

Теплотехника Heat engineering

Научная статья
УДК 620.424.1
DOI: 10.14529/power220309

ПРОЦЕССЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ОЧИСТКИ ТУРБИННОГО МАСЛА В СИСТЕМАХ СМАЗКИ ПАРОВЫХ ТУРБИН

К.В. Осинцев¹, osintsev2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>
Н.А. Пшениснoв^{1, 2}, pshenisnovna@icloud.com
А.И. Пшениснoв², enserv@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ООО «Научно-производственное объединение ЭнергоСервис», Челябинск, Россия

Аннотация. Получена зависимость параметров (чистоты, загрязнения и очистки) рабочей жидкости системы смазывания подшипников и регулирования паровой турбины. Фильтры предназначены для очистки путем удаления твердых примесей, которые вредны для масла и машины. Если фильтр хорошо справляется со своей задачей, он удаляет загрязняющие вещества так же быстро, как они проникают в масло. Это называется массовым балансом. Количество частиц, попадающих в масляную систему, равно количеству частиц, улавливаемых фильтром; таким образом достигается стабилизированный и контролируемый уровень чистоты масла. Было проанализировано влияние воздуха, диспергированного в масле, на работу рамных фильтров в системах смазки паровых турбин. Установлено, что при фильтровании азрированного масла мягкие частицы (пузырьки газа) увеличивают коэффициент отсева твердых загрязнений более чем в 4 раза. Расчеты показывают, что воздух, диспергированный в масле, повышает чистоту фильтрата в системе в 21 раз.

Ключевые слова: паровая турбина, турбинное масло, рамные фильтры, маслоснабжение турбоагрегата, рабочая жидкость

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

Original article
DOI: 10.14529/power220309

PROCESSES OF POLLUTION AND CLEANING OF TURBINE OIL IN LUBRICATION SYSTEMS OF STEAM TURBINES

K.V. Osintcev¹, osintsev2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>
N.A. Pshenisnov^{1, 2}, pshenisnovna@icloud.com
A.I. Pshenisnov², enserv@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Limited Liability Company "EnergoService", Chelyabinsk, Russia

Abstract. The dependence of the parameters (cleanliness, contamination and purification) of the working fluid of the bearing lubrication system and steam turbine control is obtained. Filters are intended to purify by removing solid contaminants that are harmful to the oil and the machine. If the filter is doing a good job, it is removing contaminants as fast as they are entering (ingression). This is known as mass balance. The number of particles coming into the oil system (particle ingression) equals the number being caught by the filter (particle removal); this achieves a stabilized and controlled oil cleanliness level. The effect of air dispersed in oil on the operation of frame filters in steam turbine lubrication systems was analyzed. It has been established that when filtering aerated oil, soft particles (gas bubbles) increase the screening ratio of solid contaminants by more than 4 times. Calculations show that air dispersed in oil increases the purity of the filtrate in the system by 21 times.

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

For citation: Osintcev K.V., Pshenisnov N.A., Pshenisnov A.I. Processes of pollution and cleaning of turbine oil in lubrication systems of steam turbines. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(3): 83–89. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220309

© Осинцев К.В., Пшениснoв Н.А., Пшениснoв А.И., 2022

Введение

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) [1, 2].

Проблема повышения 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 [3].

Повышенная загрязненность рабочих жидкостей в энергетике увеличивает износ упорных колодок и вкладышей подшипников, вызывает электроэрозию и снижает надежность уплотнений вала генератора, ухудшает их эксплуатационные свойства [4, 5].

Важность качества рабочей жидкости никогда не была более очевидной, чем в системе гидравлического регулирования, которая отвечает за критически важную задачу управления подачей пара к турбинам, которые приводят в действие электрические генераторы на электростанции [6].

Влияние процессов загрязнения и очистки на чистоту рабочей жидкости в системе

Загрязнения поступают в рабочую жидкость извне и непосредственно образуются в ней, а удаляются из нее средствами очистки. Наличие твердых загрязнений в масле является естественным состоянием рабочей жидкости, так как они генерируются самой работающей системой (тяжело нагруженными сопряженными парами трения). Поэтому нормы чистоты рабочих жидкостей систем определяются исходя из чувствительности их к твердым частицам загрязнений [7].

Скорость поступления загрязнений извне (продукты износа, атмосферная пыль) при установившемся режиме работы двигателя и неизменности внешних условий можно считать постоянной и независимой от работы гидросистемы [8].

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 рабочей жидкости на сливе в грязный отсек бака после прокачивания ее через контур системы 1, 2, ..., n раз определяют по формулам:

$$K_{i1} = K_{i0}W_i + K_i; \quad (1)$$

$$K_{i2} = K_{i0}W_i + K_iW_i + K_i; \quad (2)$$

$$K_{in} = K_{i0}W_i^n + K_iW_i^{n-1} + K_iW_i^{n-2} + \dots + K_iW_i + K_i, \quad (3)$$

где K_{i0} – начальное число частиц i -й фракции в рабочей жидкости, залитой в систему; W_i – коэффициент пропускания частиц i -й фракции через систему очистки.

$$W_i = 1 - \varphi_i, \quad (4)$$

где φ_i – фракционный коэффициент отсева, характеризует степень снижения штучной концентрации частиц отдельной фракции,

$$\varphi_i = \frac{N_{i1} - N_{i2}}{N_{i1}}, \quad (5)$$

где N_{i1} , N_{i2} – число частиц i -й фракции в жидкости до и после фильтра.

Разделив обе части уравнения (3) на K_i , получим

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

Остаток степенного ряда $W_i^{n-1} + W_i^{n-2} + \dots + W_i + 1$ быстро сходится при $|W_i| < 1$ и расходится при $|W_i| = 1$ (отсутствие фильтра в гидросистеме).

Сумма ряда (в области сходимости) есть $\frac{1}{1-W_i}$.

При $n \rightarrow \infty$

$$K_{in} = \frac{K_i}{1-W_i}. \quad (7)$$

Число твердых частиц i -й фракции в фильтрате

$$K_{i\phi} = K_i \frac{W_i}{1-W_i}, \quad (8)$$

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

$$K_i = K_{in} - K_{i\phi}. \quad (9)$$

Зависимость между количеством частиц в рабочей жидкости (фильтрате) $K_{i\phi}$ размерной группы 10–25 мкм и числом прокачиваний ее через контур системы n для $K_{i0} = 250$ и 8000, $K_i = 15000$, $\varphi_i = 0,79$ показана на рис. 1. Необходимо отметить, что частицы размером 10–25 мкм рассматриваются сегодня как наиболее опасные для большинства современной техники [9].

Очевидно, количество частиц в фильтрате при установившемся режиме работы турбоагрегата (6 циклов прокачивания всего объема рабочей жидкости через систему) $K_{i\phi} = 3987$ (8-й класс по ГОСТ 17216–2001) не зависит от чистоты залитого в систему масла $K_{i0} = 8000$ или 250 (10-й или 5-й класс по ГОСТ 17216–2001), а зависит от количества поступающих в масло частиц $K_i = 15000$ и эффективности фильтра $\varphi_i = 0,79$ [10].

Зависимость между классами чистоты рабочей жидкости гидросистем по ГОСТ 17216–2001 и поступлением твердых частиц загрязнений K_i для различных значений W_i (коэффициента проскока частиц размерной группы 10–25 мкм показана на рис. 2.

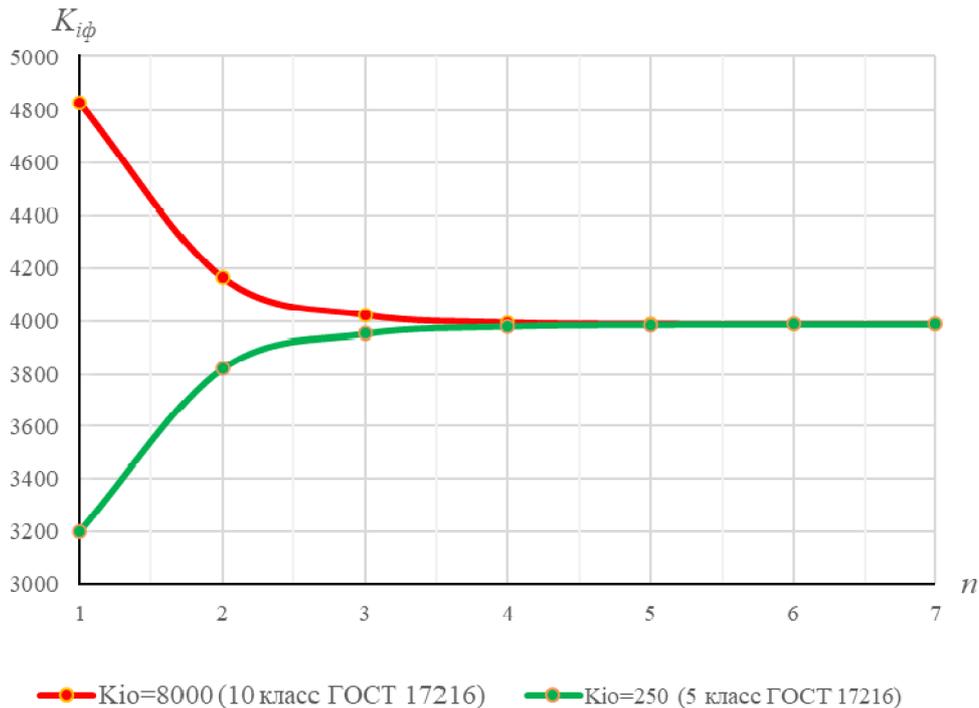


Рис. 1. Зависимость между количеством частиц в рабочей жидкости (фильтрате) $K_{i\phi}$ размерной группы 10–25 мкм и числа прокачиваний n ее через контур системы для различных значений K_{i0} ; $K_{i\phi}$ – количество твердых частиц загрязнений 10–25 мкм в 100 мл фильтрата
Fig. 1. The relationship between the number of particles in the working fluid (filtrate) $K_{i\phi}$ of the size group of 10–25 microns and the number of pumping n of it through the system circuit for different values of K_{i0} ; $K_{i\phi}$ – the amount of solid particles of contamination of 10–25 microns in 100 ml of filtrate

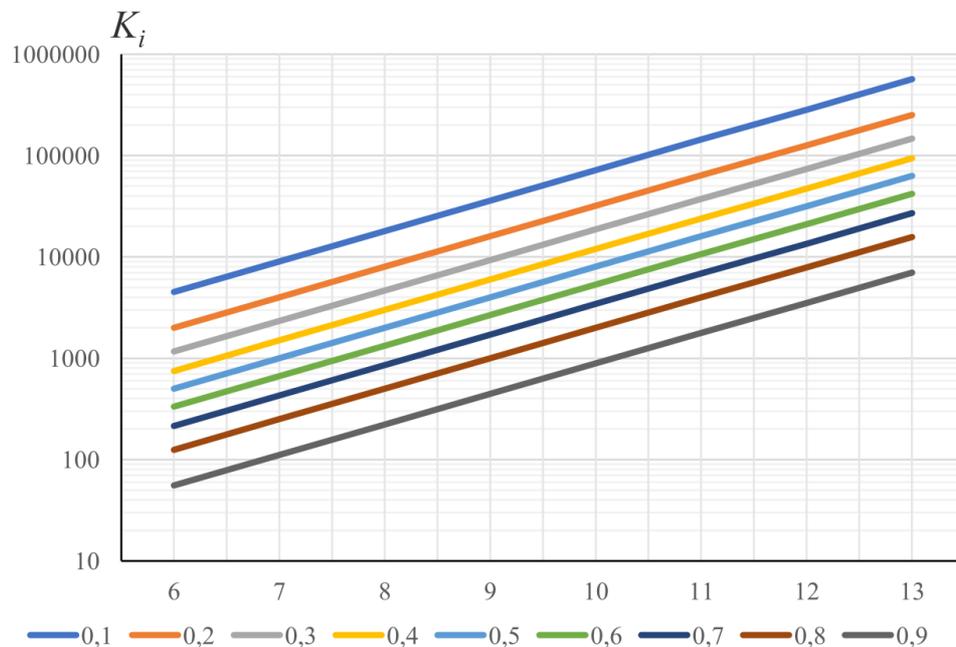


Рис. 2. Зависимость между классами чистоты рабочей жидкости гидросистем и поступлением твердых частиц загрязнений K_i для различных значений W_i ; 0,1–0,9 – коэффициент проскока частиц 10–25 мкм; K_i – поступление твердых частиц загрязнений 10–25 мкм в каждые 100 мл рабочей жидкости (lg); 6–14 – классы чистоты по ГОСТ 17216–2001
Fig. 2. The relationship between the purity classes of hydraulic working fluid and the intake of solid particles of pollution K_i for different values W_i ; 0.1–0.9 – the coefficient of particle slip of 10–25 microns; K_i – the intake of solid particles of pollution of 10–25 microns in every 100 ml of working fluid (lg); 6–14 – purity classes according to GOST 17216–2001

Исследование влияния диспергированного воздуха в турбинном масле на процесс фильтрации

При работе турбоагрегата масло в гидросистеме перемешивается с газами: атмосферным воздухом, водородом, газообразными продуктами окисления. Часть газа растворяется в нем, другая – образует смесь различной структуры. Наибольший контакт между маслом и воздухом происходит в негерметизированных масляных системах. Газ в жидкости может существовать также в виде мельчайших, порядка долей микрона, газовых зародышей, адсорбированных на поверхности механических примесей. 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.

Размер воздушных пузырьков и количество диспергированного воздуха оказывает существенное влияние на процесс фильтрации при небольших скоростях, соответствующих малым перепадам давления на фильтрующей перегородке [8].

Установилось мнение, что присутствие нерастворенного газа в рабочей жидкости гидросистем ухудшает работу последних [11, 12].

Необходимо определить влияние воздуха, диспергированного в масле, на работу фильтра.

Рабочие жидкости гидросистем (турбинное масло) в процессе эксплуатации содержат примерно 6 % воздуха в нерастворенном состоянии (суспензия воздуха и жидкости), в некоторых случаях содержание воздуха повышается до 15–18 % в виде взвеси (газовой эмульсии) мелких пузырьков диаметром 50–100 мкм, равномерно распределенных по всему объему масла [13, 14].

Даже незначительные следы поверхностно активных веществ сообщают пузырьку свойства твердого шарика, увеличивают диссипацию энергии, затрудняют коалесценцию 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 $Re < 10\,000$ закон сопротивления такой же, что и для твердых шариков (при тех же числах Рейнольдса) [15, 16].

Исследование фильтрации азрированного масла проводили в системе смазки подшипников и регулирования турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ. В ней приемный (грязный) отсек маслобака отделен от чистого встроенным в бак двухступенчатым фильтром. В качестве фильтрующей перегородки использовали латунные тканые проволочные сетки с ячейками 700 и 140 мкм соответственно в первой и второй ступенях фильтрации.

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

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

Результаты дисперсионного анализа твердых загрязнений в пробах масла прибором ПКЖ-902 по методике [17] использовали также для оценки промышленной чистоты рабочей жидкости по ГОСТ 17216–2001.

Данные о количестве частиц проб масла из грязного отсека и фильтрата (из чистого отсека и в опыте при фильтровании деазрированного масла) приведены в таблице, а обобщенные результаты измерений и подсчета твердых частиц, загрязняющих масло, показаны на рис. 3.

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

Концентрация твердых загрязнений в пробах масла из грязного отсека бака не превышает 0,032 % (низкоконцентрированная суспензия с высокодисперсной твердой фазой).

Эффективность работы фильтра определяют коэффициентом пропускания частиц W_i i -й фракции по формуле (4).

Коэффициент пропускания твердых частиц размерной группы 10–25 мкм при фильтровании азрированного масла $W_i^a = 0,21$, а деазрированного – $W_i = 0,85$. Воздух, диспергированный в масле, повышает коэффициент отфильтровывания в четыре раза.

Промышленная чистота турбинного масла в системе смазки подшипников турбоагрегата Т-180/210 ЛМЗ и фильтрата деазрированного масла
Industrial frequency of turbine oil in the bearing lubrication system of the T-180/210 LMZ turbine unit and deaerated oil Filtrate

Место отбора проб	Число частиц в 100 мл масла размером, мкм				
	5–10	10–25	25–50	50–100	> 100
Из грязного отсека	50 440	14 318	1361	225	48
Фильтрат азрированного масла (чистый отсек)	10 058	2956	218	39	22
Фильтрат деазрированного масла	48 085	12 133	1323	156	31

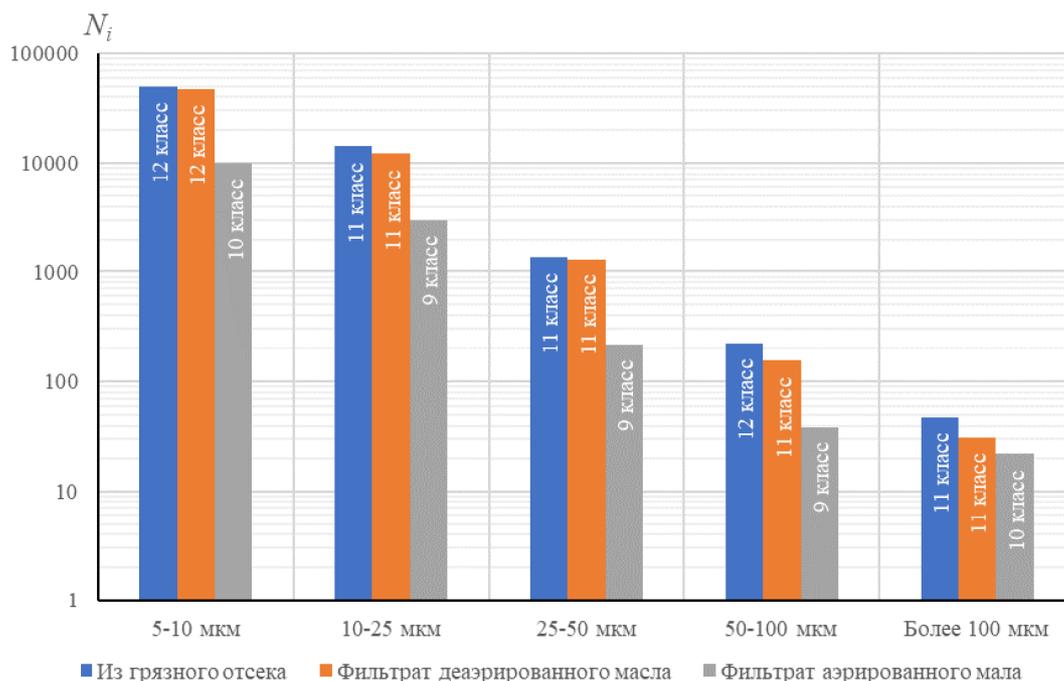


Рис. 3. Количество частиц в пробах масла (класс чистоты по ГОСТ 17216–2001) из грязного отсека и фильтрата (из чистого отсека и в опыте при фильтровании деаэрированного масла): 5–10 мкм, 10–25 мкм, ..., более 100 мкм – размерные группы частиц; N_i – общее число частиц в 100 мл пробы (lg)
Fig. 3. The number of particles in oil samples (purity class according to GOST 17216–2001) from the dirty compartment and filtrate (from the clean compartment and in the experiment when filtering deaerated oil): 5–10 microns, 10–25 microns, ..., more than 100 microns – particle size groups; N_i – the total number of particles in 100 ml of the sample (lg)

Выводы

Чистота масла при установившемся режиме работы турбоагрегата не зависит от чистоты изначально залитого в систему масла, а зависит от количества поступающих в масло частиц (продукты износа, атмосферная пыль) и эффективности фильтра (фракционного коэффициента отфильтровывания).

При разделении малоцентрированных суспензий тонкодисперсных твердых веществ проникновение частиц в поры фильтрующей перегородки может быть частично предотвращено путем использования так называемых вспомогательных веществ [18]. К таким веществам следует отнести и пузырьки газа, диспергированного в масле. Пузырьки приобретают свойства твердых шариков, повышающих концентрацию твердых частиц в суспензии, создают благоприятные условия для фильтрования с образованием осадка. Известно также, что вспомогательные вещества адсорбируют тонкодисперсные твердые частицы, смолистые и слизистые примеси [18]. Фильтрование с применением вспомогательных веществ является практически единственным эффективным способом разделения низкоконцентрированных суспензий с высокодисперсной твердой фазой [19, 20].

Стандартный вид процесса фильтрования возникает в тех условиях, когда концентрация загрязнений в рабочей жидкости гидросистем не превышает 0,063 % [13]. Фильтрование с образо-

ванием осадка на пористой перегородке (шламовый режим) возникает, когда концентрация загрязнений 0,15 % и более. Пузырьки воздуха на поверхности фильтрующей перегородки образуют осадок, по своим гидравлическим свойствам близкий к осадку твердых частиц, который может изменить вид процесса фильтрования и таким образом влиять на качество фильтрата [21].

За насосом сжатые пузырьки быстро растворяются, поэтому фильтры, установленные на всасывании, более эффективны. Многочисленными исследованиями, проведенными ВНИИ Гидропривод, а также зарубежными фирмами (например, фирмой Розайн), доказано, что установка всасывающих фильтров с тонкостью фильтрации 74 мкм по своей эффективности эквивалентна установке фильтров на линии нагнетания с тонкостью фильтрации 25 мкм [13].

Фильтрат, полученный в системе с использованием вспомогательного вещества (пузырьков воздуха), содержит $K_{\text{фа}} = 3020$ твердых частиц размерной группы 10–25 мкм в 100 мл жидкости, а без него $K_{\text{ф}} = 64\,325$. Расчеты показывают, что воздух, диспергированный в масле, повышает чистоту фильтрата в системе в 21 раз.

Большое значение для повышения эффективности работы фильтров имеет прежде всего предварительная подготовка суспензии. Фильтруемость суспензии можно улучшить флотацией мелких фракций с помощью пузырьков воздуха [13].

Список литературы

1. Majka W., Klima T. Hydrodynamic Cleaning and Flushing of Turbine Oil Systems // *Machinery Lubrication*. 2013. No. 12. P. 1–3.
2. Analysis of Particulate Contamination in Turbine Oil / P. Yu, Y.-q. Chen, S.-h. Liu et al. // *Turbine technology*. 2003. No. 45 (4). P. 194–195.
3. Пшениснов А.И. Загрязнение, очистка турбинного масла в системах смазки паровых турбин и модернизация рамных фильтров: доклад // Международная научно-техническая конференция «80 лет уральской теплоэнергетике. Образование. Наука» / Уральский государственный технический университет. Екатеринбург, 2003. 12 с.
4. Повышение эффективности очистки турбинного масла / Е.В. Торопов, И.Ф. Пшениснов, А.И. Пшениснов, Я.И. Пшениснов // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2004. № 2. С. 61–67. DOI: 10.21122/1029-7448-2004-0-2-61-67
5. Mitigation of triboelectric charging in paper machine hydraulic and lubrication fluids / C. Kan, J. Li, B. Christian et al. // *Light Industry Machinery*. 2011. No. 29 (2). P. 45–48.
6. Brown K. Managing the health of fire-resistant steam turbine electrohydraulic (EHC) control oils // *Machinery Lubrication*. 2001. No. 5. P. 2–4.
7. Xiu S.C., Gao S.Q., Sun Z.L. Analysis of thermal properties of super-high speed hybrid journal bearing based on ANSYS // *Adv. Mater. Rec.* 2010. No. 118. P. 753–757. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.118-120.753
8. Рыбаков К.В., Коваленко В.П. Фильтрация авиационных масел и специальных жидкостей. М.: Транспорт, 1977. 188 с.
9. Барышев В. И. Классификация, контроль и нормирование промышленной чистоты рабочих жидкостей // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2005. № 1. С. 149–161.
10. Fitch J. The anatomy of a filter inspection report // *Machinery Lubrication*. 2022. No. 2. P. 4–6.
11. Музыкалин А.Д., Попова И.М. Удаление пузырьков воздуха из жидкости с помощью сеток // *Вестник машиностроения*. 1982. № 4. С. 12–15.
12. Johnson M., Livingstone G. Identifying varnish and oxidation precursors in lubricant sumps // *Tribology and Lubrication Technology*. 2011. No. 67 (4). P. 2–7.
13. Коновалов В.М., Скрицкий В.Я., Рокшевский В.А. Очистка рабочих жидкостей в гидроприводах станков. М.: Машиностроение, 1976. 261 с.
14. Study on sludge formation during the oxidation process of turbine oils / A. Yano, S. Watanabe, Y. Miyazaki et al. // *Tribology Transactions*. 2004. No. 47 (1). P. 111–122. DOI: 10.1080/05698190490278985
15. Левич В.П. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, 1959. 240 с.
16. Multi-parameter prediction modeling for analyzing the trend of turbine oil online monitoring parameters / K. Yang, Y. Qiu, P. Song et al. // *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2014 Hunan)*. 2014. P. 301–304. DOI: 10.1109/PHM.2014.6988183
17. Пшениснов И.Ф., Пшениснов Я.И. Диагностирование состояния подшипников турбоагрегатов по чистоте масла в системе маслоснабжения // *Электрические станции*. 1989. № 2.
18. Жужиков В.А. Фильтрация. М.: Гос. науч.-техн. изд-во хим. лит., 1961.
19. Лейчикс И.М. Фильтрация с применением вспомогательных веществ. Киев: Техника, 1975.
20. Gong X. Online nonintrusive condition monitoring and fault detection for wind turbines // *Theses, Dissertations, and Student Research from Electrical & Computer Engineering*. University of Nebraska-Lincoln. 2012;46.
21. Аксенов А.Ф., Белянский В.П. Растворимость воздуха в углеводородных жидкостях // *Вопросы авиационной химотологии: межвуз. сб. науч. тр.* Киев: КИИГА, 1985.

References

1. Majka W., Klima T. Hydrodynamic Cleaning and Flushing of Turbine Oil Systems. *Machinery Lubrication*. 2013;12:1–3.
2. Yu P., Chen Y.-q., Liu S.-h., Song B., Liao D.-m., Luo Y.-b. Analysis of Particulate Contamination in Turbine Oil. *Turbine technology*. 2003;45(4):194–195.
3. Pshenisnov A. I. [Pollution, purification of turbine oil in steam turbine lubricants and modernization of frame filters: Report]. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "80 let Ural'skoy teploenergetiki"* [International scientific and technical conference "80 years of the Ural thermal power industry"]. Ural State Technical University. Ekaterinburg, 2003. 12 p. (In Russ.)
4. Tоропов E.V., Pshenisnov I. F., Pshenisnov A. I., Pshenisnov Y. I. [Improving the efficiency of turbine oil purification]. *Izvestia vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob"edinennij SNG. Energetika*. 2004;(2):61–67. (In Russ.) DOI: 10.21122/1029-7448-2004-0-2-61-67
5. Kan C., Li J., Christian B. et al. Mitigation of triboelectric charging in paper machine hydraulic and lubrication fluids. *Light Industry Machinery*. 2011;29(2):45–48.

6. Brown K. Managing the health of fire-resistant steam turbine electrohydraulic (EHC) control oils. *Machinery Lubrication*. 2001;5:2–4.
7. Xiu S. C., Gao S.Q., Sun Z.L. Analysis of thermal properties of super-high speed hybrid journal bearing based on ANSYS. *Adv. Mater. Rec.* 2010;118:753–757. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.118-120.753
8. Rybakov K.V., Kovalenko V.P. *Fil'trovaniye aviatsionnykh masel i spetsial'nykh zhidkostey* [Filtration of aviation oils and special liquids]. Moscow: Transport; 1977. 188 p. (In Russ.)
9. Baryshev V.I. [Classification, control and regulation of industrial cleanliness of working fluids]. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*. 2005;6(1):149–161. (In Russ.)
10. Fitch J. The anatomy of a filter inspection report. *Machinery Lubrication*. 2022;2:4–6.
11. Muzykin A.D., Popova I.M. [Removing air bubbles from liquids using meshes]. *Vestnik mashinostroeniya*. [Bulletin of mechanical engineering]. 1982;(4):12–15. (In Russ.)
12. Johnson M., Livingstone G., Identifying varnish and oxidation precursors in lubricant sumps. *Tribology and Lubrication Technology*. 2011;67(4):2–7.
13. Konovalov V.M., Skritsky V.Y., Rokshevsky V.A. *Ochistka rabochikh zhidkostey v gidroprivodakh stankov* [Purification of working fluids in hydraulic drives of machine tools]. Moscow: Mashinostroenie; 1976. 261 p. (In Russ.)
14. Yano A., Watanabe S., Miyazaki Y., Tsuchiya M., Yamamoto Y. Study on sludge formation during the oxidation process of turbine oils. *Tribology Transactions*. 2004;47(1):111–122. DOI: 10.1080/05698190490278985
15. Levich V.P. *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika* [Physical and chemical hydrodynamics]. Moscow: Fizmatgiz; 1959. 240 p. (In Russ.)
16. Yang K., Qiu Y., Song P., Yan X.P., Zhou X.C., Chen Y. Multi-parameter prediction modeling for analyzing the trend of turbine oil online monitoring parameters. In: *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2014 Hunan)*; 2014. P. 301–304. DOI: 10.1109/PHM.2014.6988183
17. Pshenisnov I.F., Pshenisnov Y.I. [Diagnostics of the state of bearings of turbine units by the purity of the oil in the oil supply system]. *Elektricheskiye stantsii* [Electric stations]. 1989;(2). (In Russ.)
18. Zhuzhikov V.A. *Fil'trovaniye*. [Filtration]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo khimicheskoy literatury; 1961. (In Russ.)
19. Leichkis I.M. *Fil'trovaniye s primeneniem vspomogatel'nykh veshchestv* [Filtration with the use of auxiliary substances]. Kiev: Tekhnika; 1975. (In Russ.)
20. Gong X. Online nonintrusive condition monitoring and fault detection for wind turbines. *Theses, Dissertations, and Student Research from Electrical & Computer Engineering*. University of Nebraska-Lincoln. 2012;46.
21. Aksenov A.F., Belyansky V.P. [Solubility of air in hydrocarbon liquids]. In: *Voprosy aviatsionnoy khimologii* [Issues of Aviation Chemotology]. Kiev: KIIGA; 1985. (In Russ.)

Информация об авторах

Осинцев Константин Владимирович, канд. техн. наук, доц., кафедра промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; osintsev2008@yandex.ru.

Пшениснов Никита Анатольевич, магистрант, кафедра промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; директор, ООО «Научно-производственное объединение ЭнергоСервис», Челябинск, Россия; pshenisnovna@icloud.com.

Пшениснов Анатолий Игоревич, инженер-промтеплоэнергетик, окончил Челябинский государственный технический университет в 1993 году, главный инженер, ООО «Научно-производственное объединение ЭнергоСервис», Челябинск, Россия; enserv@mail.ru.

Information about the authors

Konstantin V. Osintsev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Industrial Thermal Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; osintsev2008@yandex.ru.

Nikita A. Pshenisnov, Master's Student, Department of Industrial Thermal Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; Director, Limited Liability Company "EnergoService", Chelyabinsk, Russia; pshenisnovna@icloud.com.

Anatoly I. Pshenisnov, industrial heat and power engineer, graduated from the Chelyabinsk State Technical University in 1993, Chief Engineer, Limited Liability Company "EnergoService", Chelyabinsk, Russia; enserv@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.04.2022; одобрена после рецензирования 05.05.2022; принята к публикации 05.05.2022.

The article was submitted 21.04.2022; approved after reviewing 05.05.2022; accepted for publication 05.05.2022.