

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ДО И ПОСЛЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

© 2024 г. К. В. Осинцев^а, Н. А. Пшениснoв^б, А. И. Пшениснoв^{б, *}

^аЮжно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет),
просп. Ленина, д. 76, г. Челябинск, 454080 Россия

^бООО НПО “Энергосервис”, ул. Сулимова, д. 75, г. Челябинск, 454048 Россия

*e-mail: enserv@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2024 г.

После доработки 09.02.2024 г.

Принята к публикации 29.02.2024 г.

Смазочные материалы являются важнейшим элементом сопряженных пар трения и в значительной степени определяют их надежность и срок службы. Компоненты маслосистем турбин восприимчивы к загрязнению рабочей жидкости, поэтому во время работы оборудования необходимо проводить отбор проб масла и мониторинг его чистоты. Во многих случаях, когда оборудование остановлено на время технического обслуживания или находится в режиме ожидания, качеству масла не уделяется должного внимания. В конечном итоге это может повлиять на надежность работы турбины. Качество масла при выводе турбины из эксплуатации часто отличается от такового при запуске турбины. Повышение эффективности фильтрования масла играет ключевую роль в снижении скорости износа оборудования. Требования к очистке масла наиболее важны при вводе турбины в эксплуатацию, а также при ее работе на низких частотах вращения. Для очистки рабочей жидкости в процессе эксплуатации турбины необходимо применять эффективные полнопоточные фильтры. Исследования проводились на турбине Т-180/210 ЛМЗ, в качестве рабочей жидкости использовалось турбинное масло марки Тп-22С. После модернизации фильтров главного масляного бака (ГМБ) содержание твердых частиц в масле уменьшилось в 5,8 раза, чистота соответствовала классам 6–7 по ГОСТ 17216-2001. После ввода турбины в эксплуатацию после текущего ремонта в систему маслоснабжения попало большое количество загрязнений. Число твердых частиц увеличилось в 27 раз. За 14 сут эксплуатации турбины после текущего ремонта чистота масла в системе маслоснабжения возросла, а количество твердых загрязнений в нем за этот период уменьшилось примерно в 14 раз, что соответствует классу 8, а за 28 сут – примерно в 25 раз и соответствует классу 7 по ГОСТ 17216-2001. Такое повышение чистоты масла является следствием отфильтровывания загрязнений, внесенных и образовавшихся в системе во время текущего ремонта и завершения периода приработки сопряженных пар трения турбины в процессе эксплуатации. Согласно результатам исследований и обобщению данных о чистоте масла, рекомендованный уровень промышленной чистоты для гидравлической системы регулирования должен соответствовать классу 8.

Ключевые слова: паровая турбина, турбинное масло, система маслоснабжения, подшипник, рабочая жидкость, коэффициент отфильтровывания, чистота турбинного масла, маслоочистительная установка

DOI: 10.56304/S0040363624700152

Загрязнение смазочных материалов представляет серьезную угрозу для производительности и надежности оборудования. Согласно статистическим данным [1, 2], примерно 20–25% всех вынужденных простоев турбоагрегатов на электростанциях являются следствием выхода из строя (отказа) подшипников, причем доля неисправностей опор скольжения, обусловленная загрязнением смазочного материала, составляет 50–55%. Из-за неисправностей элементов маслосистемы происходит до 10% всех отказов турбоагрегатов [3]. Межотраслевое исследование, опубликованное

Национальным исследовательским советом Канады, показало, что загрязнение масла частицами становится основной причиной 82% отказов оборудования, связанных с его износом [4].

В [5] приводятся следующие данные: если повысить чистоту масла с 16/13 по ISO 4406 (классы 10–11 по ГОСТ 17216-2001) [6] до 14/11 по ISO 4406 (классы 8–9 по ГОСТ 17216-2001) [6], можно увеличить срок службы оборудования в 1,5 раза.

Понятие “ингрессия” в данном случае относится к проникновению частиц в смазочные ма-

териалы и гидравлические жидкости независимо от их источника. Источники поступления загрязнений разделяют на внешние и внутренние. В зависимости от типа оборудования скорости проникновения частиц и источники могут существенно различаться.

Производители оборудования обычно указывают нормы, регламентирующие предельные значения загрязненности смазочных материалов для обеспечения его надежной работы. В настоящее время разработано несколько стандартов, устанавливающих классы чистоты рабочей жидкости гидросистем. К таким стандартам в первую очередь следует отнести ГОСТ 17216-2001 [6].

Для оборудования, размещенного в чистых цехах, внутренние источники (износ, коррозия и т.д.) являются основными. Для многих турбин источником загрязнений становится воздух (абразивная пыль), поступающий через неплотности маслосистемы. Например, эксплуатация 10 паровых турбин угольных энергоблоков мощностью 300–500 МВт на одной из электростанций России на масле низкого качества (классы 12–17 промышленной чистоты по ГОСТ 17216-2001 [6]) привела в 2006–2007 гг. к очень дорогостоящему ремонту вкладышей подшипников турбин (около 10 млн руб/год) [7].

При эксплуатации турбины в циркуляционной системе маслоснабжения уровень чистоты масла стабилизируется. При этом предполагаются постоянная скорость поступления загрязнений (скорость ингрессии) и неизменность эффективности их удаления при очистке. Если хотя бы одно из этих условий меняется, баланс соблюдаться уже не будет и восстановится на некотором другом уровне, при котором число частиц, поступающих в масло в результате ингрессии, будет равно количеству частиц, удаленных при фильтровании. Этот режим работы называется установившимся [8]. Следовательно, подсчет количества частиц на входе фильтров и на выходе из них в установившемся режиме работы турбины может оказаться полезным для определения скорости ингрессии. Для надежной работы оборудования стабильное состояние чистоты рабочей жидкости должно находиться в пределах нормы [9].

Для оборудования наиболее разрушительные частицы в масле примерно эквивалентны по размеру рабочим зазорам зон трения (скольжения) [10, 11]. Требование к чистоте рабочих жидкостей базируется на количестве твердых частиц размерной группы 10–25 мкм, оказывающих основное влияние на снижение показателей надежности агрегатов гидросистем [12].

Поскольку компоненты систем очень восприимчивы к загрязнению рабочей жидкости, для обеспечения бесперебойной работы оборудова-

ния постоянно проводятся отбор проб масла и мониторинг его чистоты.

ИЗМЕНЕНИЕ ЧИСТОТЫ МАСЛА ПРИ ЗАПУСКЕ ТУРБИНЫ

Во многих случаях, когда оборудование остановлено на время технического обслуживания или находится в режиме ожидания, качеству масла не уделяется должного внимания, что в конечном итоге может повлиять на надежность агрегата [13]. Последствия отсутствия циркулирующего масла в системе маслоснабжения подшипников обычно не учитываются. В результате качество масла при запуске турбины зачастую отличается от такового при ее выводе из эксплуатации — оно явно ухудшается.

В паровых турбинах применяются подшипники скольжения с жидкостным трением, в которых между вращающимися и неподвижными деталями при нормальной работе имеется тонкий слой смазки. В опорном подшипнике образуется масляный клин, обеспечивающий разделение сопряженных пар трения и поддерживающий масляную пленку между валом и вкладышем.

Толщина пленки зависит от частоты вращения ротора, нагрузки на подшипник и вязкости масла. При повышении вязкости или частоты вращения толщина масляной пленки увеличивается, а при росте нагрузки или снижении частоты вращения ротора ее толщина уменьшается.

Для образования масляной пленки геометрические характеристики опорной поверхности и поверхности ротора имеют такое же важное значение, как и частота вращения ротора, нагрузка и вязкость масла. Для создания стабильного масляного клина и масляной пленки между поверхностями профили ротора и подшипника должны быть перпендикулярны.

Если одна или обе поверхности повреждаются частицами загрязнений, проходящими через подшипник, способность образовывать масляный клин снижается, что приводит к уменьшению толщины масляной пленки. В результате увеличивается коэффициент трения и повышается вероятность дополнительных повреждений поверхностей во время выбега или запуска турбины.

При вращении ротора турбины в нормальных условиях осуществляется гидродинамический режим смазки опорного и опорно-упорного подшипников. Когда же ротор вращается с низкой частотой, подшипник находится в условиях граничной смазки. В этот момент толщина масляной пленки между подшипником и ротором турбины будет минимальной. Об этом свидетельствуют повышенный износ поверхностей и очень высокие коэффициенты трения.

Поврежденные поверхности могут стать причиной выхода из строя подшипника во время запуска турбины или при вращении ротора с малой частотой до того, как появится полностью развитая гидродинамическая пленка нормальной толщины.

Особенно нежелательно попадание воды в системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбины (в турбине Т-180/210 ЛМЗ эти системы совмещены), поскольку при этом образуется масляная эмульсия, которая крайне негативно влияет на смазывающую способность масла и вызывает коррозию поверхностей.

Во время работы турбоагрегата, даже если содержание воды в масле значительно превышает допустимые нормы, стальные поверхности обычно остаются смоченными маслом и коррозия ограничена. При остановке системы смазки и регулирования вода, как правило, отделяется от масла. При сливе масла воздух проникает в систему, что приводит к увеличению количества коррозионных повреждений на внутренних поверхностях системы. Очевидно, что чем дольше система смазки не работает, тем больше времени появляется для окисления масла. Отделение воды может привести также к размножению микроорганизмов [14].

Когда турбина вводится в эксплуатацию, твердые частицы смываются потоком масла. Такие частицы могут образовываться в результате коррозии поверхностей, накапливаться в системе смазки в процессе ремонта, откладываться в «карманах» системы. Резкое изменение температуры при запуске турбины может привести к отмиранию и отделению биологического осадка, он будет легко втягиваться в поток смазочного масла и циркулировать по всей системе.

Серьезной проблемой является загрязнение системы регулирования турбины. Из-за конструктивной сложности этой системы и низкой скорости потока в трубопроводах она служит местом скопления твердых частиц.

Если турбина работает при изменяющихся во времени параметрах (нагрузки, скорости, температуры и других показателях внешних воздействий), возникают переходные процессы, которые изменяют интенсивность изнашивания сопряженных пар трения. После запуска турбины и достижения рабочей скорости показатели изнашивания сопряжений не постоянны. Период приработки сопряженных пар трения турбины после ее ремонта характеризуется изменением микрогеометрических параметров поверхностей и интенсивным отделением от поверхности трения продуктов износа. С течением времени интенсивность изнашивания снижается, приближаясь к некоторому постоянному значению (эксплуатационный износ). Продолжительность

стабилизации и сопутствующий ей износ поверхностей определяются не только внешними воздействиями и начальным состоянием сопряжения, но и свойствами материалов [15].

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ РИСКА ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЕГО ВВОДЕ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Долговечность сопряженных пар трения в значительной мере определяется частотой и правильностью выполнения запуска турбины. Именно в пусковой период износ ее деталей является наиболее интенсивным.

Повышение эффективности очистки турбинного масла играет ключевую роль в снижении риска повреждения оборудования. Наиболее жесткие требования к очистке предъявляются при вводе оборудования в эксплуатацию, а также тогда, когда частота вращения ротора турбины невысока.

Для полнопоточного фильтрования турбинного масла обычно применяют сдвоенные плоские вертикальные сетки, закрепленные в рамах и установленные в шандорах главного масляного бака (ГМБ) таким образом, что имеется возможность их периодически вынимать через люк наружу для очистки от осадка. На отечественных энергетических предприятиях чаще всего применяют металлические (латунные) тканые проволоочные сетки квадратного плетения (ГОСТ 6613-86) [16].

Исследования [17] показали, что используемые в турбоагрегатах российского производства латунные сетки не обеспечивают необходимую чистоту масла. При фильтровании обводненного масла прочность и коррозионная стойкость таких сеток недостаточны. Продукты окисления масла (в особенности низкомолекулярные кислоты) растворяют цветные металлы, из которых выполнены сетки фильтров ГМБ. В свою очередь, цветные металлы и продукты коррозии являются катализаторами окислительных процессов в масле [18, 19].

В результате анализа физико-химических свойств фильтрующих материалов, фильтрационных показателей и промышленных испытаний [9, 17, 20] для конкретных условий эксплуатации системы маслоснабжения подшипников и регулирования паровой турбины был выбран полиамидный фильтрующий материал (ПФМ). Номинальный размер ячеек ПФМ для фильтров грубой очистки составляет 450 мкм, для фильтров тонкой очистки — 250 мкм.

Для определения промышленной чистоты турбинного масла применялся метод экспресс-анализа с помощью отечественного прибора контроля чистоты жидкости ПКЖ-904 [17, 21]. Этот метод позволяет оперативно производить анализ обводненных турбинных масел, в частно-

Таблица 1. Количество частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины Т-180/210 ЛМЗ

Размер частиц, мкм	Фильтры ГМБ			
	из ПФМ		из латунной сетки	
	грязный отсек	чистый отсек	грязный отсек	чистый отсек
5–10	11 296	1991	22 869	12 769
10–25	3152	646	6788	2957
25–50	438	147	547	464
50–100	16	11	66	44
100–200	0	0	19	16
Более 200	0	0	10	9
Классы чистоты по ГОСТ 17216-2001	8–9	6–7	9–10	8–9

сти определять их промышленную чистоту, оценивать количество эмульгированной воды и предотвращать доступ загрязнений в пробу масла при проведении измерений.

Данные о чистоте масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ в процессе эксплуатации до и после замены латунных сеток на ПФМ в фильтрах ГМБ (модернизация фильтров) приведены в табл. 1.

Наиболее показательным критерием для оценки эффективности фильтров является коэффи-

циент отфильтровывания частиц i -й фракции, определяемый следующим образом [8]:

$$\Phi_i = \frac{N_{i0} - N_{if}}{N_{i0}}, \tag{1}$$

где N_{i0} , N_{if} – число частиц i -й фракции в жидкости до и после фильтра.

Этот критерий характеризует способность фильтра задерживать частицы загрязнений во всем диапазоне их размеров.

Согласно формуле (1), коэффициент отфильтровывания частиц размерами 10–25 мкм для фильтров ГМБ с ПФМ $\Phi_{\text{ПФМ}(10-25)} = 0.80$, а для фильтров из латунной сетки – $\Phi_{\text{Л.С.}(10-25)} = 0.56$.

Число твердых частиц определенного размера в фильтрате системы маслоснабжения вычисляется по формуле [10]

$$N_{if} = N_i \frac{1 - \Phi_i}{\Phi_i}, \tag{2}$$

где N_i – ингрессия твердых частиц определенного размера в рабочую жидкость за одну ее прокачку через циркуляционный контур системы маслоснабжения паровой турбины.

Зависимость между классами чистоты рабочей жидкости маслосистем по ГОСТ 17216-2001 и ингрессией твердых частиц N_i размерами 10–25 мкм в каждые 100 мл рабочей жидкости при разных значениях коэффициента отфильтровывания Φ_i для фильтров ГМБ из ПФМ и латунной сетки показана на рис. 1.

Обобщенные результаты измерений размеров и подсчета числа твердых частиц, загрязняющих масло, в чистом отсеке ГМБ приведены на рис. 2.

После замены латунной сетки на ПФМ в фильтрах ГМБ число твердых частиц размерами более 5 мкм в масле уменьшилось в 5.8 раза, чистота соответствовала классам 6–7 (ГОСТ 17216-2001 [6]), а

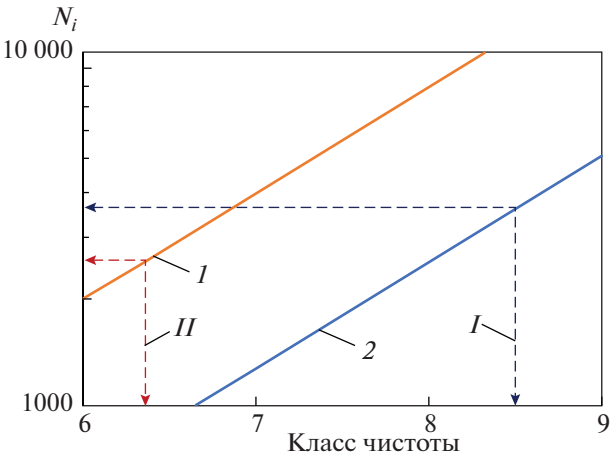


Рис. 1. Зависимость между классами чистоты масла (по ГОСТ 17216-2001) и ингрессией твердых частиц N_i размером 10–25 мкм для системы маслоснабжения турбины Т-180/210 ЛМЗ. Штриховые линии соответствуют установившемуся режиму. Установившийся режим до модернизации фильтров ГМБ (I) и после их модернизации (II).
Коэффициент отфильтровывания: $I - \Phi_{\text{ПФМ}(10-25)} = 0.8$; $2 - \Phi_{\text{Л.С.}(10-25)} = 0.56$

количество эмульгированной воды (капель воды размерами более 25 мкм) сократилось в 4.7 раза [17]. Таким образом, применение ПФМ для обезвоживания турбинного масла более эффективно, чем латунной сетки.

Наиболее универсальным и распространенным методом снижения риска повреждения оборудования при его вводе в эксплуатацию является использование маслоочистительных установок (МОУ) [7]. Для удобства эксплуатации их выполняют либо стационарными, либо передвижными. Наряду с фильтрованием МОУ может обеспечивать удаление из масла воды. Для этого в состав МОУ добавляют дегидратор. Такую установку можно подключить к ГМБ (через байпас), чтобы обеспечить безопасный возврат оборудования в эксплуатацию после технического обслуживания [22].

Эффективность включения МОУ в систему маслоснабжения турбины можно оценить по формуле [9]

$$\varphi_i = \varphi_{i\text{ГМБ}} + b(\varphi_{i\text{МОУ}} - \varphi_{i\text{ГМБ}}), \quad (3)$$

где $b = Q_{\text{МОУ}}/Q$ — коэффициент байпаса; $Q_{\text{МОУ}}$, Q — расход масла на МОУ (байпас) и общий расход масла; $\varphi_{i\text{МОУ}}$ и $\varphi_{i\text{ГМБ}}$ — коэффициенты отфильтровывания частиц i -й фракции для фильтров МОУ и ГМБ.

Зависимость коэффициента отфильтровывания твердых частиц φ_i турбинного масла в системе маслоснабжения на работающей турбине при использовании МОУ от коэффициента байпаса b для различных значений $\varphi_{i\text{МОУ}}$ при $\varphi_{i\text{ГМБ}} = 0.8$ показана на рис. 3.

К недостаткам МОУ могут быть отнесены: высокая стоимость, периодичность работы и повышенные эксплуатационные расходы [7].

Кроме того, перед вводом турбины в эксплуатацию рекомендуется промыть систему маслоснабжения для обеспечения максимальной защиты поверхностей от абразивного износа в критических условиях запуска [7, 22].

Как показали наблюдения [22], емкости для хранения масла и перекачивающее оборудование также нередко являются источниками загрязнения твердыми частицами. Фактически, даже в свежем масле могут содержаться загрязняющие вещества. Доливка нового масла без очистки приводит к повреждению оборудования. Если необходимо долить или заменить масло, то его чистоту следует довести до нормативных показателей, а лучше — на один класс выше [23].

Опыт эксплуатации турбин показал, что их долговечность и эксплуатационная надежность в значительной степени зависят от состояния и физико-механических свойств поверхностных слоев сопрягаемых деталей, где происходят процессы

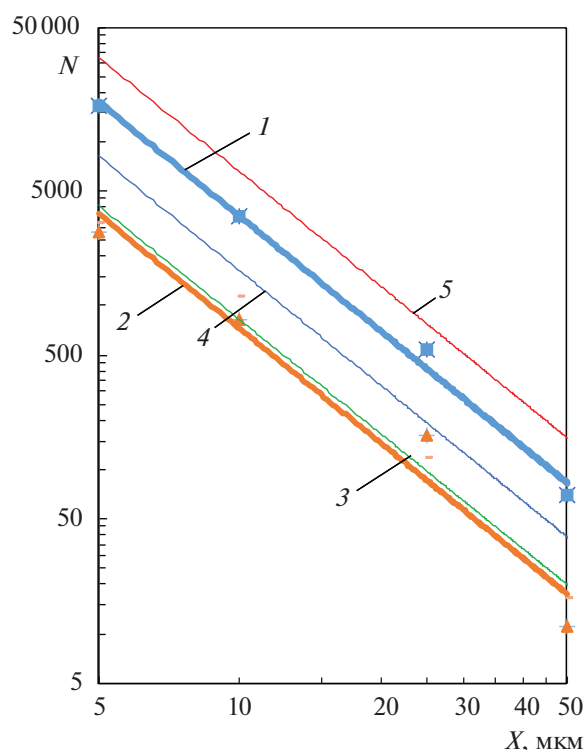


Рис. 2. Распределение общего числа частиц в 100 мл пробы по размерам частиц X в турбинном масле турбины Т-180/210 ЛМЗ.

1 — фильтрат из чистого отсека ГМБ с фильтрами из латунной сетки; 2 — то же с фильтрами из ПФМ; класс по ГОСТ 17216-2001: 3 — 7; 4 — 8; 5 — 10

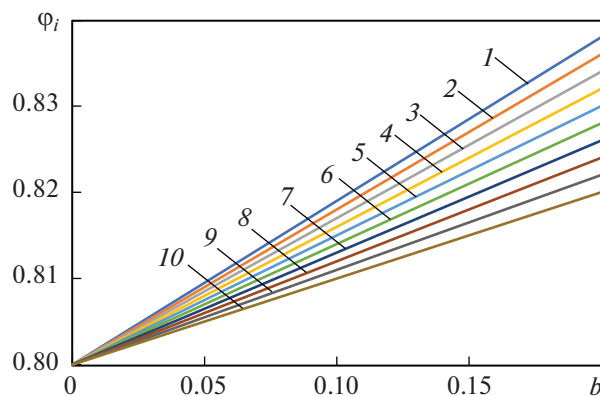


Рис. 3. Зависимость коэффициента отфильтровывания твердых частиц φ_i системы очистки от коэффициента байпаса b при $\varphi_{i\text{ГМБ}} = 0.8$.

$\varphi_{i\text{МОУ}}$: 1 — 0.99; 2 — 0.98; 3 — 0.97; 4 — 0.96; 5 — 0.95; 6 — 0.94; 7 — 0.93; 8 — 0.92; 9 — 0.91; 10 — 0.90

износа. В связи с этим важное значение приобретают операции обработки и сборки деталей (высокая точность и качество поверхностей ответственных сопряжений) [15].

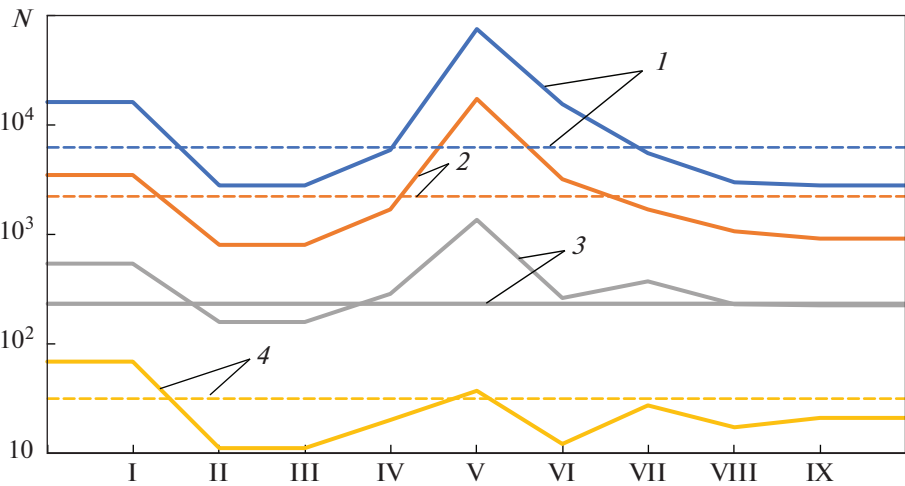


Рис. 4. Изменение содержания твердых частиц N , имеющих размеры больше, чем указанные (накопленный счет) в 100 мл пробы, в масле после модернизации фильтров ГМБ, а также до и после текущего ремонта и замены масла в маслосистеме турбины Т-180/210 ЛМЗ. Штриховые линии соответствуют классу 8 чистоты масла по ГОСТ 17216-2001 (нормативный уровень) для частиц определенного размера. Размер частиц, мкм: 1 – более 5; 2 – более 10; 3 – более 25; 4 – более 50; I – до модернизации фильтров ГМБ; II – спустя 7 сут после модернизации фильтров ГМБ; III – перед остановкой на текущий ремонт; IV – замена масла на свежее во время текущего ремонта; V – ввод в эксплуатацию после текущего ремонта; в эксплуатации: VI – 7 сут; VII – 14 сут; VIII – 28 сут; IX – 35 сут

**ЧИСТОТА ТУРБИННОГО МАСЛА
ДО И ПОСЛЕ ТЕКУЩЕГО
РЕМОНТА ТУРБИНЫ**

Данные о чистоте масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ до и после модернизации фильтров ГМБ, загрязненность масла до и после текущего ремонта и замены масла, а также данные о промышленной чистоте свежего масла Тп-22С

из емкости маслохозяйства для замены после текущего ремонта приведены в табл. 2.

Рисунок 4 иллюстрирует изменение содержания твердых частиц определенного размера после модернизации фильтров ГМБ, а также загрязненность масла до и после текущего ремонта и замены масла в турбоагрегате Т-180/210 ЛМЗ.

Как видно на рис. 4, после ввода в эксплуатацию турбоагрегата при завершении текущего

Таблица 2. Количество частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбины Т-180/210 ЛМЗ (чистый отсек ГМБ)

Размер частиц, мкм	До модернизации фильтров ГМБ	7 сут после модернизации фильтров ГМБ до текущего ремонта	Текущий ремонт (замена на свежее масло Тп-22С)	После текущего ремонта				
				ввод в эксплуатацию	в эксплуатации, сут			
					7	14	28	35
5–10	12769	1991	4122	57922	12412	3822	1900	1884
10–25	2957	646	1416	16021	2906	1312	829	683
25–50	464	147	263	1317	247	346	209	202
50–100	44	11	18	33	8	23	15	19
100–200	16	0	1	2	2	3	1	1
Более 200	9	0	1	2	2	1	1	1
Классы чистоты по ГОСТ 17216-2001	8–9	6–7	7–8	11–12	8–9	7–8	6–7	6–7

ремонта в систему попало большое количество загрязняющих веществ. Число твердых частиц размерами более 5 мкм в масле (в чистом отсеке ГМБ) увеличилось в 27 раз. Стоит отметить, что количество эмульгированной воды практически не изменилось.

Чистота масла в системе за 14 сут эксплуатации турбины после текущего ремонта возросла, а число твердых загрязнений в нем за этот период уменьшилось почти в 14 раз и соответствует классу 8 по ГОСТ 17216-2001 [6], а за 28 сут — приблизительно в 25 раз и соответствует классу 7 по ГОСТ 17216-2001 [6]. Такое повышение чистоты масла является следствием отфильтровывания загрязнений, внесенных и образовавшихся в системе во время текущего ремонта и завершения периода приработки сопряженных пар трения турбины.

Необходимо заметить, что аналитическая зависимость, показанная на рис. 1, подтверждается практикой, из которой следует, что эффективно работающие фильтры ГМБ ($\Phi_{\text{ПФМ}(10-25)} = 0.8$) в системе маслоснабжения подшипников и регулирования паровых турбин не обеспечивают промышленную чистоту масла, соответствующую классу 8 по ГОСТ 17216-2001 [6] (см. рис. 4), если ингрессия твердых частиц загрязнений размерами 10–25 мкм N_i в каждые 100 мл жидкости составляет более 8000 (чаще всего при повышенном износе подшипников, а также низком качестве масла, ремонта и т. д.).

Наблюдения показали, что при эксплуатации турбины Т-180/210 ЛМЗ после текущего ремонта, когда промышленная чистота масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования была ниже класса 8 по ГОСТ 17216-2001 [6], чувствительность системы регулирования несколько снизилась (увеличилось время срабатывания золотников) [16].

Первым шагом при определении показателей чистоты для гидравлической системы является установление самого критичного узла (подшипники, сервоприводы, золотники и т. д.). Необходимо поддерживать уровень чистоты рабочей жидкости для надежной работы наиболее чувствительных элементов. В противном случае они должны быть защищены дополнительными фильтрами.

Из-за загрязнения рабочей жидкости гидравлические системы регулирования турбин подвергаются гораздо большему риску выхода из строя, чем подшипники. Поэтому к показателям чистоты совмещенных систем маслоснабжения подшипников и регулирования предъявляются довольно жесткие требования. Гидравлическое масло должно быть в 2–4 раза чище смазочного [24]. Например, рекомендуемый уровень чистоты для гидравлических систем регулирования может соответствовать классу 8, что будет намного выше,

чем для смазывания подшипников — класс 10 (по ГОСТ 17216-2001 [6]) [25].

По данным американской компании Noria Corporation [26], рекомендуемый уровень промышленной чистоты масла для паровых турбин соответствует классу 8 по ГОСТ 17216-2001 [6], такой же класс рекомендуется для рабочей жидкости в системе электрогидравлического управления.

Таким образом, в результате исследования и обобщения данных о чистоте масла установлено [9], что для совмещенных систем маслоснабжения подшипников и регулирования турбин (в чистом отсеке ГМБ) необходимо обеспечить класс чистоты 8 по ГОСТ 17216-2001 [6].

ВЫВОДЫ

1. Причинами повышенной загрязненности турбинного масла во время ввода турбины в эксплуатацию после ее останова для технического обслуживания являются повреждения поверхностей трения в условиях граничной смазки, дефекты на внутренних поверхностях системы, обусловленные коррозией, загрязнения, вносимые в процессе ремонта, отмирание и отделение биологического осадка, приработка сопряженных пар трения.

2. Для снижения риска повреждения оборудования при его вводе в эксплуатацию необходимо применять более эффективные штатные фильтры ГМБ, использовать дополнительные средства очистки, промывать систему маслоснабжения во время ремонта, очищать свежее масло до нормативных показателей чистоты перед его заливкой в систему, повышать качество ремонта оборудования.

3. После модернизации штатных фильтров ГМБ (замены латунной сетки на ПФМ) количество твердых частиц размерами более 5 мкм в масле уменьшилось в 5.8 раза, чистота соответствовала классам 6–7 (ГОСТ 17216-2001 [6]), а количество эмульгированной воды (капель воды размерами более 25 мкм) сократилось в 4.7 раза [17].

4. Оценка эффективности применения дополнительных средств очистки (МОУ) в процессе эксплуатации турбоагрегата показал, что к недостаткам МОУ могут быть отнесены высокая стоимость, периодичность работы и повышенные эксплуатационные расходы.

5. Причина отказов в системе регулирования турбины и повышенного износа подшипников после текущего ремонта — высокий уровень загрязненности рабочей жидкости — турбинного масла (классы 11–12 по ГОСТ 17216-2001).

6. Для совмещенных систем маслоснабжения подшипников и регулирования турбин рекомендуется в чистом отсеке ГМБ использовать турбинное масло класса 8 промышленной чистоты (ГОСТ 17216-2001).

7. Затраты на очистку масла могут быть компенсированы снижением затрат на техническое обслуживание и замену поврежденного оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Анализ** показателей надежности турбоустановок и энергоблоков в целом АО “Свердловэнерго” / Ю.М. Бродов, Б.Е. Мурманский, М.М. Мительман, Г.Д. Бухман, В.А. Зайцев, Р.Н. Гринфельд // Теплоэнергетика. 1997. № 1. С. 9–14.
2. **Дюфрейн К.Ф., Кеннел И.В., Маклюски Т.Х.** Износ радиальных подшипников паровых турбин при малых рабочих скоростях // Проблемы трения. 1983. Т. 105. № 5. С. 42–45.
3. **Гвоздев В.С.** Обводнение турбинного масла и средства контроля и защиты его от влаги на турбогенераторах ТЭС: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003.
4. **Noria Corporation.** How to identify and control lubricant contamination // Mach. Lubr., 2023. <https://www.machinerylubrication.com/Read/31963/how-to-identify-and-control-lubricant-contamination> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 25.10.2023.)
5. **Noria Corporation.** Identifying turbine oil cleanliness levels // Mach. Lubr., 2023. <https://www.machinerylubrication.com/Read/28880/turbine-oil-cleanliness> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 25.10.2023.)
6. **ГОСТ 17216-2001.** Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. Переизд. по состоянию на 05.2008. М.: Стандартинформ, 2008.
7. **Бахметов З.А., Неуймин В.М.** Анализ способов очистки маслопроводов и установок очистки турбинных масел турбоагрегатов ТЭС // Надежность и безопасность энергетики. 2008. № 3. С. 50–58.
8. **Осинцев К.В., Пшенисноров Н.А., Пшенисноров А.И.** Процессы загрязнения и очистки турбинного масла в системах смазки паровых турбин // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2022. Т. 22. № 3. С. 83–89.
9. **Осинцев К.В., Пшенисноров Н.А., Пшенисноров А.И.** Анализ эффективности очистки турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов и модернизация рамных фильтров // Энергетик. 2022. № 11. С. 45–49.
10. **Broeder J.J., Heijnkemp J.W.** Abrasive wear of journal bearings by particles in the oil (apparatus, experiments and observation) // Proc. Inst. Mech. Eng., Conf. Proc. 1965. V. 180. Is. 11. P. 36–40. https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1965_180_316_02
11. **Collins K., Duchowski J.** Cleanliness requirements for journal bearing lubrication Mach. Lubr., 2000. <https://www.machinerylubrication.com/Read/126/journal-bearing-contamination> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 25.10.2023.)
12. **Барышев В.И.** Классификация, контроль и нормирование промышленной чистоты рабочих жидкостей и масел // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2005. № 1. С. 149–161.
13. **Jennings C.** How oil quality changes during startup // Mach. Lubr. 2013. No. 10. <https://www.machinerylubrication.com/Read/29530/startup-oil-quality> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 16.12.2023.)
14. **Naylor T.W., Brown L.A., Powell K.A.** Microbiological investigations of turbine oil spoilage // Tribol. Int. 1982. V. 15. No. 4. P. 182–184. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(82\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0301-679X(82)90003-2)
15. **Карасик И.И.** Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения: дис. ... докт. техн. наук. М., 1983.
16. **Казанский В.Н.** Системы смазывания паровых турбин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986.
17. **Осинцев К.В., Пшенисноров Н.А., Пшенисноров А.И.** Комплекс мер по повышению чистоты турбинного масла // Электрические станции. 2023. № 2. С. 38–43.
18. **Петриченко А.Д.** Эффективность существующей системы контроля турбинного масла // Электрические станции. 1988. № 7. С. 41–44.
19. **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.
20. **Осинцев К.В., Пшенисноров Н.А., Пшенисноров А.И.** Эффективность многоступенчатого фильтрования турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов // Теплоэнергетика. 2023. № 9. С. 28–34. <https://doi.org/10.56304/S0040363623080076>
21. **Прибор** для определения содержания механических загрязнений в жидкости ПКЖ-904А. <http://tesar.ru/production/control/pkg904a/> [Электронный ресурс.] (Дата обращения: 25.10.2023.)
22. **Отчет** заседания подсекции “Тепломеханическое оборудование” НП “НТС ЕЭС” по теме: “Разработка и внедрение маслоочистительного комплекса на электростанциях”. М., 2009. Режим доступа: <https://nts-ees.ru/sites/default/files/sekcija9/maslootchiska.pdf> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 25.10.2023.)
23. **Sheffield I.N.** How to use fluid cleanliness standards to drive cost control // Mach. Lubr. 2009. No. 11. <https://www.machinerylubrication.com/Read/2474/how-to-use-fluid-cleanliness-standards-to-drive-cost-control> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 25.10.2023.)
24. **Noria Corporation.** How to set oil cleanliness targets // Mach. Lubr., 2023. <https://www.machinerylubrication.com/Read/31396/oil-cleanliness-targets> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 25.10.2023.)
25. **Richardson T.** Contamination control objectives: cleanliness and dryness // Mach. Lubr. 2022. No. 10. <https://www.machinerylubrication.com/Read/32210/contamination-control-objectives-cleanliness-and-dryness> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 29.11.2023.)
26. **Noria Corporation.** Oil target cleanliness calculator // Mach. Lubr. 2013. No. 10. <https://www.machinerylubrication.com/Read/29526/oil-cleanliness-targets> [Электрон. ресурс.] (Дата обращения: 25.10.2023.)

Analysis of Operation of the Oil-Supply System of Steam Turbine T-180/210 LMZ before and after Maintenance

K. V. Osintcev^a (ORCID: 0000-0002-0791-2980), N. A. Pshenishnov^b, and A. I. Pshenishnov^{b, *}

^a South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, 454080 Russia

^b OOO NPO Energoservice, Chelyabinsk, 454048 Russia

*e-mail: enserv@mail.ru

Abstract—Lubricants are the most important element of mating friction pairs and largely determine their reliability and service life. Components of oil systems of turbine units are susceptible to contamination of the working fluid; therefore, during equipment operation, it is necessary to take oil samples and monitor cleanliness. In many cases, when equipment is stopped for maintenance or is in standby mode, the quality of the oil is not given due attention. Ultimately, this may affect the reliability of the unit. The quality of the oil when starting a turbine is often not the same as when the unit is taken out of service. Increasing filtration efficiency plays a key role in reducing wear rates. Cleaning requirements are most important during turbine commissioning and when equipment is spinning at low speeds. To clean the working fluid during operation, effective full-flow filters are required. The research was carried out on a T-180/210 LMZ turbine unit; Тр-22S turbine oil was used as the working fluid, and the volume of the oil system was 36 m³. After modernizing the filters of the main oil tank (MOT), solid particles in the oil decreased by 5.8 times, the purity corresponds to class six to seven by GOST 17216-2001. After the turbine unit was put into operation after routine repairs, a large amount of contaminants entered the system. The amount of solid particles in the oil increased 27 times. The purity of the oil in the system increased over 14 days of operation of the turbine after routine repairs, and solid contaminants in it during this period decreased by approximately 14 times and corresponds to class eight, and that over 28 days was by approximately 25 times and corresponds to class seven according to GOST 17216-2001. This increase in oil purity is a consequence of filtering out contaminants introduced and formed in the system during routine repairs and the completion of the running-in period of the associated turbine friction pairs. The most sensitive element of the oil system is the control system. As a result of research and compilation of oil-cleanliness data, the recommended level of industrial cleanliness for the hydraulic control system is class eight (GOST 17216-2001). The most common method of reducing the risk to equipment during commissioning operation is the use of additional oil-purification equipment. Oil-purification costs can be offset by reduced maintenance costs and replacement of damaged equipment.

Keywords: steam turbine, turbine oil, turbine oil supply, working fluid