Количество капель эмульгированной воды в масле с размерами более 25 мкм уменьшилось в 4,2 раза.

После замены 2-ой ступени ФТО масло стало чище в системе маслоснабжения подшипников и регулирования, а количество твердых загрязнений в нем (в чистом отсеке ГМБ) с размерами более 5 мкм уменьшилось в 2,1 раза.

3.7. Модернизация фильтров ГМБ турбоагрегата ПТ-60-130 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-2

Штатные фильтры грубой и тонкой очистки испытывались в условиях эксплуатации системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины ПТ-60-130 ЛМЗ. В качестве фильтрующих перегородок в них используют латунные тканые проволочные сетки.

Данные счета частиц твердых загрязнений проб масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата (чистый отсек ГМБ) и в системе доливок его приведены в таблице 3.11, а обобщенные результаты

измерений размеров и подсчета количества частиц, загрязняющих масло показаны на рисунке 3.13.

Таблица 3.11 – Промышленная чистота турбинного масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата ПТ-60-130 ЛМЗ до модернизации фильтров

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла	
	Чистый отсек ГМБ	Масло на доливку
5-10	5656	–
10-25	1724	1033365
25-50	256	239544
50-100	28	7531
100-200	8	710
>200	16	313
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	8	17

Твердых загрязнений в масле доливок больше, чем в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины в 506 раз. Очевидна причина отказов регулирования турбины после доливок масла в систему для возмещения безвозвратных потерь его – недопустимая загрязненность масла (17 класс ГОСТ 17216-2001 [31]).

В результате ревизии фильтров турбоагрегата ПТ-60-130 ЛМЗ установлено: в двухступенчатом фильтре грубой очистки масла вместо латунной тканой проволочной сетки с размерами ячеек 700 мкм, предусмотренных техническими требованиями завода-изготовителя, установлена сетка с размерами ячеек 250 мкм. Положительный опыт эксплуатации упомянутой сетки служит основанием для такой замены, поскольку чистота масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата соответствует 8 классу ГОСТ 17216-2001 [31].

В двухступенчатых фильтрах грубой и тонкой очистки вместо латунной тканой проволочной сетки с размерами ячеек 250 мкм установлена при

модернизации ткань из полиамидных моноплетей с номинальным размером ячеек 250 мкм.

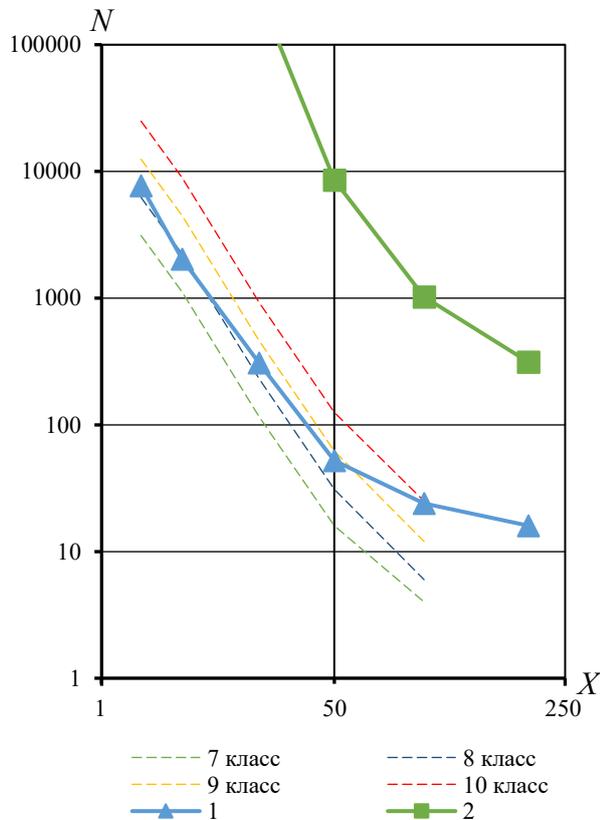


Рисунок 3.13 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата ПТ-60-130 ЛМЗ: 1 – фильтрат из чистого отсека ГМБ до модернизации фильтров; 2 – масло на доливку; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

Результаты сравнительных испытаний фильтров ГМБ с фильтрующими перегородками из полиамидной ткани в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины приведены в таблице 3.12. Здесь же данные загрязненности свежего масла из емкости маслохозяйства. Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло, в пробах из МО № 1 и 2 до и после установки полиамидных сеток вместо латунных

(модернизации фильтров грубой и тонкой очистки) и из емкости маслохозяйства показаны на рисунках 3.14 и 3.15.

Таблица 3.12 – Промышленная чистота турбинного масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата ПТ-60-130 ЛМЗ до и после модернизации фильтров

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, место отбора проб						
	До модернизации фильтров		После модернизации ФГО		После модернизации ФТО		Свежее масло из емкости маслохозяйства
	МО № 1	МО № 2	МО № 1	МО № 2	МО № 1	МО № 2	
5-10	9257	8099	7317	4646	6053	3580	78362
10-25	3547	2838	2030	1189	1521	671	31883
25-50	609	485	265	247	230	68	3413
50-100	53	34	18	20	13	6	204
100-200	20	11	2	2	4	1	24
>200	14	4	2	1	6	2	16
Класс чистоты ГОСТ 17216-2011 [31]	8-9	8-9	8	7-8	7-8	6-7	12

После модернизации фильтров грубой, а затем тонкой очистки масло стало чище в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины, а количество твердых частиц в нем (в пробах из МО) с размерами более 5 мкм уменьшилось в первом случае в 1,4 и 1,9 раза, во втором – в 1,7 и 2,7 раза; промышленная чистота соответствует 6-7 классу ГОСТ 17216-2001 [31].

Результаты исследований, изложенные в этой главе, опубликованы в [61–64].

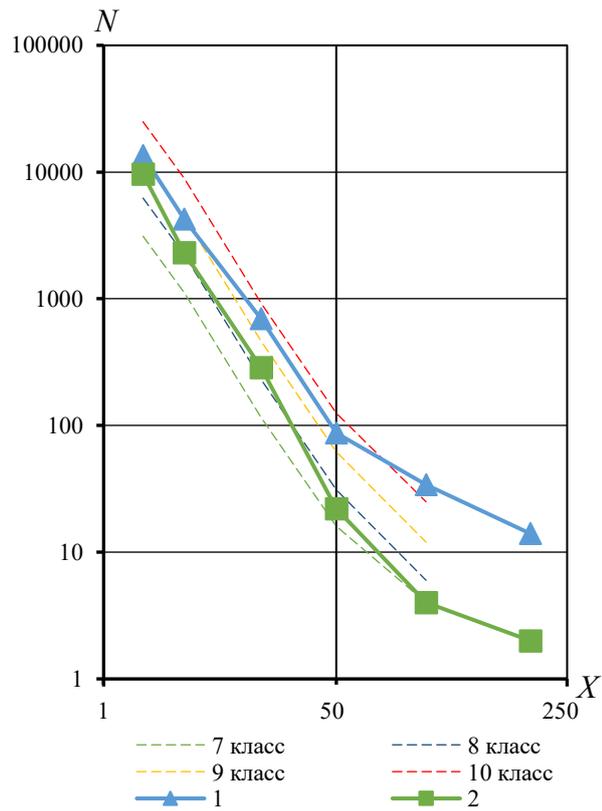


Рисунок 3.14 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата ПТ-60-130 ЛМЗ: 1 – до модернизации ФГО; 2 – после модернизации ФГО; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

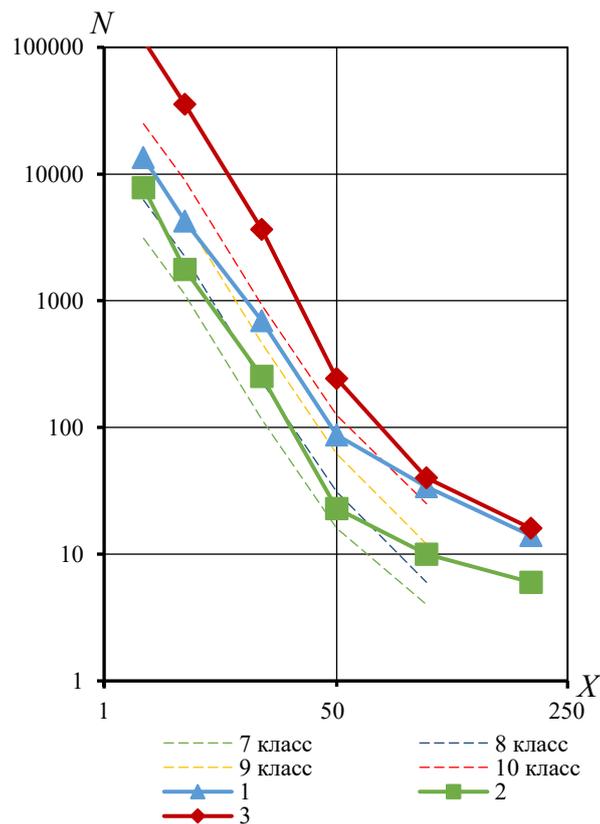


Рисунок 3.15 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата ПТ-60-130 ЛМЗ: 1 – до модернизации фильтров; 2 – после модернизации ФГО и ФТО; 3 – свежее масло из емкости маслохозяйства; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

3.8. Рекомендации по нормированию промышленной чистоты турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов и содержания воды

В опорном подшипнике образуется масляный клин, обеспечивающий разделение и поддерживающий масляную пленку между ротором и подшипником. Исследование смазки опорных подшипников показало, что минимальная толщина пленки определяется размером подшипника, скоростью вращения, нагрузкой и вязкостью масла [131].

Важно учитывать размер частиц и уровень чистоты жидкости, необходимый для надежной работы подшипника скольжения. Повышение чистоты рабочей жидкости необходимо для снижения износа и может быть достигнуто путем внедрения высокоэффективного фильтрования в системах смазки.

Когда турбина работает на нормальной рабочей скорости, минимальная толщина масляной пленки между ротором турбины и поверхностями подшипников составляет порядка 50 мкм для диаметров цапф от 200 до 400 мм. Минимальная толщина пленки увеличивается до 250 мкм для самых больших опорных подшипников диаметром 760 мм. Однако, когда турбина находится на валоповоротном механизме, толщина масляной пленки в лучшем случае составляет всего несколько микрон.

Теоретический анализ показывает, что для подшипников диаметром до 200 мм при нормальных условиях эксплуатации образуется гидродинамическая пленка толщиной до 20 мкм. Поскольку толщина пленки зависит от вязкости жидкости, при повышении температуры жидкости толщина пленки для некоторых смазочных материалов может уменьшаться на 20%. Эмпирические результаты показывают, что фактическая толщина пленки составляет примерно 10 мкм [129].

Существует прямая зависимость между минимальной толщиной пленки и размером наиболее разрушительных частиц. Абразивный износ возникает, когда частицы попадают в зазор между двумя поверхностями, находящимися под нагрузкой. Это приводит к разрушению поверхностей и образованию новых частиц износа.

Максимальная скорость износа наблюдается, когда соотношение толщины пленки к размеру частиц равно единице. Меньший износ происходит от частиц размером, как больших, так и меньших, чем толщина масляной пленки [129].

Требование к чистоте масла в [7] основывается на количестве твердых частиц размерной группы 10-25 мкм, оказывающих основное влияние на снижение показателей надежности агрегатов гидросистем.

Фильтрование играет ключевую роль в снижении скорости износа подшипников. Таким образом, повышение эффективности фильтрования может

значительно снизить скорость износа. Требования к очистке наиболее важны при вводе в эксплуатацию турбин, а также когда оборудование вращается на низких оборотах. Именно в это время гидродинамическая пленка наиболее тонкая.

Кроме того, перед вводом машины в эксплуатацию рекомендуется промыть систему, чтобы обеспечить максимальную защиту от абразивного износа в критических условиях запуска.

Первым шагом в определении нормы чистоты для системы является определение наиболее критичного узла. Необходимо поддерживать уровень чистоты рабочей жидкости для надежной работы наиболее чувствительных элементов гидросистемы. В противном случае они должны быть защищены дополнительными фильтрами.

Если существует сочетание следующих факторов, то уровень чистоты устанавливается на один класс выше: если узел является ответственным за безопасность или общую надежность системы; частые холодные пуски; избыточная ударная нагрузка или вибрация; другие тяжелые эксплуатационные условия.

В исследованиях [58], проведенных на электростанциях с высоким уровнем эксплуатации, чистота масла в системах смазки турбин (в чистом отсеке ГМБ) соответствует 10 классу ГОСТ 17216-2001 [31].

Американская фирма HIAC, собравшая и обобщившая данные о чистоте турбинного масла 85 объектов в восьми странах (США, Канада, Япония, Австрия, Великобритания, Швеция, Франция, ФРГ), рекомендует для систем смазки турбин класс NAS-5 (соответствует уровню 8-9 классов ГОСТ 17216-2001[31]) [15].

Гидравлические системы с такими компонентами, как сервоприводы, подвергаются гораздо большему риску выхода из строя из-за загрязнения рабочей жидкости, чем системы смазки. Поэтому для совмещенных систем маслоснабжения подшипников и регулирования турбин показатели чистоты имеют более жесткие требования. Гидравлическое масло должно быть в 2-4 раза чище, чем смазочное. Например, нормативный уровень чистоты для гидравлических систем может составлять 15/12/10 ISO 4406 (7-8 класс ГОСТ 17216-2001) [31], что

будет намного выше, чем для смазывания подшипников – 17/14/12 ISO 4406 (9-10 класс ГОСТ 17216-2001[31]) [145].

Рекомендации некоторых зарубежных производителей паровых турбин – 16/13 ISO 4406 (11 класс ГОСТ 17216-2001) [31], в то время как другие рекомендуют более высокую чистоту 14/11 ISO 4406 (9 класс ГОСТ 17216-2001) [31]. Значительного повышения надежности и срока службы оборудования можно добиться, установив нормативные значения чистоты выше, чем рекомендованные производителем. Например, повышение чистоты с 16/13 ISO 4406 [31] до 14/11 ISO 4406 [31] позволит продлить срок службы в 1,5 раза [138, 139, 141].

С помощью калькулятора, разработанного компанией Noria Corporation, доступного на веб-сайте Machinery Lubrication, рекомендуемая норма чистоты масла для паровых турбин 14/11/9 ISO 4406 (7-8 класс ГОСТ 17216-2001) [31], а также для рабочей жидкости в системе электрогидравлического управления (ЕНС) [141].

Опыт эксплуатации летательных аппаратов показал [94], что уровень надежности, например, гидросистем управления достижим при уровне загрязненности соответствующем 7-8 классам чистоты по ГОСТ 17216-2001 [31].

Наблюдения показали, при эксплуатации турбины Т-180/210 ЛМЗ после ремонта, когда чистота масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования была ниже 7-8 класса (ГОСТ 17216-2001 [31]) чувствительность системы регулирования несколько снизилась (увеличилось время срабатывания золотников системы регулирования).

В результате исследования и обобщения данных о чистоте масла – рекомендуется для совмещенных систем маслоснабжения подшипников и регулирования турбин (в чистом отсеке ГМБ) 7-8 класс ГОСТ 17216-2001 [31].

Попадание воды в масло – распространенное явление при эксплуатации паровых турбин.

Вода значительно ухудшает эксплуатационные свойства смазочных масел – стабильность, коррозионную активность, смазывающую способность и др. [84, 95, 121, 124, 126].

Источниками обводнения масла могут быть в системе регулирования, например, неплотные сильфоны регуляторов давления отборного пара и, главным образом, в системе смазывания – МО и концевые уплотнения турбины.

Степень ухудшения эксплуатационных свойств масла зависит от агрегатного состояния воды в масле. Вода может присутствовать в виде растворенной и (или) свободной. Общеизвестно, что свободная вода представляет главную причину проблем, связанных с загрязнением водой.

В ряде случаев турбинные масла при обводнении образуют стойкие эмульсии. Повышенная вязкость эмульсии может ухудшить условия транспортировки масла по трубопроводам, спровоцировать вибрацию валопровода и т.д. [42, 49].

Вода в масле ухудшает смазочные свойства его в условиях граничной смазки; усугубляет эрозионный износ, окисление масла и баббита, ржавление смазываемых деталей. В подшипнике, при режиме граничной смазки, из обводненного масла выделяется водород, повышающий пожарную опасность системы [72].

При неизменных температуре и влажности окружающего воздуха нагрев масла сопровождается интенсивным удалением влаги из него.

Для систем, работающих на обводненном масле, характерны частые доливки свежего масла. Периодический слив воды, отстоявшейся в ГМБ, всегда сопровождается потерями масла.

Наблюдения показали, что при фильтровании обводненного масла прочность латунных сеток и коррозионная стойкость недостаточны. Продукты окисления масла (в особенности низкомолекулярные кислоты) растворяют цветные металлы сеток фильтров ГМБ [69]. В свою очередь цветные металлы и продукты коррозии являются катализаторами окислительных процессов в масле.

Ключевым моментом в борьбе с обводнением масла является определение источника попадания воды и (или) водяного пара в систему. Часто масло обводняется из-за несовершенства схемы канализации парового потока в концевых уплотнениях турбины. Влага попадает в систему смазывания из-за истирания гребней концевых уплотнений, коробления и раскрытия горизонтального разъема

цилиндра и каминной камеры, нарушения плотности сильфонов регуляторов давления отборного пара, разгерметизации трубной системы МО, эксплуатируемых с превышением давления воды над давлением масла.

Проникновение воды трудно полностью предотвратить, но несложный ремонт и замена износившихся деталей позволяют значительно снизить обводнение масла.

Обычно влажность в нефтяных или синтетических рабочих жидкостях указывается как абсолютное содержание воды, включающее свободную и растворенную воду, а также воду в виде эмульсии. Это значение обычно выражается в процентах или частях на миллион (ppm) по массе (ppmw) или по объему (ppmv). В большинстве случаев применения жидкостей допускается определенная степень загрязнения водой, которая зависит от типа жидкости, после чего воздействие воды становится чрезмерно вредным. Например, 200 ppmw воды в жидкости на основе фосфорных эфиров будет считаться отличным показателем. Однако такое же количество воды в диэлектрической жидкости будет совершенно неприемлемым, что приведет к появлению свободной воды и потере диэлектрической прочности. Разница между тем, что приемлемо для одной жидкости и неприемлемо для другой, связана с точкой насыщения водой каждой конкретной жидкости, т.е. максимальным количеством воды, которое может быть поглощено до того, как произойдет разделение фаз и в жидкости образуется свободная вода (обычно в виде капель). Эта информация редко поступает от производителя жидкости, и даже если она доступна, то для оценки серьезности проблемы необходимо соотнести уровень воды, измеренный в ppmw, с точкой насыщения [120].

Кроме того, точка насыщения смазочной или изоляционной жидкости может изменяться под воздействием ряда факторов, включая истощение/деградацию присадок, старение жидкости (окисление, полимеризация/деполимеризация и т.д.) и перекрестное загрязнение другими маслами или жидкостями. Поэтому сравнение измеренного уровня воды в ppmw с точкой насыщения новой жидкости в лучшем случае имеет ограниченное применение. На рисунке 3.15 представлены данные для

различных жидкостей, используемых в оборудовании, чтобы проиллюстрировать, что точка насыщения варьируется между различными жидкостями и в зависимости от температуры для одной и той же жидкости (кривые используются только в качестве примера).

Более удобный и содержательный метод, информирующий о содержании воды – выразить его в процентах от точки насыщения.

В то время как 200 ppmw будут представлять собой менее 10% насыщения для типичного промышленного эфира ортофосфорной кислоты, потребуется всего лишь 3 ppmw, чтобы соответствовать насыщению 10% для изолирующей жидкости при низких температурах окружающей среды.

Дополнительным преимуществом использования процента насыщения является то, что, в отличие от измерений в ppmw, оно привязано к точке насыщения, и любое изменение точки насыщения отражается изменением процента насыщения. Фактическую точку насыщения знать не обязательно. С другой стороны, измерения ppmw требуют знания фактической точки насыщения (в ppmw), чтобы оценить степень загрязнения водой.

Как показано на рисунке 3.16, точка насыщения также будет меняться с температурой, так как растворимость воды будет увеличиваться с повышением температуры рабочей жидкости. Из этого следует, что для определенного содержания влаги (ppmw) жидкость может быть близка к насыщению или превышать его при низких температурах, тогда как при более высоких температурах процент насыщения может снизиться до приемлемого уровня. Таким образом, даже без каких-либо знаний о фактическом содержании влаги в жидкости, оценка потенциальных проблем может быть сделана после того, как известны процент насыщения и температура [120].

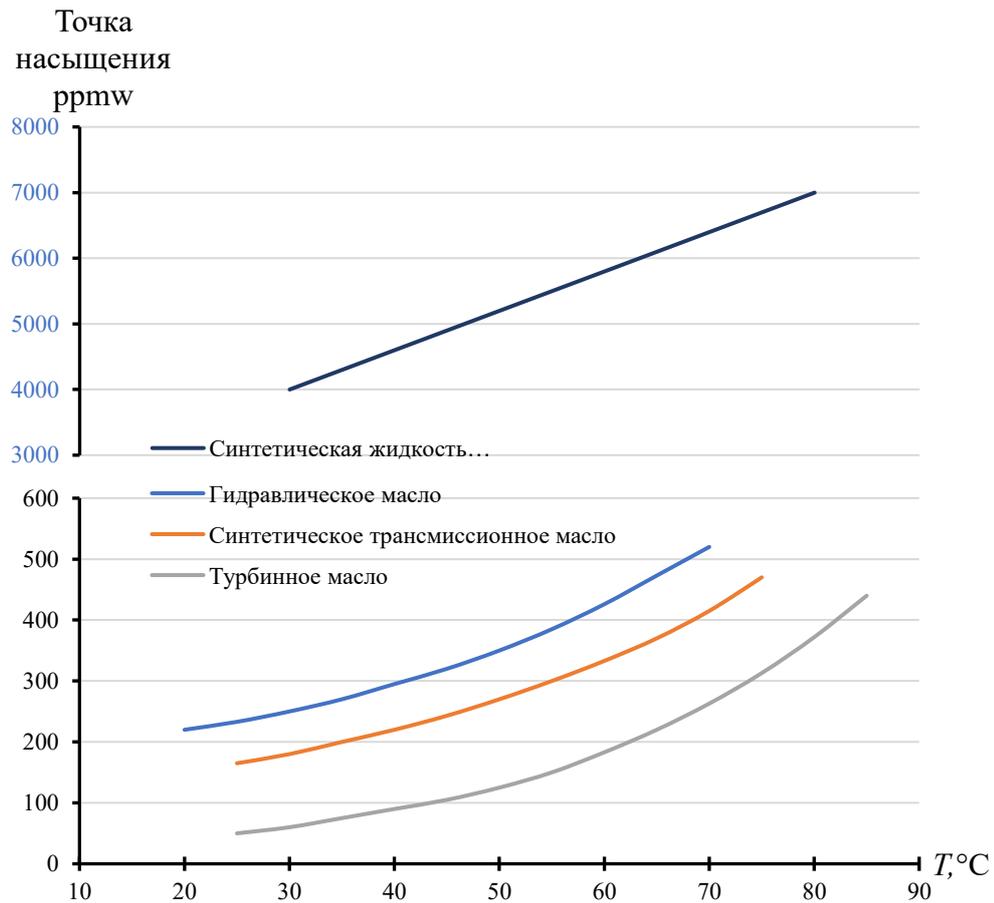


Рисунок 3.16 – Зависимость точки насыщения от температуры для различных рабочих жидкостей [120]

Рисунок 3.17 иллюстрирует зависимость между процентом насыщения и ppmw в зависимости от температуры для типичной гидравлической жидкости в системе. Жидкость в этом примере содержит 200 ppmw воды. При запуске системы температура жидкости составляет 15°C, что соответствует насыщению 80%. По мере того, как жидкость нагревается, процент насыщения снижается до значения 40% при 50°C. Однако, когда содержание воды в жидкости измеряется в том же температурном диапазоне с использованием титрования по Карлу Фишеру, результаты остаются неизменными и составляют 200 ppmw. Поэтому процент насыщения является более значимым и релевантным показателем загрязненности водой.

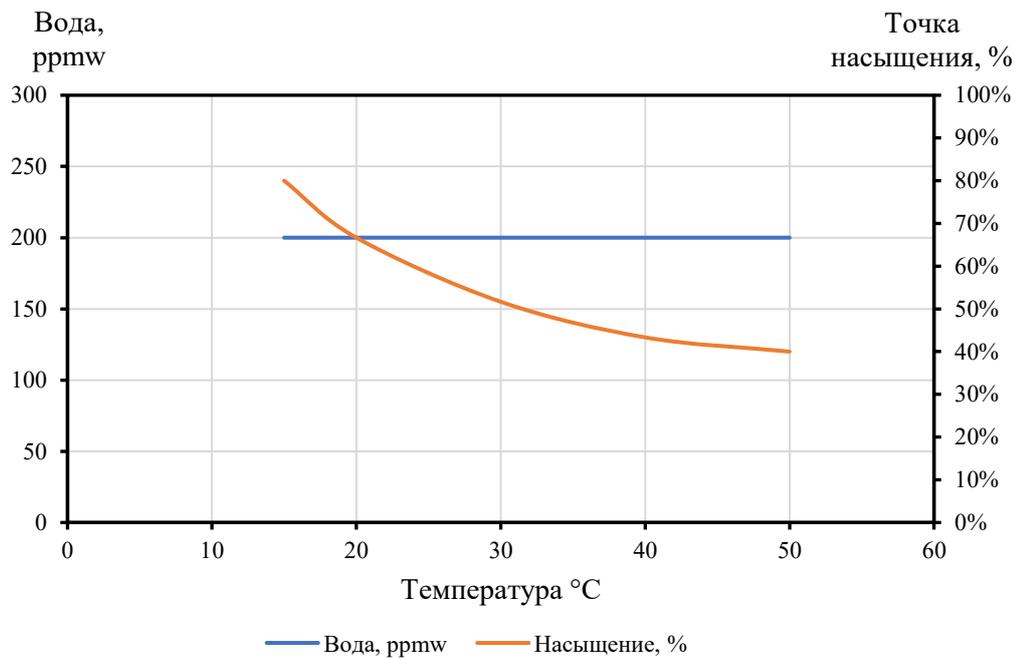


Рисунок 3.17 – Процент насыщения и ppmw для гидравлической жидкости в зависимости от температуры [120]

Норма содержания воды в масле во многом аналогична показателям промышленной чистоты. С помощью калькулятора, разработанного компанией Noria Corporation, доступного на веб-сайте Machinery Lubrication, рекомендуемая норма содержания воды в масле паровых турбин не более 0,005% [141].

По данным компании Ametek Spectro Scientific для большинства оборудования уровень загрязнения водой не должен превышать 0,25%, а для систем смазки турбин и систем управления – не более 0,01% [143].

В соответствии со стандартом организации СТО 70238424.27.100.053-2013 «Энергетические масла и маслохозяйства электрических станций и сетей. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования» (Приказ НП «ИНВЭЛ» от 12.02.2013 № 05), разработанным ОАО «Фирма ОРГРЭС» и ОАО «ВТИ», норма промышленной чистоты турбинного масла для совмещенных систем маслоснабжения подшипников и регулирования турбин 10 класс ГОСТ 17216-2001 [31], а содержание воды не более 0,03% [93].

ГЛАВА 4. ПОИСК ИСТОЧНИКОВ ПОВЫШЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТУРБИННОГО МАСЛА (МАСЛОДИАГНОСТИКА)

4.1. Общие сведения и теоретические основы маслодиагностики

Бесспорно то, что загрязнения рабочих жидкостей гидросистем сокращают срок службы оборудования.

Чем выше концентрация загрязнений в жидкости, тем больше силы трения плунжерных пар гидрооборудования [10, 59].

Считается, что износ пар трения гидрооборудования вызывается твердыми частицами, размер которых соизмерим с зазорами этих пар, и что частицы, размером меньше величины зазоров, проходят через эти зазоры, не вызывая износа. Однако, абразивные частицы размером больше толщины масляной пленки тоже повышают износ. Большое количество таких загрязнений образуют абразивную среду в рабочей жидкости гидросистемы, которая, проходя с большими скоростями через зазоры трущихся пар, вызывает их интенсивный износ [101, 102, 122, 129].

Подшипники турбин предназначены для жидкостной смазки. Большинство подшипников с жидкостной пленкой предназначены для гидродинамической смазки. Это означает, что в гидродинамическом подшипнике образуется масляный клин, обеспечивающий разделение и поддерживающий масляную пленку между ротором и подшипником.

Толщина пленки зависит от скорости ротора, нагрузки и вязкости масла. В условиях жидкой пленки увеличение вязкости или скорости увеличивает толщину масляной пленки, а увеличение нагрузки или уменьшение скорости ротора уменьшает ее толщину.

При образовании масляной пленки геометрия опорной поверхности и поверхность ротора так же важны, как скорость ротора, нагрузка и вязкость масла.

Чтобы между поверхностями образовался устойчивый масляный клин и пленка жидкости, профили ротора и подшипника должны быть перпендикулярны.

По результатам проведенных исследований [67] можно утверждать, что загрязнения рабочих жидкостей оказывают негативное влияние на все их свойства, а в особенности на вязкость, что приводит к ухудшению ее состояния и снижению надежности оборудования. Вязкость рабочей жидкости увеличивается из-за нарушения состава масляной пленки на поверхностях трения. Частицы загрязнений нарушают стабильность пленки, вследствие чего химические реакции окисления и коррозии протекают более интенсивно. Из-за низкой вязкости уменьшается толщина и равномерность смазывающей пленки, что приводит к повышенному износу поверхностей трения гидравлического оборудования. Из чего можно заключить, повышенная загрязненность рабочих жидкостей кроме ухудшения вязкости снижает их противоизносные, антиокислительные и антикоррозионные свойства [51].

По некоторым данным мелкие частицы могут нарушить молекулярную структуру масла, что приводит к потере вязкости. Пониженная вязкость ухудшает способность смазочного материала образовывать защитную пленку между движущимися деталями, что приводит к увеличению износа [119].

Если одна или обе поверхности повреждаются частицами загрязнений, проходящими через подшипник, способность образовывать масляный клин снижается, что приводит к уменьшению толщины масляной пленки. Уменьшение толщины масляной пленки увеличивает вероятность дополнительных повреждений или трения во время выбега или запуска.

Когда ротор турбины находится в нормальных условиях эксплуатации, подшипник находится в условиях гидродинамической смазки. Однако, когда ротор вращается на низких скоростях, опорный подшипник находится в условиях граничной смазки. На эти условия обычно указывает повышенный износ. Также могут быть достигнуты очень высокие коэффициенты трения. В этот момент толщина масляной пленки между подшипником и ротором турбины будет минимальной.

Если поверхность становится более шероховатой, то увеличивается риск контакта ротора и опорной поверхности. Эта связь между шероховатостью поверхности и толщиной пленки важна при рассмотрении гидродинамической смазки подшипника турбины.

Поврежденные поверхности могут стать причиной выхода из строя подшипника во время запуска или работы на малых скоростях до того, как появится полностью развитая гидродинамическая пленка нормальной толщины.

Во время запуска установки, когда турбина находится на валоповоротном механизме или на низких скоростях, система смазки будет подавать загрязненное масло на опорные и опорно-упорные подшипники. Это особенно вредно для подшипников скольжения, поскольку на них действуют высокие нагрузки, которые заставляют шейки соприкасаться с поверхностью подшипника, создавая тем самым очень тонкую масляную пленку. Эта форма смазки известна как граничная смазка. Поскольку между шейкой и поверхностью подшипника существует только очень тонкая масляная пленка, а многие частицы в масле превышают толщину этой пленки, на поверхности подшипника могут образоваться царапины, поскольку частицы застревают в поверхности баббита. В некоторых случаях частицы могут повредить шейку, что потребует ее повторной обработки и (или) хонингования [129].

Продукты износа являются важным ранним признаком отказа машины. Большинство технологий мониторинга состояния и стратегий профилактического обслуживания сосредоточены на скорейшем обнаружении признаков неисправности. В конечном итоге, частицы износа являются прямым результатом износа поверхностей, как правило, в результате фрикционных взаимодействий. Не следует недооценивать серьезность и безотлагательность проблем, связанных с продуктами износа и, если их быстро обнаружить и принять правильные меры, прогрессирование неисправностей можно замедлить и отсрочить отказ оборудования.

Хотя причин отказа может быть много, проведенные исследования показали, что загрязнение рабочей жидкости является наиболее частой причиной выхода из

стройка оборудования. А из видов загрязнений, вызывающих отказ, загрязнение твердыми частицами является наиболее распространенным. Таким образом, мониторинг загрязнения рабочей жидкости предотвращает неисправности оборудования на протяжении всего жизненного цикла эксплуатации турбоагрегата.

Подсчет частиц помогает проверить состояние смазки еще до того, как она попадет в машину. При заливке свежего масла необходимо определить его чистоту. К сожалению, свежее масло не всегда означает чистое масло. Чистота свежего масла имеет значение не только для предотвращения износа оборудования, но и для предотвращения деградации самого масла во время хранения в емкостях. Частицы загрязнений могут истощать присадки и способствовать окислению. Если масло заливается в систему с использованием грязного оборудования для перекачки или грязных емкостей для дозаправки, это также будет быстро выявлено с помощью контроля чистоты.

Систематический контроль позволяет отслеживать тенденции уровня чистоты с течением времени, а также может обеспечить контроль эффективности средств очистки турбинного масла.

Контроль чистоты масла помогает оптимизировать сроки технического обслуживания. Например, когда менять фильтр, можно узнать часто раньше по подсчету частиц, чем по перепаду давления на фильтре. Анализ загрязненности может помочь определить время использования дополнительных средств очистки.

Повышенная загрязненность является признаком проблемы и поводом для того, чтобы технический специалист исследовал причину, что включает дополнительные тесты по поиску источников загрязнения масла и эффективности средств очистки. Причиной для таких тестов может быть серия растущих подсчетов частиц или один аномальный всплеск.

Подсчет частиц помогает выявлять ошибки, связанные с эксплуатацией или техническим обслуживанием, вызванные человеческим фактором. Если были выполнены ремонтные работы или были установлены новые детали, подсчет частиц может дать оценку качеству работы. С помощью подсчета также можно отслеживать повышенный износ при пуске турбины.

Контроль чистоты помогает обнаружить ранние признаки износа оборудования. Мониторинг состояния компонентов машин, таких как, подшипники и другие может быть напрямую связан с тенденциями количества частиц в масле. После обнаружения проблем, будь то сильное загрязнение, ненормальный износ или даже деградация смазки, подсчет частиц может стать инструментом в процессе устранения неполадок. Например, анализ результатов подсчета частиц в различных точках циркуляционной системы может быть индикатором того, где находится источник проникновения загрязнений или источник образования износа. Даже после принятия корректирующих мер постоянный мониторинг количества частиц может подтвердить, что решение было успешным. Знание и контроль точек проникновения всех типов загрязняющих веществ увеличит не только срок службы фильтров, но и срок службы масла и машины.

Анализ частиц загрязнений помогает предупредить о проблемах с маслом. Износ может возникать, когда смазочные материалы не работают должным образом. Изменение вязкости, истощение присадок или ухудшение характеристик из-за загрязняющих веществ (таких как воздух и вода) могут привести к кавитационному износу, коррозионному износу или разрушению масляной пленки. Об этом может свидетельствовать рост количества частиц.

Поддержание нормативной чистоты турбинного масла заключается в своевременной локализации источников повышенного загрязнения и удалении загрязнений из масла (фильтровании). Методы исключения источников загрязнения и очистки всегда должны быть сбалансированы. Удаление загрязнений с помощью средств очистки может быть эффективным, но до некоторой степени. Инвестиции в устранение источников загрязнения составляют лишь одну десятую затрат, полученных в следствии попадания загрязнений в масло при эксплуатации машины [123].

Кроме того, следует учитывать не только твердые загрязнения. Влага является вторым наиболее разрушительным загрязнителем и часто игнорируется. Проникновение воды трудно полностью предотвратить. Тем не менее, любое

попадание воды или пара всегда следует отслеживать и контролировать. Если вода является постоянным загрязнителем, то могут потребоваться фильтры, которые более эффективно удаляют воду из масла или отдельное устройство для удаления влаги.

Прогрессивным и наиболее распространенным сегодня методом контроля промышленной чистоты рабочих жидкостей является дисперсионный анализ. В соответствии со стандартом СТО 70238424.27.100.053-2013 «Энергетические масла и маслохозяйства электрических станций и сетей. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования» (Приказ НП «ИНВЭЛ» от 12.02.2013 № 05), разработанным ОАО «Фирма ОРГРЭС» и ОАО «ВТИ», измерять чистоту масла необходимо гранулометрическим методом в соответствии с действующим ГОСТ 17216-2001 [31] приборами контроля чистоты жидкости [78, 93].

4.2. Электроэрозионное повреждение подшипников турбоагрегата К-500-240 ХТГЗ

Отбор проб производился в приемном (грязном) и чистом отсеках ГМБ системы смазки турбоагрегата К-500-240 ХТГЗ.

Грязный отсек ГМБ отделен от чистого четырехступенчатым фильтром, встроенным в ГМБ. В качестве фильтрующих перегородок используются латунные сетки квадратного плетения с ячейками 700 и 250 мкм для фильтров грубой и тонкой очистки соответственно.

Данные счета частиц проб масла приведены в таблице 4.1.

Класс промышленной чистоты контролируемого масла по ГОСТ 17216-2001 [31] определялся по числу в пробе частиц размерной группы 10-25 мкм, как оказывающей основное влияние на снижение показателей надежности агрегатов гидросистем. Несоответствие числа частиц в других размерных группах требованиям ГОСТ 17216-2001 [31] во внимание не принималось. Это обусловлено несоответствием закона распределения частиц,

принятого ГОСТ 17216-2001 [31], фактическому распределению частиц по размерам в естественном загрязнителе масла.

Таблица 4.1 – Промышленная чистота турбинного масла в системах маслоснабжения подшипников турбоагрегатов К-500-240 ХТГЗ

Размер частиц, мкм	Число частиц загрязнений в 100 мл масла, номер блока, отсек ГМБ			
	№ 8		№ 9	
	Грязный отсек	Чистый отсек	Грязный отсек	Чистый отсек
5-10	1105600	131450	91023	28803
10-25	138500	17500	13450	4476
25-50	13165	1458	1273	556
50-100	1167	66	40	16
>100	333	10	13	13
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	14	11	11	9

При исследовании проб масла, взятых в указанных точках системы смазки блока № 9, получены следующие результаты: пробы из чистого отсека ГМБ отнесены к 9 классу, а пробы из грязного отсека – к 11 классу по ГОСТ 17216-2001 [31].

Содержание механических примесей в масле в процессе нормального (эксплуатационного) износа подшипников, системы регулирования, оборудования системы гидравлического подъема роторов турбоагрегатов находится в определенных пределах. Повышение этого уровня свидетельствует об изменении условий эксплуатации с точки зрения загрязненности рабочей жидкости (масла) или об аварийном износе элементов гидросистемы.

При исследовании проб масла, взятых в указанных точках системы смазки блока № 8, получены следующие результаты: пробы из чистого отсека ГМБ отнесены к 11 классу, а пробы из грязного отсека – к 14 классу ГОСТ 17216-2001 [31]. Из приведенных данных следует, что содержание продуктов износа (твердых

частиц от 5 до 50 мкм) в рабочей жидкости увеличилось по сравнению с нормальным (эксплуатационным) износом элементов системы блока № 9 в 12 раз.

Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества частиц, загрязняющих масло в различных точках системы маслоснабжения турбин, приведены на рисунке 4.1.

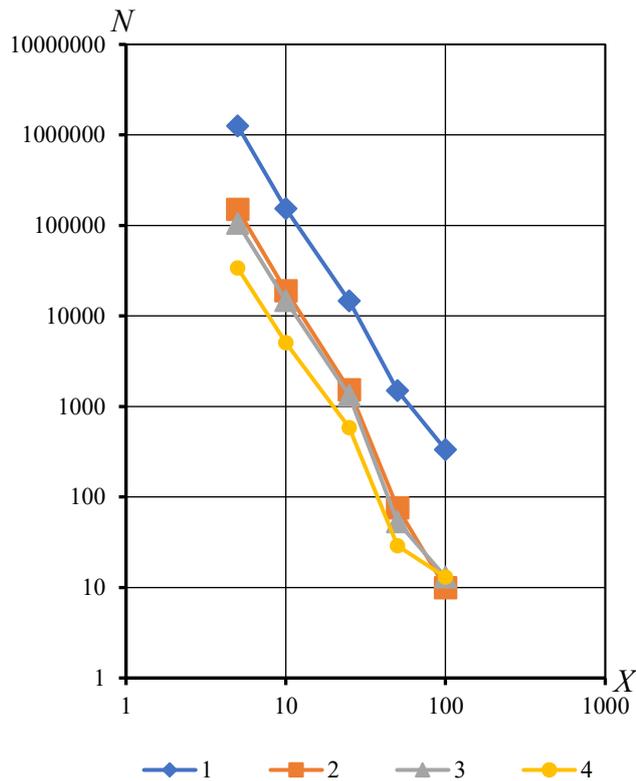


Рисунок 4.1 – Кривые твердых загрязнений в жидкости систем маслоснабжения турбин К-500 ХТГЗ: 1, 2 – из грязного и чистого отсеков ГМБ блока № 8; 3, 4 – из грязного и чистого отсеков ГМБ блока № 9; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg)

При ревизии подшипников блока № 8 и анализе повреждений были зафиксированы признаки протекания электроэрозионных процессов.

Межведомственной комиссией по электроэрозии подшипников турбоагрегатов, состоявшейся в Союзтехэнерго в апреле 1988 г. отмечено, что

проблема эрозии турбоагрегатов является актуальной. В перечень направления работ по предотвращению электроэрозии турбоагрегатов она включила разработку устройств и нормативов инструментального контроля и эффективных средств очистки турбинных масел в процессе эксплуатации на электростанциях.

Электроэрозионные повреждения моделей подшипников при внешних источниках электричества исследовал А. Е. Языков. В его опытах при электроэрозионном повреждении вкладышей содержание продуктов износа частиц от 5 до 50 мкм в рабочей жидкости увеличилось по сравнению с нормальным (эксплуатационным) в 13-16 раз [106].

Введение в качестве диагностического параметра контроля чистоты турбинного масла позволят определить низкое качество монтажа, ремонта и эксплуатации, не обеспечивающего уровня чистоты рабочей жидкости.

4.3. Исследование загрязнения турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины К-200-130 Южноуральской ГРЭС

Исследования загрязнения турбинного масла проводились в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины К-200-130 ЛМЗ на Южноуральской ГРЭС.

Оценка загрязнений в масле по гранулометрическому составу производилась путем анализа отдельных проб масла, отобранных во время работы турбоагрегата под нагрузкой. Отбор проб масла производился в следующих точках: из кранов штатных пробоотборников МО и на сливе масла с подшипников турбины через смотровые окна с помощью специального пробоотборника (рисунок 2.8). Данные счета частиц проб масла системы маслоснабжения турбоагрегата представлены в таблице 4.2. Здесь же для сравнения приведены данные о чистоте масла в системе маслоснабжения Т-180/210 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3 [62, 96]. Обобщенные

результаты измерений размеров и подсчета количества твердых частиц, загрязняющих масло, показаны на рисунке 4.2.

Таблица 4.2 – Промышленная чистота турбинного масла в системе смазки подшипников турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ

Размер частиц, мм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла	
	К-200-130 ЛМЗ	Т-180/210 ЛМЗ
5-10	33868	1991
10-25	1952	646
25-50	86	147
50-100	12	11
100-200	3	0
>200	3	0
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	8	7

Следует отметить, что значительное отклонение от линейности в области малых размеров частиц на рисунке 4.2 свидетельствует о повышенном износе деталей гидрооборудования, и что связано с появлением в рабочей жидкости большого количества частиц малого размера [52].

Результаты гранулометрического анализа твердых частиц загрязнений рабочей жидкости можно использовать для диагностики износа подшипников турбин.

Количество частиц твердых загрязнений проб масла на сливе с подшипников турбины К-200-130 ЛМЗ и результаты подсчета N_i приведены в таблице 4.3 и 4.4, а обобщенные результаты измерений размеров и подсчета количества частиц, загрязняющих масло – на рисунках 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 и 4.7.

В таблице 4.5 приведены данные счета частиц проб масла на сливе с подшипников турбины, а на рисунке 4.8 – суммарное количество частиц в пробах всех пяти подшипников.

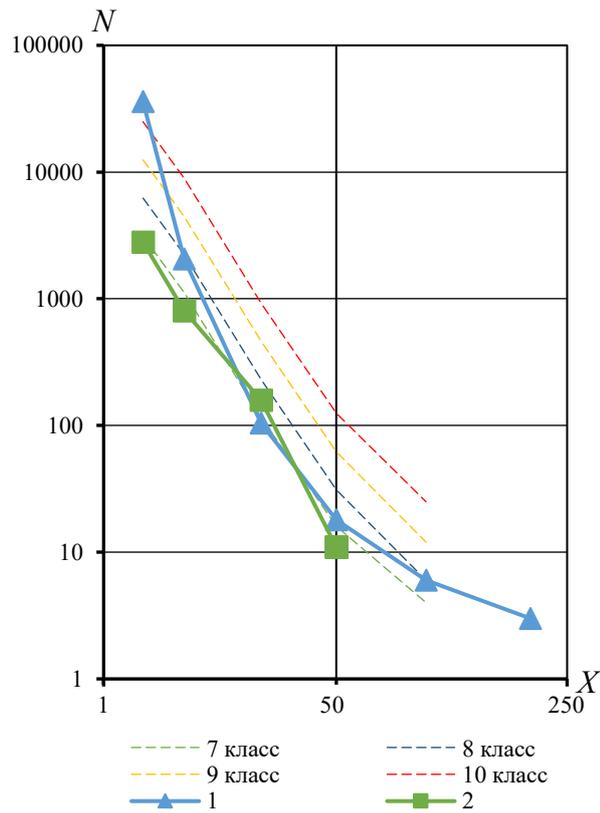


Рисунок 4.2 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегатов: 1 – К-200-130 ЛМЗ; 2 – Т-180/210 ЛМЗ; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

Таблица 4.3 – Промышленная чистота турбинного масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ на сливе с подшипников и результаты подсчета N_i

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, № КП					
	КП № 1			КП № 2		
	Вход	Слив	N_i	Вход	Слив	N_i
5-10	33868	44316	10448	33868	46585	12717
10-25	1952	4120	2168	1952	4049	2097
25-50	86	397	311	86	344	258
50-100	12	60	48	12	46	34
100-200	3	13	10	3	11	8
>200	3	9	6	3	6	3
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	8	9	–	8	9	–

Таблица 4.4 – Промышленная чистота турбинного масла системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ на сливе с подшипников и результаты подсчета N_i

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла, № КП							
	КП № 3					КП № 4		
	Вход	Слив № 1	N_i	Слив № 2	N_i	Вход	Слив	N_i
5-10	33868	51632	17764	76675	42807	33868	44305	10437
10-25	1952	4124	2172	10243	8291	1952	3635	1683
25-50	86	245	159	363	277	86	338	252
50-100	12	39	27	52	40	12	43	31
100-200	3	15	12	14	11	3	21	18
>200	3	15	12	12	9	3	20	17
Класс чистоты ГОСТ 17216-2001 [31]	8	8	–	10	–	8	9	–

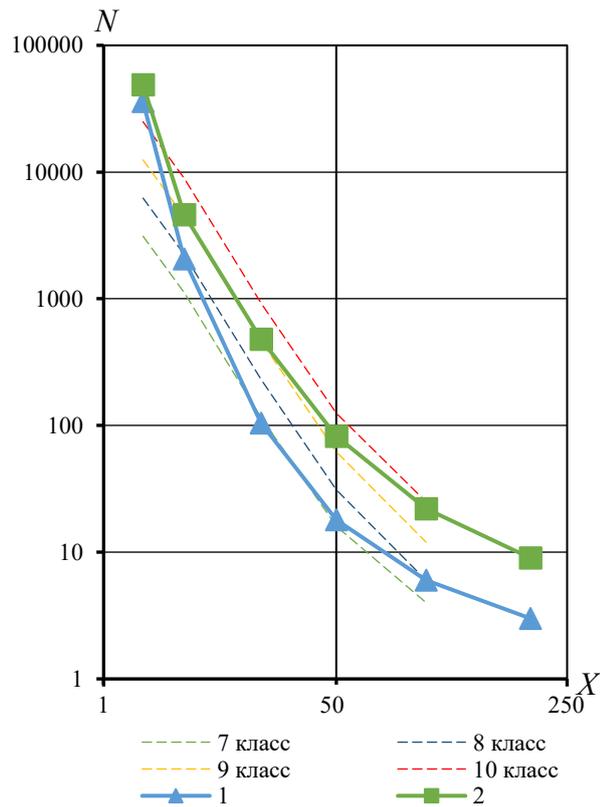


Рисунок 4.3 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ: 1 – на входе в подшипник № 1; 2 – на сливе с подшипника; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

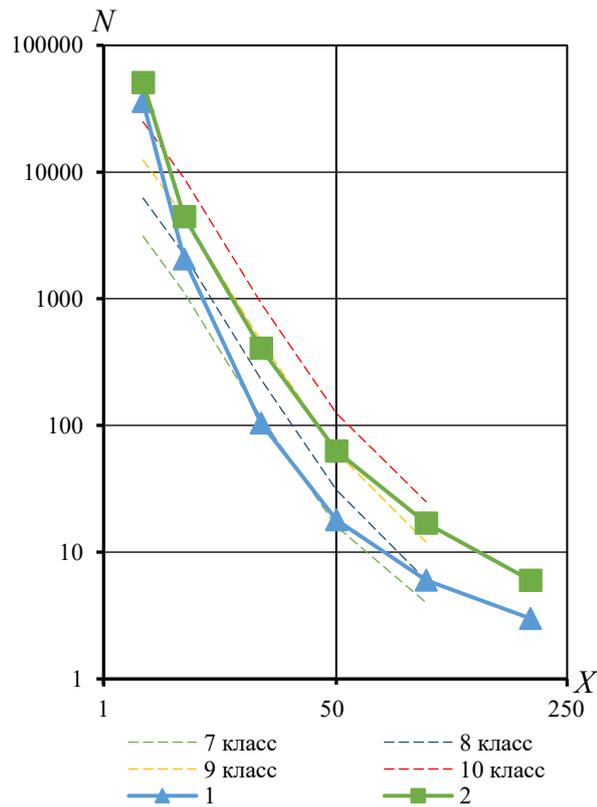


Рисунок 4.4 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ: 1 – на входе в подшипник № 2; 2 – на сливе с подшипника; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

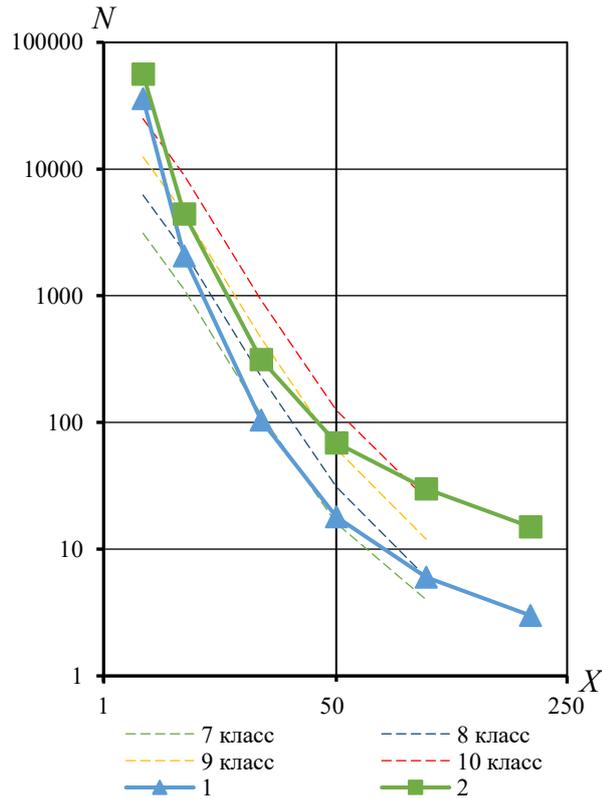


Рисунок 4.5 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ: 1 – на входе в подшипник № 3; 2 – на сливе с подшипника; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

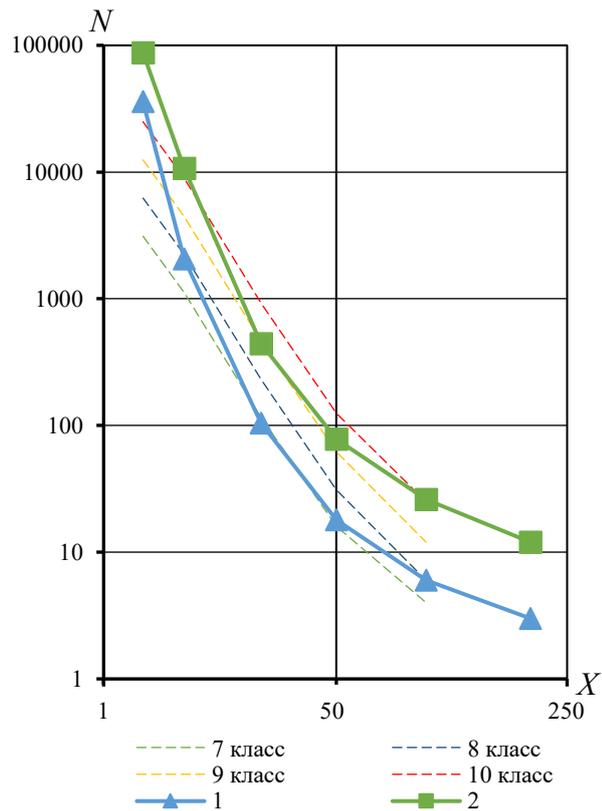


Рисунок 4.6 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ: 1 – на входе в подшипник № 4; 2 – на сливе с подшипника; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

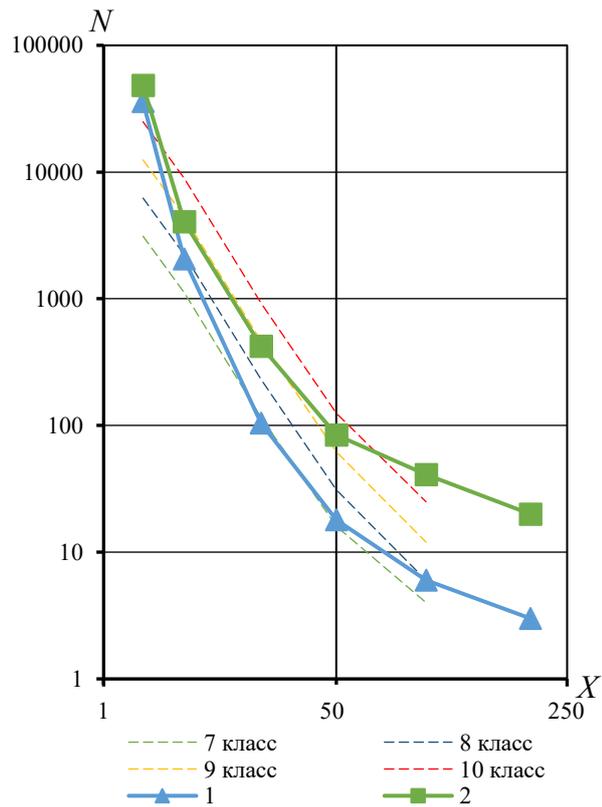


Рисунок 4.7 – Кривые твердых загрязнений турбинного масла системы маслоснабжения и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ: 1 – на входе в подшипник № 5; 2 – на сливе с подшипника; 7-10 – классы по ГОСТ 17216-2001 [31]; N – общее число частиц, имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы (lg); X – размер частиц, мкм (lg^2)

Таблица 4.5 – Загрязненность масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ на сливе с подшипников и результаты подсчета N_i

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

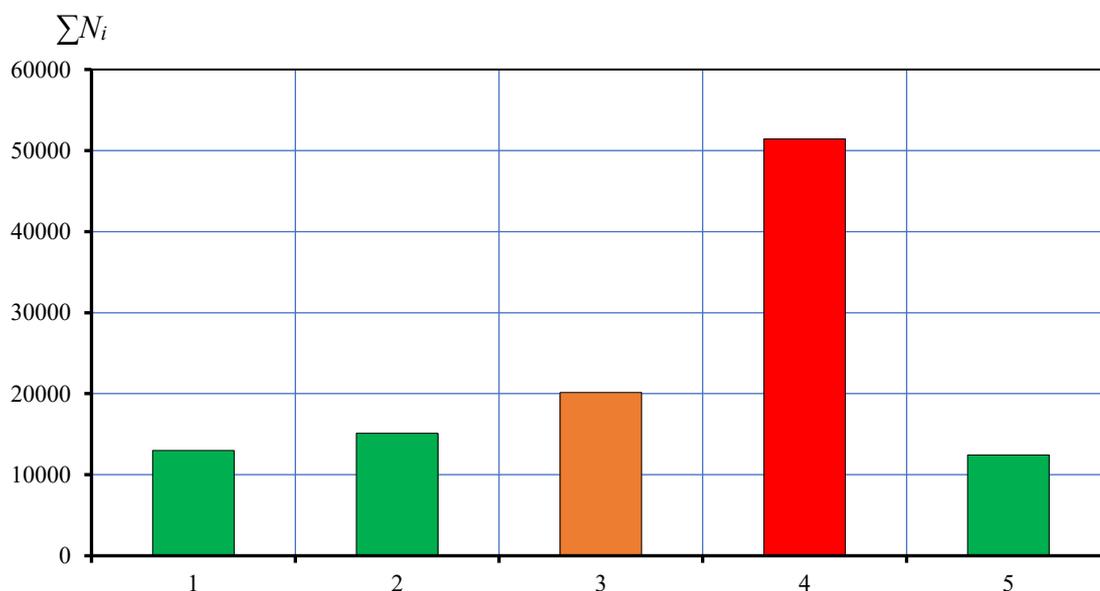


Рисунок 4.8 – Распределение $\sum N_i$ по подшипникам турбины К-200-180 ЛМЗ:
 $\sum N_i$ – поступление частиц в 100 мл масла; 1-5 – порядковый № подшипника

Рисунок 4.8 иллюстрирует, что скорость износа четвертого подшипника превышает минимальную на первом и пятом – более чем в четыре раза.

Отбор проб масла на входе и выходе исследуемого агрегата и анализ его чистоты в течение всего процесса эксплуатации дает информацию о техническом состоянии системы и ее элементов и нарушении технологии очистки масла (несвоевременной очистки и замене фильтров).

Практически все виды дефектов в системах маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегатов связаны с изменением гранулометрического состава твердых загрязнений в масле (промышленной чистоты рабочей жидкости), поэтому именно дисперсионный анализ может быть ключевым при обнаружении дефектов, нарушений рабочих процессов в системе и режимов ее функционирования. Если чистота рабочей жидкости по результатам анализа ниже установленного уровня (нормы), то такое оборудование гидросистемы берется под учащенный контроль и в случае необходимости выводится в ремонт. Если правильно взяты пробы масла – анализы дают информацию об источнике загрязнения, обводнения, механизме износа и процессе его развития.

Данные счета капель эмульгированной воды проб масла, отобранных на сливе его с КП турбоагрегата, приведены в таблице 4.6 и 4.7.

Таблица 4.6 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ

Размер капель воды, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла, № КП					
	КП № 1			КП № 2		
	Вход	Слив	Δ	Вход	Слив	Δ
10-25	–	92622	–	–	68708	–
25-50	12017	10931	-1086	12017	1759	-10258
50-100	105	806	701	105	23	-82
100-200	12	74	62	12	0	-12
>200	0	7	7	0	0	0

Таблица 4.7 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников турбоагрегата К-200-130 ЛМЗ

Размер капель воды, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла, № КП							
	КП № 3					КП № 4		
	Вход	Слив № 1	Δ	Слив № 2	Δ	Вход	Слив	Δ
10-25	–	–	–	–	–	–	56721	–
25-50	12017	141709	129692	237377	225360	12017	11114	-903
50-100	105	12235	12130	46613	46508	105	2220	2115
100-200	12	1948	1936	6065	6053	12	465	453
>200	0	540	540	797	797	0	139	139

Анализ результатов измерений количественного содержания воды в масле в различных точках системы показал: пар поступает в масло в основном через уплотнения КП подшипников № 3. Например, количество капель эмульгированной воды в масле с размерами более 25 мкм на входе в подшипники № 1 и 2 (КП № 3) меньше, чем на сливе соответственно в 13 и 24 раза.

Результаты исследований, изложенные в этой главе, опубликованы в [62].

4.4. Определение источников попадания воды или водяного пара в масло в системе маслоснабжения турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ на Челябинской ТЭЦ-3

Отбор проб масла производился в следующих точках: из кранов штатных пробоотборников МО и на сливе масла с подшипников турбины через смотровые окна с помощью специального пробоотборника (рисунок 2.8).

Данные счета капель эмульгированной воды проб масла, отобранных на сливе его из КП турбоагрегата приведены в таблице 4.8 и спустя семь дней в таблице 4.9.

Таблица 4.8 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ

Размер капель воды, 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 воды >5 мкм	4988	25179	32827	29897	5354	7465

Таблица 4.9 – Концентрация и дисперсность капель эмульгированной воды в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ

Размер капель воды, мкм	Число капель эмульгированной воды в 100 мл турбинного масла, место отбора проб						
	Чистый отсек ГМБ	МО № 1	МО № 2	КП № 1	КП № 2	КП № 3	КП № 4
5-10	2219	4128	6672	14026	23671	577	2564
10-25	1166	4288	7901	6557	6660	372	1283
25-50	46	2271	3486	1529	690	12	0
50-100	0	40	136	66	25	0	0
100-200	0	0	5	2	8	0	0
>200	0	0	1	0	4	0	0
Капель воды >5 мкм	3431	10727	18201	22180	31058	961	3847

Анализ результатов измерений количества содержания воды в масле в различных точках системы показал: пар поступает в масло в основном через уплотнения КП № 1 и 2. Например, количество капель эмульгированной воды в масле с размерами более 5 мкм на входе в подшипник № 1 и 2 меньше, чем на сливе соответственно в 6,5 и 9 раз.

Технические мероприятия: реконструкция технологической схемы отсосов пара из уплотнений ЦВД, регулировка паровых уплотнений турбины и разряжений в КП, практически предотвратили обводнение масла в системе маслоснабжения подшипников турбины (количество капель эмульгированной воды в масле с размерами более 25 мкм уменьшилось в 723 раза).

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОЧИСТКЕ ТУРБИННОГО МАСЛА И КОНТРОЛЮ ЧИСТОТЫ

В сегодняшней конкурентной экономике перед предприятиями стоит задача найти способы увеличения прибыли без значительных капиталовложений.

Для руководителей компаний внедрение мероприятий по очистке масла и контролю чистоты, позволяет снижать затраты за счет продления жизненного цикла жидкостей и гидравлических систем.

Стоимость загрязнения смазочного материала можно оценить с помощью различных методов, таких как анализ отказов, оценка стоимости жизненного цикла, анализ рентабельности инвестиций или расчет потерь производительности. Независимо от используемого метода, загрязнение смазочного материала может привести к значительным производственным потерям.

Стоимость масла не является значительной по сравнению с затратами, связанными с последствиями применения загрязненных рабочих жидкостей [112].

Загрязненная рабочая жидкость часто является главной причиной поломок оборудования, которые приводят к простоям. Первоначальные инвестиции в обеспечение чистоты масла приносят выгоду, которая значительно превышает затраты, связанные с простоями. Также нужно принимать во внимание затраты на ремонт или замену оборудования с течением времени. Повышение чистоты с 16/13 ISO 4406 (11 класс ГОСТ 17216-2001) [31] до 14/11 ISO 4406 (9 класс ГОСТ 17216-2001) [31] позволит продлить срок службы оборудования в 1,5 раза [140].

Износ не только приводит к выходу машины из строя, но и снижает ее производительность в период, предшествующий текущему или капитальному ремонту. В этот период обычно наблюдается снижение производительности из-за неустойчивой работы машины. Также наблюдается повышенное энергопотребление.

Количество новых частиц, образующихся из одной попавшей в систему частицы, зависит от многих факторов, включая тип машины, фильтрование, осаждение, количество зон трения, рабочие зазоры и рабочие скорости.

По сути, это сколько поверхностных царапин и вмятин может оставить частица, прежде чем она измельчится, осядет на дно резервуара или будет удалена фильтрами или при замене масла. Если попавшие частицы быстро удаляются фильтрами, происходит меньше повреждений и образуется меньше новых частиц износа.

Средняя частица, не удаленная фильтрами, генерирует от пяти до 20 новых частиц (вторичных частиц). Некоторые вторичные частицы образуют новые (третичные частицы) [123].

Затраты на ремонт оборудования и производственные потери, если используются малоэффективные фильтры, в 10–10000 раз превышают стоимость удаления загрязнений [123].

Поддержание нормативной чистоты дает очевидную экономическую выгоду, продлевает срок службы масла. Это сводится к простому факту: старую жидкость необходимо утилизировать и заменить. По данным [18] от внедрения мероприятий по повышению уровня эксплуатации турбинного масла можно добиться: снижения потребления свежего турбинного масла более, чем на 30%; увеличения срока службы масла до 10 лет; снижения затрат на МОУ; снижения трудозатрат на очистку маслосистемы при ремонте в 2-3 раза; сокращения времени капитальных ремонтов. Согласно статистическим данным [13, 40] 20-25% всех вынужденных простоев турбоагрегатов на электростанциях происходит вследствие выхода из строя подшипников, причем доля отказов из-за загрязнения масла, составляет 50-55%. Из-за неисправностей элементов маслосистемы происходит до 10% всех отказов турбоагрегатов. Это свидетельствует, что важнейшим фактором снижения эксплуатационных затрат является качество турбинного масла.

Поддержание более чистой жидкости в конечном итоге продлит срок службы фильтров и уменьшит затраты на замену фильтровального материала. Кроме того, каждая замена фильтра влечет за собой дополнительные трудозатраты.

Перекачивание чистой жидкости требует меньше энергии чем перекачивание загрязненной. Загрязнения влияют на вязкость жидкости, что заставляет насосы работать интенсивнее. По мере накопления загрязнений потребление энергии увеличивается.

Чтобы повысить экономический эффект от внедрения мероприятий по очистке масла и контролю чистоты необходимо несколько важных шагов:

1. Оценить и установить нормативные показатели чистоты масла, используя ГОСТ 17216-2001 [31] для каждого компонента системы. Следует заметить, что каждый раз, когда класс чистоты увеличивается, количество частиц в жидкости удваивается. При этом примерно удваиваются затраты на фильтрование при переходе к каждому последующему классу.

2. Выбор правильного фильтрующего материала для фильтров. Для достижения нормативных показателей уровня чистоты, необходимо сделать правильный выбор фильтрующего материала. Критерии выбора должны включать совместимость с рабочей жидкостью, перепад давления, грязеемкость и другие технические требования. При расчете общей стоимости включают затраты на количество фильтровальных элементов и трудозатраты на их замену. Более эффективные фильтровальные материалы, способные обеспечить нормативную чистоту рабочей жидкости, могут сократить срок окупаемости инвестиций. Материалы с длительным сроком службы еще больше повышают рентабельность.

3. Регулярный контроль чистоты масла. Регулярный анализ масла предоставит специалистам по техническому обслуживанию три важных показателя: текущий уровень чистоты жидкости; эффективность системы очистки; а также наличие сбоев в системе. Эта информация помогает принять соответствующие превентивные или ответные меры. Затраты, связанные с анализом масла, минимальны по сравнению с затратами на замену жидкости или ремонт оборудования.

4. Очистка нового масла. Как показали наблюдения, новые жидкости не являются чистыми. Доливка новых жидкостей без очистки наносит вред оборудованию. Когда необходимо долить или заменить масло, необходимо его

очистить до нормативных показателей, а лучше до уровня на один класс выше [148]. Стало обычной практикой обходить эту работу в целях сокращения затрат. Но первоначальные инвестиции в высокоэффективную очистку обычно обходятся значительно дешевле, чем последствия, связанные с попаданием загрязненного масла в систему, включая более частую замену жидкости и время простоя, связанное с заменой жидкости или повреждением оборудования.

5. Герметичность системы и резервуаров. Если маслосистема и резервуары с маслом не герметичны, то загрязнители из воздуха попадают в жидкость. Замена сапуна может напрямую повлиять на чистоту жидкости, что, в свою очередь, повлияет на эксплуатационные расходы.

6. Выявление и сведение к минимуму утечек масла. Утечки в системе приводят к двойным затратам. Они вызывают две проблемы: потерю жидкости и доступ загрязнений в систему с доливками.

Благодаря ответственному подходу к очистке масла и контролю чистоты можно значительно снизить производственные затраты.

Инвестиции в устранение источников загрязнения составляют лишь одну десятую затрат, полученных в следствии попадания загрязнений в масло и одну сотую, если рассматривать весь срок службы машины [148].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты диссертационного исследования:

1. Разработан метод экспресс-анализа промышленной чистоты турбинного масла и содержания эмульгированной воды в нем на базе отечественного прибора контроля жидкости ПКЖ-904А [73], 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-904А [73], 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 отсева 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 ГМБ совмещенных систем смазки подшипников и регулирования турбин должен быть 7-8 ГОСТ 17216-2001 [31].

6. Анализ серийно выпускаемых фильтрующих материалов показал, что всем требованиям отвечает ткань из полиамидных мононитей (ГОСТ 4403-91 [23]): номинальный размер ячеек 400-450 (+14-50) мкм – для фильтров грубой очистки и 200-250 (± 25) 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».

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) [31] до 14/11 ISO 4406 (9 класс ГОСТ 17216-2001) [31] позволит продлить срок службы оборудования в 1,5 раза.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ИНДЕКСЫ И СОКРАЩЕНИЯ

Условные обозначения:

АЭС – атомная электрическая станция;

В – возбудитель;

ВТИ – Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт;

Г – генератор;

ГМБ – главный масляный бак;

ГРЭС – государственная районная электрическая станция;

КИИГА – Киевский институт инженеров гражданской авиации;

КП – картер подшипника;

ЛМЗ – Ленинградский металлический завод;

МО – маслоохладитель;

МОУ – маслоочистительная установка;

МЭИ – Московский энергетический институт;

ПНП – пакет наклонных перегородок;

ПТН – питательный турбонасос;

ТМЗ – Турбомоторный завод;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

ТЭЦ – тепловая электростанция;

ФВВ – фильтровальное вспомогательное вещество;

ФГО – фильтр грубой очистки;

ФТО – фильтр тонкой очистки;

ХТГЗ – Харьковский турбогенераторный завод;

ЦВД – цилиндр высокого давления;

ЦНД – цилиндр низкого давления;

ЦСД – цилиндр среднего давления.

Обозначения:

φ – коэффициент отфильтровывания;

- Δ – разница количества мягких частиц в масле на выходе и входе агрегата турбины;
- α – температурный коэффициент объемного расширения масла;
- ϑ'' – абсолютный объем воздуха в отобранной пробе, мл;
- φ' – относительное объемное воздуходоержание в масле;
- $\vartheta_{см}$ – объем смеси в отобранной пробе, мл;
- b – коэффициент байпаса;
- Q – расход масла, м³/с;
- μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с;
- a – размер квадратной ячейки сетки в свету, м;
- F – площадь сетчатых фильтров, м²;
- θ – краевой угол;
- σ – поверхностное натяжение, Н/м;
- ζ – коэффициент гидравлического сопротивления сетки;
- k' – коэффициент, учитывающий геометрию ячейки сетки;
- k'' – коэффициент, определяющий состояние поверхности проволоки сетки;
- Re – число Рейнольдса;
- w – скорость потока, м/с;
- d – диаметр проволоки сетки, м;
- ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с;
- S – коэффициент живого сечения сетки;
- H – высота воздушной прослойки пробоотборника, мм;
- k – кратность разбавления пробы масла;
- m – кратность уменьшения количества твердых частиц в фильтрате;
- n – количество измерений;
- N – число частиц в 100 мл пробы;
- T – температура масла, °С;
- V – объем смеси контролируемой жидкости и разбавителя, мл;
- W – коэффициент пропускания частиц через фильтр;
- X – размер частиц, мкм;
- β – коэффициент эффективности фильтрования;

ΔP – перепад давления на фильтре, мм;

Δt – разность температур масла в ГМБ (в момент отбора проб) и в приборе (в момент измерения), °С.

Индексы:

0 – начальное значение;

a – азрированное масло;

d – деазрированное масло;

b – байпас;

f – фильтрат;

i – размерный диапазон частиц загрязнений в масле;

j – номер пробы смеси;

n – количество;

r – штатные фильтры ГМБ;

p – разбавитель;

u – до фильтра;

$см$ – смесь жидкостей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агте К. Металлокерамические фильтры: Пер. с нем. / К. Агте, К. Оцетек. – М. : Судпромгиз, 1959. – 135 с.
2. Аксенов А. Ф. Растворимость воздуха в индивидуальных углеводородных жидкостях / А. Ф. Аксенов, В. П. Белянский, А. С. Гречкин // Вопросы авиационной химотологии. – Киев : КИИГА, 1980. – С. 38.
3. Анализатор промышленной чистоты жидкостей PAMAS S40. – URL: <https://www.pamas.ru/pamas-s-40/> (дата обращения: 25.10.2023). – Текст : электронный.
4. Бабюк А. Г. Применение монохроматического когерентного источника света в поточной ультрамикроскопии / А. Г. Бабюк, Д. С. Лычников, М. А. Бабюк // Коллоидный журнал АН СССР. – 1981. – Т. 43. – № 6. – С. 1146-1148.
5. Барочкин Е. В. Общая энергетика: курс лекций / Е. В. Барочкин, С. А. Панков, Г. В. Ледуховский Под ред. Е.В. Барочкина. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Иваново : ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2013. – 296 с.
6. Барышев В. И. Исследования загрязнения гидросистем тракторов и его влияние на износ и снижение производительности насосов: Автореф. дис. канд. техн. наук / В. И. Барышев. – М. : НАТИ, 1972. – 26 с.
7. Барышев В. И. Классификация, контроль и нормирование промышленной чистоты рабочих жидкостей и масел / В. И. Барышев // Вестник ЮУрГУ Серия «Машиностроение». – 2005. – № 1. – С. 149-161.
8. Бахметов З. А. Анализ способов очистки маслопроводов и установок очистки турбинных масел турбоагрегатов ТЭС. / З. А. Бахметов, В. М. Неуймин // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – № 3. – С. 50-58.
9. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1971. – 672 с.
10. Белянин П. Н. Разработка и исследование высокооборотного центробежного очистителя рабочих жидкостей авиационных гидросистем:

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / П. Н. Белянин. – Саратов, 1975. – 197 с.

11. Белянин П. Н. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем / П. Н. Белянин, Ж. С. Черненко. – М. : Машиностроение, 1964. – 294 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005967113> (дата обращения: 28.10.2023). – Текст : электронный.

12. Большаков Г. Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов / Г. Ф. Большаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Недра Ленингр. отд-ние, 1982. – 350 с.

13. Бродов Ю. М. Анализ показателей надежности турбоустановок и энергоблоков / Ю. М. Бродов, Б. Е. Муромский, М. М. Мительман // Теплоэнергетика. – 1997. – № 8. – С. 23-25.

14. Патент № 2356028 С1 Российская Федерация, МПК G01N 15/02, G01N 15/06. Устройство для экспресс-анализа промышленной чистоты жидкостей : № 2008120839/28 : заявл. 27.05.2008 : опубл. 20.05.2009 / В. А. Бухалов, Е. В. Лесников, Ф. Ф. Стуканов. – EDN HGVDTI.

15. Бюллетень 426А фирмы Ніас (США).

16. Бюрнис Л. Гидравлические приводы. Установка, пуск в эксплуатацию, уход и ремонт. Пер. с фран. / Л. Бюрнис. – М. : Мир, 1969. – 64 с.

17. Водяная система регулирования паровых турбин / В. Н. Веллер, Г. А. Киракосянц, Д. М. Левин, В. В. Лысько. – М. : Энергия, 1970. – 263 с.

18. Гвоздев В. С. Обводнение турбинного масла и средства контроля и защиты его от влаги на турбогенераторах ТЭС: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.14.14 / В. С. Гвоздев. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2003. – 156 с.

19. Городецкая А. В. Скорость поднятия пузырьков в воде и водных растворах при больших числах Рейнольдса / А. В. Городецкая // Журнал физической химии. – 1949. – Т. 23. – № 1. – С. 71-77.

20. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (Переиздание). – М. : Стандартинформ, 2019. – 27 с.

21. ГОСТ 32-74 Масла турбинные. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3). – М. : Стандартинформ, 2011. – 4 с.

22. ГОСТ 949-73 Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на $P(p) \leq 19,6$ МПа (200 кгс/кв.см). Технические условия (с Изменениями № 1-5, Поправкой). – М. : Стандартинформ, 2008. – 12 с.

23. ГОСТ 4403-91 Ткани для сит из шелковых и синтетических нитей. Общие технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 19 с.

24. ГОСТ 6370-83 (СТ СЭВ 2876-81) Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей (с Изменением № 1). – М. : Стандартинформ, 2008. – 7 с.

25. ГОСТ 6613-86 Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками. Технические условия (с Изменением № 1). – М. : Стандартинформ, 2006. – 12 с.

26. ГОСТ 8050-85 Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, с Поправкой). – М. : Издательство стандартов, 1995. – 24 с.

27. ГОСТ 9972-2020 Масла нефтяные турбинные с присадками. Технические условия (с Поправками). – М. : Стандартинформ, 2021. – 16 с.

28. ГОСТ 10227-2013 Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 2014. – 18 с.

29. ГОСТ 12275-66 Масла смазочные и присадки. Метод определения степени чистоты (с Изменениями № 1, 2). – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 3 с.

30. ГОСТ 13861-89 Редукторы для газопламенной обработки. Общие технические условия (с Поправкой). – М. : Издательство стандартов, 1990. – 15 с.

31. ГОСТ 17216-2001 Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. – М. : Стандартинформ, 2008. – 12 с.

32. ГОСТ 23932-90 Посуда и оборудование лабораторные стеклянные. Общие технические условия. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 12 с.

33. ГОСТ 31247-2004 Чистота промышленная. Определение загрязнения пробы жидкости с помощью автоматических счетчиков частиц. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2005. – 15 с.

34. ГОСТ 34236-2017 Топлива дистиллятные легкие и средние. Определение размеров и количества частиц диспергированных примесей автоматическим счетчиком частиц. – М. : Стандартинформ, 2019.

35. ГОСТ ИСО 4407-2006 Чистота промышленная. Определение загрязненности жидкости методом счета частиц с помощью оптического микроскопа. – М. : Стандартинформ, 2007. – 14 с.

36. ГОСТ Р 2.601-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Эксплуатационные документы (Переиздание). – М. : Стандартинформ, 2021. – 35 с.

37. ГОСТ Р ИСО 11171-2012 Гидропривод объемный. Калибровка автоматических счетчиков частиц в жидкости (Переиздание). – М. : Стандартинформ, 2019. – 50 с.

38. ГОСТ Р ИСО 16889-2011 Гидропривод объемный. Фильтры. Метод многократного пропускания жидкости через фильтроэлемент для определения характеристик фильтрования. – М. : Стандартинформ, 2012. – 44 с.

39. Григорьев М. А. Очистка масла и топлива в автотракторных двигателях / М. А. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1970. – 272 с.

40. Дюфрейн К. Ф. Износ радиальных подшипников паровых турбин при малых рабочих скоростях / К. Ф. Дюфрейн, И. В. Кеннел, Т. Х. Маклюски // Проблемы трения. – 1983. – Т. 105. – № 5. – С. 42-45.

41. Емельянов Л. А. Фильтрация дизельного топлива / Л. А. Емельянов. – М.-Л. : Машгиз, 1962. – 108 с.

42. Ефимов Н. Н. Производственные и экологические проблемы обводнения турбинных масел тепловых электростанций / Н. Н. Ефимов, В. С. Гвоздев // Экология Промышленного Производства. – 2003. – № 2. – С. 65-68.

43. Жужиков В. А. Фильтрование: Теория и практика разделения суспензий / В. А. Жужиков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 400 с.

44. Захаров А. С. Авиационное гидравлическое оборудование: учебное пособие : Учебники НГТУ. Авиационное гидравлическое оборудование / А. С. Захаров, В. И. Сабельников. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – 404 с.

45. Зигель В. Фильтрация: для инж. и студентов старших курсов / В. Зигель Под ред. А.Б. Пакшвер с дополнениями И.И.Воронцова; пер. с нем. И.Ф. Рюмшина. – М. : ГОНТИ, 1939. – 172 с.

46. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик Под редакцией канд. техн. наук М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.

47. Казанский В. Н. Совершенствование элементов системы смазки мощных паровых турбин (160-300 МВт) / В. Н. Казанский, и др. // Котельные и турбинные установки энергетических блоков. Опыт освоения. – М. : Энергия, 1971. – С. 219-224.

48. Казанский В. Н. Исследование процесса выделения воздуха из масла в баках паровых турбин: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.00.00 / В. Н. Казанский. – М. : МЭИ, 1964. – 167 с.

49. Казанский В. Н. Системы смазывания паровых турбин / В. Н. Казанский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.

50. Карсакова Е. В. Свойства и области применения полиамидов различных типов / Е. В. Карсакова, Т. П. Кравченко // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. XXII. – № 5(85). – С. 10-13.

51. Кондаков Л. А. Рабочие жидкости и уплотнения гидравлических систем / Л. А. Кондаков. – М. : Машиностроение, 1982. – 216 с.

52. Коновалов В. М. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков / В. М. Коновалов, В. Я. Скрицкий, В. А. Рокшевский. – М. : Машиностроение, 1976. – 288 с.

53. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика : Нефтегазовый инжиниринг / В. Г. Левич. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М. Ижевск : [б. и.] ; Институт компьютерных исследований, 2016. – 686 с.

54. Лейчкис И. М. Фильтрование с применением вспомогательных веществ / И. М. Лейчкис. – Киев : Техника, 1975. – 191 с.

55. Малиновская Т. А. Разделение суспензий в промышленности органического синтеза / Т. А. Малиновская. – М. : Химия, 1971. – 320 с.

56. Музыкин Ю. Д. Удаление пузырьков воздуха из жидкости с помощью сеток / Ю. Д. Музыкин, И. М. Попова // Вестник машиностроения. – 1982. – № 4. – С. 12-15.

57. Новиков Е. А. Об измерении загрязнения жидкостей твердыми частицами / Е. А. Новиков // Аналитика. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 148-155.

58. О чистоте масла в системах маслоснабжения турбоагрегатов / М. Г. Вишневецкий, Г. С. Полянский, Е. Ф. Ливада, Л. В. Кантемир // Электрические станции. – 1984. – № 7. – С. 18-23.

59. Объемные гидравлические приводы / ред. Т. М. Башта, И. З. Зайченко, В. В. Ермаков, Е. М. Хаймович. – М. : Машиностроение, 1969. – 628 с.

60. Одномерные двухфазные течения / Г. Б. Уоллис, В. С. Данилин, Ю. А. Зейгарник, И. Т. Аладьев. – М. : Мир, 1972. – 440 с.

61. Осинцев К. В. Анализ эффективности очистки турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов и модернизация рамных фильтров / К. В. Осинцев, Н. А. Пшениснов, А. И. Пшениснов // Энергетик. – 2022. – № 11. – С. 45-49.

62. Осинцев К. В. Комплекс мер по повышению чистоты турбинного масла / К. В. Осинцев, Н. А. Пшениснов, А. И. Пшениснов // Электрические станции. – 2023. – № 2(1099). – С. 38-43.

63. Осинцев К. В. Процессы загрязнения и очистки турбинного масла в системах смазки паровых турбин / К. В. Осинцев, Н. А. Пшениснов, А. И. Пшениснов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2022. – Т. 22. – № 3. – С. 83-89.

64. 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.

65. Отчет заседания подсекции «Тепломеханическое оборудование» НП «НТС ЕЭС» по теме: «Разработка и внедрение маслоочистительного комплекса на электростанциях». – М., 2009. – URL: <https://nts-ees.ru/sites/default/files/sekcija9/maslootchiska.pdf> (дата обращения: 25.10.2023). – Текст : электронный.

66. Папок К. К. Моторные и реактивные масла и жидкости / К. К. Папок, Е. Г. Семинидо. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1964. – 704 с.

67. Пепельнюк И. А. Влияние загрязненности рабочих жидкостей гидравлических систем на их вязкость / И. А. Пепельнюк // Вестник молодых учёных и специалистов Самарского университета. – 2016. – № 1(8). – С. 16-22.

68. Петриченко А. Д. Качество нефтяного турбинного масла и надежность работы систем регулирования и смазки турбоагрегатов / А. Д. Петриченко, В. В. Вакуров // Электрические станции. – 1991. – № 10. – С. 18-22.

69. Петриченко А. Д. Эффективность существующей системы контроля турбинного масла / А. Д. Петриченко // Электрические станции. – 1988. – № 7. – С. 41-44.

70. Пискарев И. В. Фильтровальные материалы из стеклянных и химических волокон / И. В. Пискарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Легкая индустрия, 1965. – 111 с.

71. Пискарев И. В. Фильтровальные ткани: Изготовление и применение. Фильтровальные ткани / И. В. Пискарев. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1963. – 190 с.

72. Повышение экономичности, надежности и экологической безопасности ТЭС: материалы науч.-техн. конф., 18-19 мая 2005 г., Москва. Повышение экономичности, надежности и экологической безопасности ТЭС / ред. Московский энергетический институт. – М. : Изд-во МЭИ, 2005. – 211 с.

73. Прибор для определения содержания механических загрязнений в жидкости ПКЖ-904А. – URL: <http://tesar.ru/production/control/pkg904a/> (дата обращения: 25.10.2023). – Текст : электронный.

74. Прибор контроля чистоты жидкости ПКЖ-904А. Руководство по эксплуатации. 72609.925.00.000 РЭ. – Саратов : НИТИ «Тесар», 2022. – 29 с.

75. Приказ № 524 РАО «ЕЭС России»: «О повышении качества первичного и вторичного регулирования чистоты электрического тока в ЕЭС России.» – 2002. – URL: <https://www.so-ups.ru/> (дата обращения: 25.10.2023). – Текст : электронный.

76. Пузырев С. А. Анализ отечественных и зарубежных бумажных фильтрующих материалов: / С. А. Пузырев, Г. П. Кучин // Труды семинара по очистке воздуха, масла и топлива с целью увеличения долговечности двигателей. Сборник статей. – М. : ОНТИ НАМИ, 1966. – С. 164-168.

77. Пшениснов И. Ф. Фильтрация аэрированного масла в системе маслоснабжения / И. Ф. Пшениснов, А. И. Пшениснов, Я. И. Пшениснов // Техническая эксплуатация, надежность и совершенствование автомобилей: Сборник научных трудов. – Челябинск : ЧГТУ, 1995. – С. 91-93.

78. Пшениснов Н. А. Экспресс-анализ промышленной чистоты турбинных, трансформаторных и других масел и содержания эмульгированной воды в них: Методические указания. Отчет ООО «НПО ЭнергоСервис» / Н. А. Пшениснов, А. И. Пшениснов. – Челябинск : ООО «НПО ЭнергоСервис», 2023.

79. Разделение суспензий в химической промышленности / ред. Т. А. Малиновская, И. А. Кобринский, О. С. Кирсанов, В. В. Рейнфарт. – М. : Химия, 1983. – 263 с.

80. Разработка метода контроля технического состояния газоперекачивающих агрегатов по анализу смазочного масла / А. А. Петросянц, И. А. Сорокин, Е. А. Петросянц [и др.] // Вестник Машиностроения. – 1982. – № 6. – С. 33-38.

81. РД 34.43.102-96. Инструкция по эксплуатации нефтяных турбинных масел. ОАО «Фирма ОРГРЭС» и ОАО «ВТИ». – М. : ВТИ, 1997. – 26 с. – URL:

<https://www.gostrf.com/normadata/1/4294844/4294844657.pdf> (дата обращения: 25.10.2023). – Текст : электронный.

82. Ровдель А. А. К вопросу о растворимости пузырька газа в жидкости / А. А. Ровдель // Журнал прикладной химии. – 1953. – Т. 26. – № 7. – С. 21-25.

83. Романков П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии : Сер. «Процессы и аппараты хим. и нефтехим. технологии» / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – 3-е изд., перераб. – Л. : Химия Ленингр. отд-ние, 1982. – 287 с.

84. Рыбаков К. В. Обезвоживание авиационных горюче-смазочных материалов / К. В. Рыбаков, Е. Н. Жундыбин, В. П. Коваленко. – М. : Транспорт, 1979. – 181 с.

85. Рыбаков К. В. Усовершенствование методов фильтрации дизельных топлив / К. В. Рыбаков, Т. Н. Карпекина, А. В. Бойко // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. Научно-технический сборник. – М. : ВНИИОЭНТ, 1968. – С. 22-26.

86. Рыбаков К. В. О работоспособности металло-керамических фильтров / К. В. Рыбаков, Т. Н. Карпекина // Труды семинара по очистке воздуха, масла и топлива с целью увеличения долговечности двигателей. Сборник статей. – М. : ОНТИ НАМИ, 1969. – Т. 1. – Вып. 9. – С. 21-28.

87. Рыбаков К. В. Фильтрование авиационных масел и специальных жидкостей / К. В. Рыбаков, В. П. Коваленко. – М. : Транспорт, 1977. – 191 с.

88. Рыбаков К. В. Влияние углеводородных растворителей на физико-химические свойства нетканых фильтрационных материалов / К. В. Рыбаков, Е. Т. Устинова, Т. П. Карпеки // Нетканые текстильные материалы. Реф. сб. – ЦИНТЭИ Легпром, 1968. – Вып. 1. – С. 1-4.

89. Рыбаков К. В. Фильтрация авиационных топлив / К. В. Рыбаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1983. – 158 с.

90. 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». – EDN HRWUEQ.

91. Смолин Р. Н. Влияние качества сернистого масла на чувствительность элементов системы регулирования турбин / Р. Н. Смолин // Энергия. – 1974. – № 1. – С. 12-17.

92. Старение и коррозионное действие турбинных масел в присутствии воды / К. И. Иванов, А. А. Лужецкий, А. Н. Александров, Л. Ш. Серегина // Теплоэнергетика. – 1970. – № 2. – С. 23-27.

93. СТО 70238424.27.100.053-2013 — Энергетические масла и маслохозяйства электрических станций и сетей. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. НП «ИНВЭЛ». – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293784/4293784229.pdf> (дата обращения: 25.10.2023). – Текст : электронный.

94. Тимиркеев Р. Г. Промышленная чистота и тонкая фильтрация рабочих жидкостей летательных аппаратов / Р. Г. Тимиркеев, В. М. Сапожников. – М. : Машиностроение, 1986. – 151 с.

95. Титов И. В. Очистка топлив от эмульгированной воды методом фильтрации / И. В. Титов, К. В. Рыбаков // Труды семинара по очистке воздуха, масла и топлива с целью увеличения долговечности двигателей: Сборник статей. – М. : ОНТИ НАМИ, 1969. – Т. 9. – Вып. 9. – С. 9-16.

96. Торопов Е. В. Очистка турбинного масла в системе маслоснабжения и регулирования Т 180/210 ЛМЗ до нормативной чистоты / Е. В. Торопов, А. И. Пшениснов // Известия ВУЗов. Энергетика. – 1998. – № 4. – С. 54-61.

97. Устинова Е. Т. Нетканые клеевые фильтровальные материалы / Е. Т. Устинова, В. Н. Небаров, К. В. Рыбаков // Текстильная промышленность. – 1963. – № 2. – С. 65-69.

98. Устинова Е. Т. Влияние состава волокнистого слоя и отдельных технологических режимов на эксплуатационные свойства клеевых нетканых

материалов / Е. Т. Устинова, К. В. Рыбаков // Сборник статей. Труды ЦНИХБИ за 1962 г. – М. : Легкая индустрия, 1964. – С. 294-303.

99. Фигуровский Н. А. Сендиментационный анализ / Н. А. Фигуровский под ред. и с предисл. П.А. Ребиндера. – М. : АН СССР, 1948. – 332 с.

100. Фрагин М. С. Регулирование и маслоснабжение паровых турбин: настоящее и ближайшая перспектива: для инженер.-техн. персонала электростанций и турбостроит. заводов : Серия «Проблемы энергетики». Регулирование и маслоснабжение паровых турбин / М. С. Фрагин. – Санкт-Петербург : Энерготех, 2005. – Вып. 6. – 247 с.

101. Чертков Я. Б. Загрязнения и методы очистки нефтяных топлив / Я. Б. Чертков, К. В. Рыбаков, В. Н. Зрелов. – М. : Химия, 1970. – 238 с.

102. Чирков С. В. Исследование влияния загрязненности рабочей жидкости на работу насосов и гидромоторов / С. В. Чирков // Сб. Вопросы надежности гидравлических систем. – К. : КИИГА, 1964. – Вып. III. – С. 31-39.

103. Шехтман Ю. М. Фильтрация малоцентрированных суспензий / Ю. М. Шехтман. – М. : Изд-во Акад. наук СССР, 1961. – 211 с.

104. Шибряев Б. Ф. Металлокерамические фильтрующие элементы: Справочник / Б. Ф. Шибряев, Е. И. Павловская. – М. : Машиностроение, 1972. – 120 с.

105. Экспресс-анализ рабочих жидкостей и масел тракторов и сельскохозяйственных машин на промышленную чистоту / В. И. Барышев, Г. В. Пирязев, В. А. Бербер, В. Е. Соколов // Экспресс-информация. Тракторное и сельскохозяйственное машиностроение. Тракторы и двигатели : Серия 1. – М. : ЦНИИТЭИ Тракторосельхозмаш, 1984. – Вып. 7. – С. 85-90.

106. Языков А. Е. Исследование электроэрозионных повреждений моделей турбинных подшипников / А. Е. Языков, Ю. П. Николаев, Н. А. Узлова // Разработка и исследование вспомогательного оборудования турбинных установок ТЭС: сб. науч. трудов. – М. : ВТИ. Энергоатомиздат, 1991.

107. Dellis P. S. Wear Metal Concentrations Used for Enhancing Spectrometric Oil Analysis Method Credibility and Statistical Feedback - A Step Towards Big Data Analysis / P. S. Dellis // *Tribology in Industry*. – 2023. – Т. 45. – № 3. – С. 503-510.

108. GJB 420B-2015 Классификация степени загрязнения авиационных рабочих жидкостей твердыми частицами. Военный стандарт Китайской Народной Республики - Главное управление вооружения. – URL: <https://www.kptbj.net/1699000949.html> (дата обращения: 30.10.2023). – Текст : электронный.

109. Akagaki T. Ferrographic analysis of failure process in a full-scale journal bearing / T. Akagaki, K. Kato // *Wear*. – 1992. – Vol. 152. – № 2. – P. 241-252.

110. Amirkhanian H. Advances in Centrifugal Filtration / H. Amirkhanian // *Machinery Lubrication*. – 2004. – № 7. – P. 34-36.

111. Anderson D. P. A Quantitative Method for the Determination of Large Particles in Lubricating Oil Samples Using ICP Spectrometry / D. P. Anderson // *Condition Monitoring and Preventive Maintenance Conference*. – 1989.

112. Bednarz K. Lubricant Contamination Prevention and Mitigation: A Guide for Maintenance Professionals / K. Bednarz. – Text : electronic // *Machinery Lubrication*. – 2023. – № 8. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/32421/lubricant-contamination-prevention-mitigation> (date accessed: 25.10.2023).

113. Broeder J. J. Abrasive Wear of Journal Bearings by Particles in the Oil (Apparatus, Experiments and Observation) / J. J. Broeder, J. W. Heijnkemp // *Proceedings of Mechanical Engineers*. London. – 1965. – Vol. 180. – P. 36-40.

114. Cole P. W. Particle count rationalization. Paper presented of American Contaminant Control Meeting / P. W. Cole. – St. Louis, USA, 1966. – 21 p.

115. Day M. What Happened to NAS 1638? / M. Day. – Text : electronic // *Practicing Oil Analysis*. – 2002. – № 11. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/409/nas-1638> (date accessed: 25.10.2023).

116. DefStan 91-091 Issue 14. Turbine Fuel, Kerosene Type, Jet A1; NATO Code: F-35; Joint Service Designation: AVTUR. – URL: <https://www.jig.org/documents/defstan-91-091-issue-14/> (date accessed: 30.10.2023). – Text : electronic.

117. Effects of Bacterial Contamination on Steam Turbine Oil Systems / R. Winslow, W. Kemmerer, T. Naman, G. Jenneman // Tribology and Lubrication Technology. – 2005. – P. 61, 3, 26-24.

118. Evaluation of Wear Life of Journal Bearings by Contaminated Oils / S. Wantanabe, K. Saki, S. Asanabe, M. Fukutomi // Proceedings JSLE International Tribology Conference. – Tokyo, Japan, 1985. – P. 85-90.

119. Farless P. The Importance of Oil Analysis and Particle Counting / P. Farless. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2023. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/32414/importance-oil-analysis-particle-counting> (date accessed: 25.10.2023).

120. Farooq K. Scientific & Technical Report Pall Corporation. Measuring Water Content as Percent of Saturation. – URL: <https://www.pall.com/de/de/solutions/water-content.html#> (date accessed: 25.10.2023). – Text : electronic.

121. Fitch B. The Effects of Water Contamination on Oil Filters / B. Fitch. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2018. – № 6. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31179/filters-water-contamination> (date accessed: 25.10.2023).

122. Fitch J. Is Liquid Sandpaper Lurking in Your Machine? / J. Fitch. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2023. – № 7. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/32420/liquid-sandpaper-lurking-in-machine> (date accessed: 25.10.2023).

123. Fitch J. Justifying the Cost of Excluding a Gram of Dirt / J. Fitch. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2011. – № 10. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/28574/justifying-cost-of-excluding-a-gram-of-dirt-> (date accessed: 25.10.2023).

124. Fitch J. The Four States of Water in Oil / J. Fitch. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2020. – № 10. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31926/oil-in-water> (date accessed: 25.10.2023).

125. Guide to Measuring Water in Oil. – URL: <https://www.spectrosci.com/search/searchresults?ContentType=product&SearchText=Guide%20to%20Measuring%20Water%20in%20Oil&PageNo=1> (date accessed: 25.10.2023). – Text : electronic.

126. Hannon J. B. How to Select and Service Turbine Oils / J. B. Hannon. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2001. – № 7. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/210/turbine-oils> (date accessed: 25.10.2023).

127. Hiac-Royco: Model System 8011. HIAC 8011+ Industrial Laboratory Liquid Particle Counter. – URL: <https://www.beckman.com/liquid-particle-counters/hiac-8011-plus/features> (date accessed: 25.10.2023). – Text : electronic.

128. ISO 4402:1991 Hydraulic fluid power — Calibration of automatic-count instruments for particles suspended in liquids — Method using classified AC Fine Test Dust contaminant. – URL: <https://www.iso.org/ru/standard/10308.html> (date accessed: 25.10.2023). – Text : electronic.

129. Kelly Collins. Cleanliness Requirements for Journal Bearing Lubrication / Kelly Collins, John Duchowski. – Text : electronic // Practicing Oil Analysis. – 2000. – № 7. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/126/journal-bearing-contamination> (date accessed: 25.10.2023).

130. Khonsari M. How to Match Oil Filtration to Machine Requirements / M. Khonsari, E. R. Booser. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2006. – № 11. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/941/oil-filtration-machine> (date accessed: 25.10.2023).

131. Khonsari M. M. Applied Tribology-Bearing Design and Lubrication / M. M. Khonsari, E. R. Booser. – John Wiley & Sons, 2001.

132. Khonsari M. M. Effect of Contamination on the Performance of Hydrodynamic Bearings / M. M. Khonsari, E. R. Booser // Journal of Engineering Tribology. Proceedings of the IMechE. – 2006. – P. 419-428.

133. LaserNet 200 Series - Automated Wear Debris Analyzer. – URL: <https://www.spectrosci.com/product/lasernet-200-series> (date accessed: 25.10.2023). – Text : electronic.

134. Luckhurst T. Scanning Electron Microscopy for Wear Particle Identification / T. Luckhurst. – Text : electronic // Practicing Oil Analysis. – 1999. – № 9. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/45/scanning-electron-microscopy> (date accessed: 25.10.2023).

135. Naylor T. W. Microbiological investigations of turbine oil spoilage / T. W. Naylor, L. A. Brown, K. A. Powell // Tribology International. – 1982. – Vol. 15. – № 4. – P. 182-184.

136. Noria Corporation. How to Identify and Control Lubricant Contamination / Noria Corporation. – Text : electronic. – 2023. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31963/how-to-identify-and-control-lubricant-contamination> (date accessed: 25.10.2023).

137. Noria Corporation. How to Measure Water In Oil / Noria Corporation. – Text : electronic // Practicing Oil Analysis. – 2002. – № 5. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/327/water-oil-analysis> (date accessed: 31.10.2023).

138. Noria Corporation. How to Set Oil Cleanliness Targets / Noria Corporation. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2023. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/31396/oil-cleanliness-targets> (date accessed: 25.10.2023).

139. Noria Corporation. Identifying Turbine Oil Cleanliness Levels / Noria Corporation. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2023. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/28880/turbine-oil-cleanliness> (date accessed: 25.10.2023).

140. Noria Corporation. Machine Life Extension Calculator / Noria Corporation. – Text : electronic // Practicing Oil Analysis. – 1998. – № 9. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/95/machine-life-extension> (date accessed: 25.10.2023).

141. Noria Corporation. Oil Target Cleanliness Calculator / Noria Corporation. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2013. – № 10. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/29526/oil-cleanliness-targets> (date accessed: 25.10.2023).

142. Pall Corporation. Scientific & Technical Report. Principles of Filtration. WER 5300. – URL: https://www.pall.com/content/dam/pall/oil-gas/literature-library/non-gated/WER_5300B.pdf (date accessed: 25.10.2023). – Text : electronic.

143. Power Generation - Spectro Scientific. – URL: <https://www.spectrosci.com/industries/power-generation-condition-based-monitoring/> (date accessed: 25.10.2023). – Text : electronic.

144. Reintjes J. Lasernet Fines Wear Debris Analysis Technology: Application to Mechanical Fault Detection / J. Reintjes // AIP Conference Proceedings Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume 22. – Bellingham, Washington (USA) : AIP, 2003. – Vol. 657. – Labeled Fines Wear Debris Analysis Technology. – P. 1590-1597.

145. Richardson T. Contamination Control Objectives: Cleanliness and Dryness / T. Richardson. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2022. – № 10. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/32210/contamination-control-objectives-cleanliness-and-dryness> (date accessed: 29.11.2023).

146. Ronen A. Wear of Dynamically Loaded Hydrodynamic Bearings by Contaminant Particles / A. Ronen, S. Malkin, K. Loewy // Journal of Lubrication Technology. – 1980. – Vol. 102. – № 4. – P. 452-458.

147. SAE AS4059G. Contamination Classification for Hydraulic Fluids. – URL: <https://www.sae.org/standards/content/as4059g/> (date accessed: 25.10.2023). – Text : electronic.

148. Sheffield I. N. How to Use Fluid Cleanliness Standards to Drive Cost Control / I. N. Sheffield. – Text : electronic // Machinery Lubrication. – 2009. – № 11. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/2474/how-to-use-fluid-cleanliness-standards-to-drive-cost-control> (date accessed: 25.10.2023).

149. Westcott V. C. Investigation of iron content of lubricating oil using a Ferrograph and an emission spectrometer / V. C. Westcott, W. W. Seifert // *Wear*. – 1973. – Vol. 23. – № 2. – P. 239-249.

150. Wright R. Jamin Effect in Oil Production: Reply / R. Wright // *AAPG Bulletin*. – 1934. – Vol. 18. – № 4. – P. 548-549.

151. Wusthof P. Report on Colloquium on filters in Hydraulic System / P. Wusthof, P. M. A. L. Hezemans // *Hydraulic Pneumatic Power*. – 1969. – Vol. VIII. – P. 455-467.

152. Young K. A. How Desiccants Control Moisture Interferences with Optical Particle Counters / K. A. Young. – Text : electronic // *Practicing Oil Analysis*. – 2001. – № 7. – URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/196/vital-role-of-desiccants-in-controlling-moisture-interferences-with-optical-particle-counters> (date accessed: 25.10.2023).

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023617923

**Программа для определения и контроля промышленной
чистоты турбинного масла**

Правообладатель: *федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)» (RU)*

Авторы: *Пшениснов Никита Анатольевич (RU), Осинцев
Константин Владимирович (RU), Болков Ярослав
Сергеевич (RU), Исаев Виктор Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023615771

Дата поступления 29 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 17 апреля 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Технический акт проведения работ

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ
проведения работв ООО "Меря-Энерго" г. Емелинск

1. Введен в эксплуатацию прибор/проведены работы с прибором:
- | | |
|--|--------------------|
| 1.1. <u>Прибор контроля УЖ ПКЖ-904</u> | зав. № <u>2106</u> |
| 1.2. _____ | зав. № _____ |
| 1.3. _____ | зав. № _____ |
| 1.4. _____ | зав. № _____ |

2. Проведены настройки, градуировки, поверки: сборка, организация лабораторных измерений

3. Проведено обучение по МВИ: по определению вязкости масла турбинного

4. Проведены другие работы: обеспечение методическими указаниями

Прибор введен в эксплуатацию/ сдан после проведения работ 27.02 2023
Работы проводились с 27.02.23 по 27.02.23.
Вышеперечисленные работы выполнены полностью, претензий нет.

Представитель ООО НПО "Энерго Сервис"
Григорьев А.А.
27.02. 2023г.

Представитель заказчика
Комаров Р.А.
27.02 2023г.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3**Справка об использовании результатов
диссертационного исследования Пшениснова Никиты
Анатольевича при проведении
научно-исследовательской работы на ТЭЦ
ООО «МЕЧЕЛ-ЭНЕРГО»**

№ 52 от 8 апреля 2024 г.

СПРАВКА

Об использовании результатов диссертационного исследования Пшениснова Никиты Анатольевича при проведении научно-исследовательской работы на ТЭЦ ООО «МЕЧЕЛ-ЭНЕРГО».

Настоящая справка дана Пшениснову Никите Анатольевичу и подтверждает, что основные методологические и практические положения его диссертационной работы на тему: Влияние процессов загрязнения и очистки на характеристики турбинного масла в системах маслоснабжения турбоагрегатов, представленной на соискание степени кандидата технических наук по специальности: 2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели», нашли применение при проведении научно-исследовательской работы в рамках договора №74-ЗТ-33322 на ТЭЦ ООО «МЕЧЕЛ-ЭНЕРГО» по внедрению методики экспресс-контроля промышленной чистоты турбинного масла и содержания в нем эмульгированной воды, а также повышению эффективности фильтрования турбинного масла (применение новых фильтровальных материалов в фильтрах маслобака).

Применение результатов диссертационной работы Пшениснова Н. А. способствует развитию технических процессов на производстве.

Директор Челябинского
филиала ООО «МЕЧЕЛ-ЭНЕРГО»

A handwritten signature in blue ink, appearing to be the name of the director, M.P. Kamilov.

М.Р. Камиллов

ПРИЛОЖЕНИЕ 4**Справка об использовании результатов
диссертационного исследования Пшениснова Никиты
Анатольевича в учебном процессе ФГАОУ ВО
«ЮУрГУ (НИУ)»**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Политехнический институт
Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»

СПРАВКА

01.04.2024г.

№ 309-28/05

г. Челябинск

Об использовании результатов диссертационного исследования Пшениснова Никиты Анатольевича в учебном процессе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Настоящая справка дана Пшениснову Никите Анатольевичу и подтверждает, что основные методологические положения его диссертационной работы на тему: Влияние процессов загрязнения и очистки на характеристики турбинного масла в системах маслоснабжения турбоагрегатов, представленной на соискание степени кандидата технических наук по специальности: 2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели», были использованы при составлении учебного плана направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» по профилю «Промышленная теплоэнергетика» по рабочей программе дисциплины «Паровые турбины тепловых электрических станций».

Заместитель ученого секретаря

И.А. Берсенева

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Справка об использовании результатов
диссертационного исследования Пшениснова Никиты
Анатольевича в учебном процессе ФГАОУ ВО
«ЮУрГУ (НИУ)»



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

ЮУрГУ

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, e-mail: info@susu.ru, www.susu.ru
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

04.04.2024 № 309-28/08

На № _____ от _____

СПРАВКА

Об использовании результатов диссертационного исследования Пшениснова Никиты Анатольевича в учебном процессе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Настоящая справка дана Пшениснову Никите Анатольевичу и подтверждает, что основные методологические положения его диссертационной работы на тему: Влияние процессов загрязнения и очистки на характеристики турбинного масла в системах маслоснабжения турбоагрегатов, представленной на соискание степени кандидата технических наук по специальности: 2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели», были использованы в ходе учебного процесса ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», а именно при создании учебного лабораторного стенда «Лаборатория чистоты турбинного масла».

Применение результатов диссертационной работы Пшениснова Н. А. повышает качество профессиональной подготовки студентов направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» по дисциплине «Паровые турбины ТЭС».

Первый проректор-проректор по научной работе

А. В. Корзов