

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ
ТУРБИННОГО МАСЛА В СИСТЕМЕ
МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ТУРБОАГРЕГАТОВ

© 2023 г. К. В. Осинцев^{а, *}, Н. А. Пшениснов^{а, b}, А. И. Пшениснов^b

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

^bНаучно-производственное объединение “ЭнергоСервис”, ул. Сулимова, д. 75, г. Челябинск, 454048 Россия

*e-mail: enserv@mail.ru

Поступила в редакцию 17.01.2023 г.

После доработки 09.02.2023 г.

Принята к публикации 01.03.2023 г.

Для очистки турбинного масла систем маслоснабжения отечественных турбоагрегатов используют многоступенчатые сетчатые фильтры, которые устанавливают в главном масляном баке (ГМБ). При эксплуатации энергетического оборудования загрязнения непрерывно поступают в гидравлическую систему и удаляются фильтрами. В статье проанализированы изменение коэффициента пропускания W_i в процессе многоступенчатого фильтрования и его влияние на чистоту масла в работающей системе. Эффективность последовательно установленных фильтров описана степенной функцией, в которой основанием является коэффициент пропускания частиц отдельной ступени W_{in} (при условии $W_{in} = \text{const}$ для всех ступеней фильтрования), а показателем — число ступеней фильтрования n . Представлены результаты модернизации фильтров маслобака на турбоагрегате К-200-12.8 ЛМЗ Южноуральской ГРЭС. Вместо латунных тканых сеток был установлен фильтрующий материал из полиамидных мононитей (полиамидный фильтрующий материал). После модернизации фильтров чистота масла в системе маслоснабжения повысилась, количество твердых частиц размерами более 10 мкм в нем уменьшилось в 68 раз, количество воды снизилось примерно в 3 раза; промышленная чистота соответствовала классу 8 (ГОСТ 17216-2001). Рассмотрена работа фильтров грубой и тонкой очистки с одной и двумя ступенями на Южноуральской ГРЭС. При переходе от одноступенчатого фильтрования к двухступенчатому чистота масла стала выше, а количество твердых частиц размерами более 5 мкм уменьшилось в нем в 3 раза, содержание воды в масле — приблизительно в 12 раз. Отмечено, что чистота фильтрата существенно повысилась благодаря увеличению числа ступеней фильтрования.

Ключевые слова: паровая турбина, турбинное масло, многоступенчатые сетчатые фильтры маслобака, маслоснабжение турбоагрегата, рабочая жидкость, коэффициент пропускания частиц

DOI: 10.56304/S0040363623080076

Анализ отказов, дефектов, повреждений энергетического оборудования свидетельствует о том, что до 25% случаев связаны с нарушениями в системе маслоснабжения и снижением качества турбинного масла. Производственный опыт показывает, что только благодаря качественной очистке рабочей жидкости долговечность гидравлических систем и оборудования увеличивается в 2–3 раза [1–3].

В работе [4] приведены сведения, о том, что повышение чистоты масла с 16/13 по ISO 4406 (класс 10–11 по ГОСТ 17216-2001) до 14/11 по ISO 4406 (класс 8–9 по ГОСТ 17216-2001) увеличивает срок службы оборудования в 1.5 раза.

Присутствие твердых частиц загрязнений в рабочей жидкости является естественным состоянием для гидравлической системы. Такие загрязнения генерируются самой работающей системой (тяжело нагруженными сопряженными парами трения — подшипниками и т. д.), поэтому нормы чистоты рабочей жидкости систем определяют, исходя из чувствительности их именно к твердым частицам загрязнений [5].

Содержание механических примесей в масле в процессе эксплуатационного износа системы регулирования, подшипников, гидравлических установок для подъема роторов турбоагрегатов находится в установленных пределах. Повышение этого уровня свидетельствует об изменении

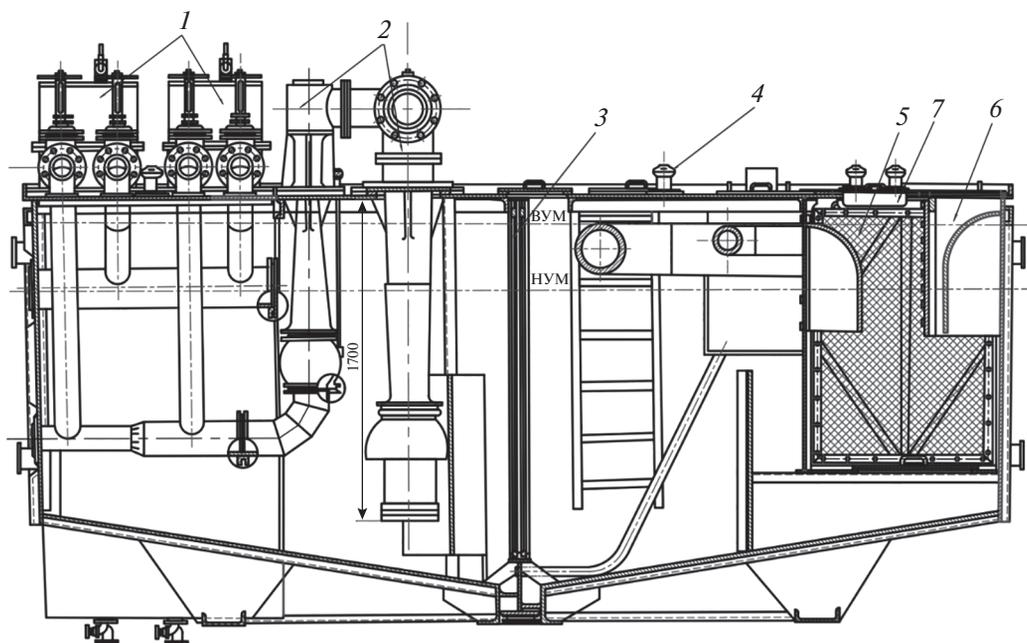


Рис. 1. Главный масляный бак ТМЗ вместимостью 22 м³.

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

условий эксплуатации вследствие загрязненности рабочей жидкости (масла) или об аварийном износе элементов системы (при электроэрозионном износе подшипников, а также низком качестве масла, ремонте и т. д.) [6–8].

Количество частиц, попадающих в масляную систему, равно количеству частиц, улавливаемых фильтром, таким образом достигается стабилизированный и контролируемый уровень чистоты масла [9, 10].

Для полнопоточного фильтрования турбинного масла на турбоагрегатах отечественного производства используют сетчатые фильтры с перегородками из латунных тканых проволочных сеток квадратного плетения (ГОСТ 6613-86). Сетки, закрепленные в рамах и установленные в шандорах главного масляного бака, изображенного на рис. 1, не всегда обеспечивают необходимую (нормативную) чистоту рабочей жидкости и имеют ограниченный ресурс из-за коррозии, недостаточной прочности и износостойкости [6, 10].

Продукты окисления (в основном низкомолекулярные кислоты) растворяют цветные металлы сеток фильтров маслобака, что приводит к утрате ими механических характеристик, а следовательно, и эффективности фильтрования. Цветные металлы и продукты коррозии являются катализаторами окислительных процессов в масле [8].

Результаты промышленной эксплуатации показывают, что фильтрующие перегородки в маслобаке турбоагрегата служат не только для удаления твердых примесей, но и задерживают диспергированную в масле воду.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГООРУПЕНЧАТЫХ ФИЛЬТРОВ МАСЛОБАКА

Фильтры, установленные в маслобаке турбины, как правило, работают в режиме многоступенчатого фильтрования [двухступенчатые фильтры грубой очистки (ФГО) и двухступенчатые фильтры тонкой очистки (ФТО)]. Задача исследования состояла в оценке влияния числа ступеней фильтрования на чистоту масла в системе.

Определение эффективности многоступенчатого фильтрования

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 (рис. 1). По мере загрязнения фильтров перепад давления на фильтрующих перегородках возрастает. При достижении критических значений перепада давле-

ния необходимо производить очистку фильтров [10, 11].

Эффективность работы фильтра определяют с помощью коэффициента пропускания частиц i -й фракции:

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

где

$$\varphi_i = \frac{N_{i0} - N_{in}}{N_{i0}} \quad (2)$$

– фракционный коэффициент отсева, характеризующий степень снижения концентрации частиц отдельной фракции; N_{i0} , N_{in} – число частиц i -й фракции в жидкости до и после фильтра.

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:

$$N_{i1} = N_{i0}(1 - \varphi_{i1}); \quad (3)$$

$$N_{i2} = N_{i0}(1 - \varphi_{i1})(1 - \varphi_{i2}); \quad (4)$$

$$N_{i3} = N_{i0}(1 - \varphi_{i1})(1 - \varphi_{i2})(1 - \varphi_{i3}); \quad (5)$$

$$N_{in} = N_{i0} \prod_{n=1}^{\infty} (1 - \varphi_{in}). \quad (6)$$

Коэффициент пропускания частиц при многоступенчатом фильтровании можно вычислить по выражениям

$$W_i = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - \varphi_{in}); \quad (7)$$

$$W_i = \prod_{n=1}^{\infty} W_{in}. \quad (8)$$

При условии $\varphi_{in} = \text{const}$ ($W_{in} = \text{const}$) формулы (7) и (8) приобретают вид

$$W_i = (1 - \varphi_{in})^n; \quad (9)$$

$$W_i = W_{in}^n. \quad (10)$$

Зависимость коэффициента пропускания твердых частиц W_i многоступенчатого фильтра от коэффициента пропускания ступени W_{in} при различном количестве ступеней фильтрования n -й показана на рис. 2.

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),

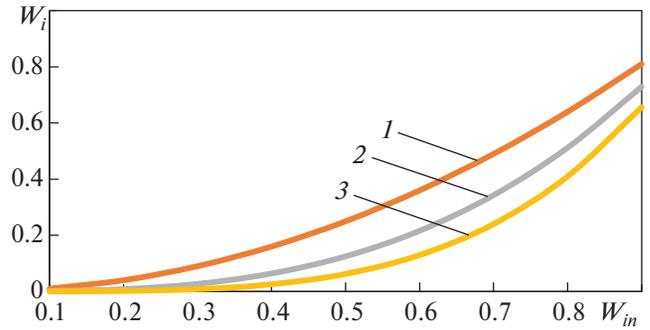


Рис. 2. Зависимость коэффициента пропускания твердых частиц W_i многоступенчатого фильтра от коэффициента пропускания частиц n -й ступени W_{in} при двух (1), трех (2) и четырех (3) ступенях фильтрования

а показателем – количество ступеней фильтрования n [10].

Влияние многоступенчатого фильтрования на чистоту рабочей жидкости в системе маслоснабжения турбоагрегата

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.

Скорость поступления загрязнений в масло при установившемся режиме работы турбоагрегата и неизменных внешних условиях можно считать постоянной и не зависящей от работы гидросистемы. Поступление твердых частиц i -й фракции в рабочую жидкость за одну ее прокачку через циркуляционный контур системы смазки паровой турбины составляет $K_i = \text{const}$. Число твердых частиц i -й фракции в фильтрате определяется по формуле [9, 10]

$$K_{i\phi} = K_i \frac{W_i}{1 - W_i}. \quad (11)$$

При многоступенчатой фильтрации число твердых частиц i -й фракции в фильтрате (при условии $W_{in} = \text{const}$ для всех ступеней фильтрования):

$$K_{i\phi n} = K_i \frac{W_{in}^n}{1 - W_{in}^n}. \quad (12)$$

Кратность уменьшения количества твердых частиц в фильтрате в зависимости от количества

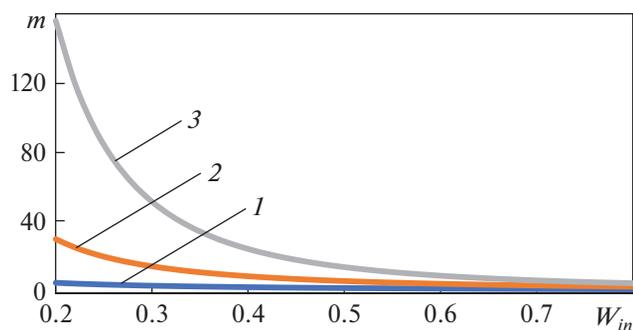


Рис. 3. Кратность уменьшения количества твердых частиц m в фильтрате в зависимости от коэффициента пропускания частиц n -й ступени W_{in} при двух (1), трех (2) и четырех (3) ступенях фильтрования

ступеней фильтрования n вычисляется по выражению

$$m = \frac{K_{i\phi 1}}{K_{i\phi n}} = \frac{1 - W_{in}^n}{W_{in}^{n-1} - W_{in}^n}, \quad (13)$$

где $K_{i\phi 1}$ – число твердых частиц i -й фракции в фильтрате при одноступенчатом фильтровании.

Зависимость показателя m от W_{in} для n ступеней фильтрования показана на рис. 3.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ФИЛЬТРОВАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ МАСЛОБАКА

Латунные сетки, закрепленные в рамах и установленные в шандорах ГМБ, имеют ограниченный ресурс из-за коррозии, недостаточной прочности и

износостойкости и, как правило, не обеспечивают нормативную чистоту рабочей жидкости [6, 10].

На турбоагрегате К-200-12.8 ЛМЗ Южноуральской ГРЭС была произведена модернизация фильтров маслобака. Вместо латунных тканых сеток был установлен фильтрующий материал из полиамидных мононитей [6, 10].

Авторами были проведены сравнительные испытания латунных сеток и полиамидного фильтрующего материала в качестве фильтрующих перегородок в фильтрах грубой и тонкой очистки в условиях эксплуатации системы маслоснабжения подшипников и регулирования.

Контроль качества очистки масла от твердых загрязнений и воды путем анализа отдельных проб осуществлялся прибором ПКЖ-904 в лаборатории чистоты по методике, разработанной ОАО “УралВТИ” и Научно-производственным объединением “ЭнергоСервис” [12, 13].

На турбоагрегате выполнялась также оценка эффективности работы фильтров грубой и тонкой очистки с одной и двумя ступенями.

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 табл. 1, а капель воды – в табл. 2.

Таблица 1. Промышленная чистота турбинного масла в системе маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата К-200-12.8 ЛМЗ

Размер частиц, мкм	Число частиц твердых загрязнений в 100 мл турбинного масла (чистый отсек ГМБ)		
	латунная сетка	полиамидный фильтрующий материал	
		двухступенчатый фильтр	одноступенчатый фильтр
5–10	–	6189	19 191
10–25	56 248	908	3 579
25–50	18 264	144	320
50–100	1 364	35	53
100–200	205	9	15
Более 200	78	16	6
Класс чистоты	14	7–8	9–10

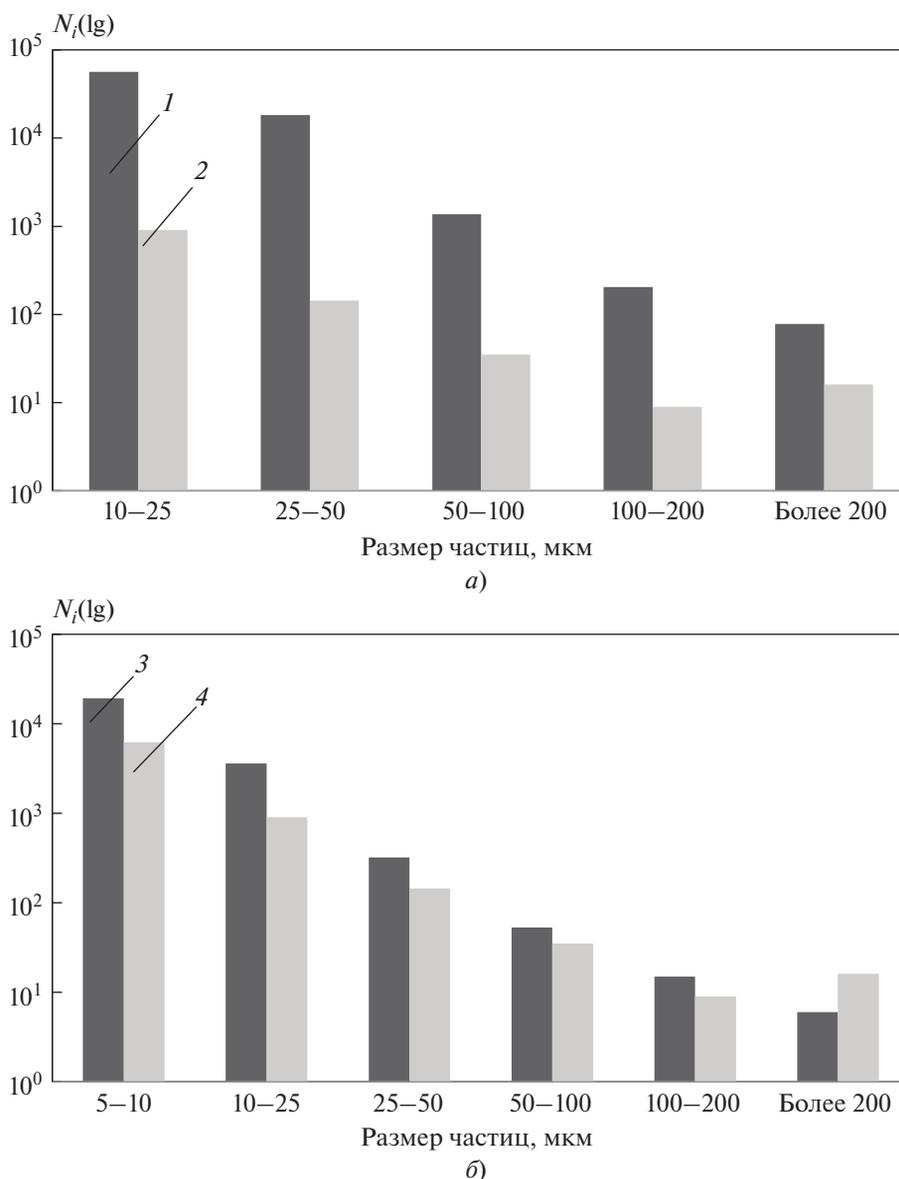


Рис. 4. Зависимость количества твердых частиц размером от 5 до 200 мкм $N_i(\lg)$ в 100 мл пробы масла (класс чистоты по ГОСТ 17216-2001) из системы смазки подшипников турбоагрегата К-200-12.8 ЛМЗ (ГМБ, чистый отсек) от фильтрующего материала (а) и числа ступеней фильтрации (б).

Фильтрующий материал: 1 – латунная тканая сетка (две ступени фильтрации); 2 – изготовленный из полиамидных мононитей (две ступени фильтрации).

Число ступеней фильтрации: 3 – одна; 4 – две

Обобщенные результаты определения размеров и количества твердых частиц, загрязняющих масло, до и после модернизации фильтров ГМБ представлены на рис. 4, а, а данные о работе фильтров в одну и две ступени фильтрации – на рис. 4, б.

После модернизации фильтров грубой и тонкой очистки изменилась чистота масла в системе маслоснабжения турбоагрегата К-200-12.8 ЛМЗ: количество твердых частиц размерами более 10 мкм

в пробах из чистого отсека ГМБ уменьшилось в 68 раз, количество воды в масле снизилось приблизительно в 3 раза; промышленная чистота соответствует классу 8 (ГОСТ 17216-2001).

При переходе от одноступенчатого фильтрации к двухступенчатому чистота масла стала выше, а количество в нем твердых частиц размерами более 5 мкм уменьшилось в 3 раза, количество воды – приблизительно в 12 раз.

Таблица 2. Концентрация и дисперсность водяных капель в турбинном масле системы маслоснабжения подшипников и регулирования турбоагрегата К-200-12.8 ЛМЗ

Размер капель, мкм	Число капель воды в 100 мл турбинного масла (чистый отсек ГМБ)		
	латунная сетка	полиамидный фильтрующий материал	
		двухступенчатый фильтр	одноступенчатый фильтр
5–10	—	—	—
10–25	—	—	—
25–50	30220	70646	117998
50–100	2938	895	107
100–200	185	56	—
Более 200	220	20	—
Масса воды, %, около	0.016	0.005	0.064

ВЫВОДЫ

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

2. При переходе от одноступенчатого фильтра к двухступенчатому удалось повысить чистоту рабочей жидкости в 3 раза, а количество воды в масле уменьшить приблизительно в 12 раз (в качестве фильтрующих перегородок в фильтрах маслобака использовался полиамидный фильтрующий материал).

3. Высокий уровень загрязненности масла до модернизации фильтров является следствием неправильного подбора фильтрующего материала и размеров ячеек фильтрующих сеток.

4. Полиамидный фильтрующий материал, по сравнению с латунными сетками в качестве фильтрующих перегородок, в фильтрах грубой и тонкой очистки обеспечивает повышение эффективности фильтрации азрированных, обводненных и загрязненных турбинных масел в системах смазки подшипников и регулирования паровых турбин (нормативную чистоту — класс 8 по ГОСТ 17216-2001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Неуймин В.М. Уровень надежности паровых турбин ТЭС Холдинга ОАО РАО «ЕЭС России» // Энергосбережение и водоподготовка. 2004. № 2. С. 46–48.
3. Самородов Ю.Н. Анализ аварий и инцидентов в работе турбогенераторов в 2001–2005 гг. // Новое в российской электроэнергетике. 2008. № 3. С. 19–33.
4. Brown K. Managing the health of fire resistant steam turbine electrohydraulic (EHС) control oils // Mach. Lubr. 2001. No. 5.
5. Analysis of particulate contamination in turbine oil / P. Yu, Y. Chen, S. Liu, B. Song, D. Liao, Y. Luo // Turbine Technol. 2003. V. 45. No. 4. P. 194–195.
6. Торопов Е.В., Пшениснов А.И. Очистка турбинного масла в системе маслоснабжения и регулирования Т-180-210 ЛМЗ до нормативной чистоты // Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 1998. № 4. С. 54–61.
7. Лазарев Г.Б., Самородов Ю.Н. Эрозионные повреждения подшипников турбогенераторов и мощных электродвигателей // Энергия единой сети. 2017. № 5 (34). С. 44–48.
8. Петриченко А.Д., Вакуров В.В. Качество нефтяного турбинного масла и надежность работы системы регулирования и смазки турбоагрегатов // Электрические станции. 1991. № 10. С. 18–22.
9. Осинцев К.В., Пшениснов Н.А., Пшениснов А.И. Процессы загрязнения и очистки турбинного масла в системах смазки паровых турбин // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2022. Т. 22. № 3. С. 83–89. <https://doi.org/10.14529/power220309>
10. Осинцев К.В., Пшениснов Н.А., Пшениснов А.И. Анализ эффективности очистки турбинного масла в системе маслоснабжения турбоагрегатов и модернизация рамных фильтров // Энергетик. 2022. № 11. С. 45–49. <https://doi.org/10.34831/EP.2022.77.89.007>
11. СТО 70238424.27.100.053-2013. Энергетические масла и маслохозяйства электрических станций и сетей. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. М.: НП «ИНВЭЛ», 2013.
12. Пшениснов И.Ф. Разработка метода экспресс-анализа чистоты газотурбинного топлива, турбинного масла и мазута: отчет. Челябинск: УралВТИ, 1987.
13. Пшениснов И.Ф., Пшениснов А.И. Экспресс-анализ промышленной чистоты турбинных, трансформаторных и других масел и содержания воды в них: отчет. Челябинск: НПО «ЭнергоСервис», 1993.

Efficiency of Multistage Filtration of Turbine Oil in the Oil-Supply System of Turbo Units

K. V. Osintcev^{a, *}, N. A. Pshenisnov^{a, b}, and A. I. Pshenisnov^b

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

^b EnergoService Research and Production Association, Chelyabinsk, 454048 Russia

*e-mail: enserv@mail.ru

Abstract—The efficiency of multistage filters of the main oil tank (MOT) is analyzed. The efficiency of sequentially installed filters is determined by a power function in which the base is the stage skip factor W_{in} (assuming $W_{in} = \text{const}$ for all filtering stages) and the exponent is the number of filtering stages n . Under the operating conditions of the hydraulic system, contaminants continuously enter the system and are removed by the filter. How the change in the transmittance W_i in the process of multistage filtration affects the purity of the oil in the operating system is analyzed. Oil tank filters were upgraded at the T-200-130 LMZ turbine unit (station no. 9) at Yuzhnouralskaya GRES. Instead of brass woven meshes, a filter material made of polyamide monofilaments (polyamide filter material) was installed. After the modernization of the coarse and fine filters, the oil became cleaner in the oil-supply system of the T-200-130 LMZ turbine unit (station no. 9), the amount of solid particles in it (in samples from the clean compartment of the MOT) with sizes of more than 10 microns decreased by 68 times, and the amount of water in the oil decreased by approximately three times; industrial purity corresponds to the eighth class of GOST 17216-2001. In practice, the operation of coarse and fine filters in one and two stages was also analyzed. When switching from single-stage to two-stage filtration, the purity of the oil became higher, and the amount of solid particles in it with sizes of more than 5 microns decreased by three times, while the amount of water in the oil by approximately 12 times. Increasing the number of filtration stages significantly increases the purity of the filtrate.

Keywords: steam turbine, turbine oil, oil tank filters, turbine unit oil supply, working fluid