

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,  
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ  
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ОГНЕСТОЙКИХ ЖИДКОСТЕЙ В СИСТЕМАХ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ТЭС**

© 2022 г. А. В. Охлопков<sup>а</sup>, \*, Д. В. Шуварин<sup>а</sup>, К. А. Орлов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: OkhlopkovAV@mpei.ru

Поступила в редакцию 02.11.2021 г.

После доработки 11.01.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2022 г.

В настоящее время в целях обеспечения пожарной безопасности в системах электрогидравлического регулирования паровых турбин большой мощности на тепловых электростанциях используются огнестойкие жидкости. В Советском Союзе и некоторых других странах применялось огнестойкое масло типа ОМТИ, которое состоит из смеси триксиленилфосфатов, и с начала 90-х годов XX в. используются аналогичные масла. Накопленный опыт применения огнестойких жидкостей позволяет сделать вывод о существенном влиянии их качества на надежность работы турбоагрегатов. Повышение надежности работы маслосистем паровых турбин и другого тепломеханического оборудования, а также увеличение срока службы турбинных масел представляют широкий научный и производственный интерес. Приведены результаты многолетних исследований качества огнестойких жидкостей при их эксплуатации в системах автоматического регулирования паровых турбин энергоблоков парогазовых установок, расположенных в центральной и южной частях России. Целями данного исследования были определение причин снижения ресурса огнестойких жидкостей и формирование предложений по актуализации нормативных документов по их применению и контролю качества. Рассмотрены вопросы обеспечения нормативных требований, предъявляемых к огнестойким жидкостям, проанализированы объемы и методики проведения химических анализов их качества, выдвинуты предложения по корректировке инструкций по эксплуатации оборудования и объемов испытаний, определены причины старения огнестойких жидкостей и предложены способы продления их срока службы. На основе производственного опыта использования импортных и отечественных огнестойких жидкостей сделаны выводы о влиянии качества исходного продукта и режима эксплуатации на качество масла при его эксплуатации, а также о важности информированности ответственных служб эксплуатирующей организации о соответствии производственного процесса требованиям действующих нормативных документов.

*Ключевые слова:* огнестойкие жидкости, кислотное число, содержание водорастворимых кислот, класс промышленной чистоты, время деаэрации, потенциал лакообразования

**DOI:** 10.56304/S0040363622070062

За последние годы были внесены изменения в методики определения показателей качества огнестойких жидкостей. В 2018 г. был переиздан ГОСТ [1] и введен ГОСТ [2]. Кроме того, в ноябре 2019 г. производитель паровых турбин ПАО “Силовые машины” в Информационном письме [3] сообщил о дополнительных требованиях к следующим показателям качества свежих и находящихся в эксплуатации огнестойких масел:

- склонность к пенообразованию;
- время деаэрации;
- гидролитическая стабильность;
- стабильность к окислению, кислотное число;
- потенциал лакообразования;
- испытание на воспламенение в коллекторе.

В табл. 1 приведены требования к показателям качества масел, находящихся в эксплуатации [4].

В целях корректировки локальных нормативных документов генерирующих компаний в 2017–2018 гг. в НИУ МЭИ совместно с ПАО “Мосэнерго” были проведены научно-исследовательские работы, посвященные разработке технических требований и рекомендаций к производству смазочных материалов (турбинного масла и пр.) на отечественных предприятиях для замещения импортных масел, используемых на объектах ПАО “Мосэнерго”. Результатом исследований стал регламент требований к качеству новых турбинных масел при организации их применения в оборудовании филиалов ПАО “Мосэнерго”. В этих требованиях определены мероприятия, направленные на

**Таблица 1.** Требования к качеству масел, находящихся в эксплуатации [4]

Показатель качества	Стандарт метода испытания	Нормативное значение
Склонность к пенообразованию/стабильность пены, см <sup>3</sup> , не более, при температуре, °С:	[5]	
24		200/0
94		50/0
24 после нагрева до 94°С		250/0
Время деаэрации, с, не более	[6]	480
Способность отделяться от воды (время разделения эмульсии до ее содержания не более 3 см <sup>3</sup> при 54°С), мин, не более	[7]	60
Потенциал лакообразования (метод MPC Color), балл	[8]	Не более 50

**Таблица 2.** Нормируемые показатели качества масел Reolube OMTI и Fyrguel L [9]

Показатель	Reolube OMTI	Fyrguel L
Кислотное число, мг КОН/г	0.8	0.5
Содержание воды, %, не более	0.03	0.03
Содержание водорастворимых кислот, мг КОН/г, не более	0.4	0.4
Класс промышленной чистоты	9	11
Время деаэрации, с	480	540
Потенциал лакообразования, не более	50	–

выбор наиболее надежных турбинных и гидравлических масел для оборудования электрических станций ПАО «Мосэнерго». Регламент распространяется на турбинные и другие смазочные масла классов вязкости 32 и 46, применяемые в тепломеханическом оборудовании электрических станций ПАО «Мосэнерго», и может быть использован в компаниях, входящих в группу ООО «Газпром энергохолдинг», а также других заинтересованных генерирующих компаниях.

В табл. 2 приведены нормируемые показатели качества турбинных масел Reolube OMTI и Fyrguel L [9].

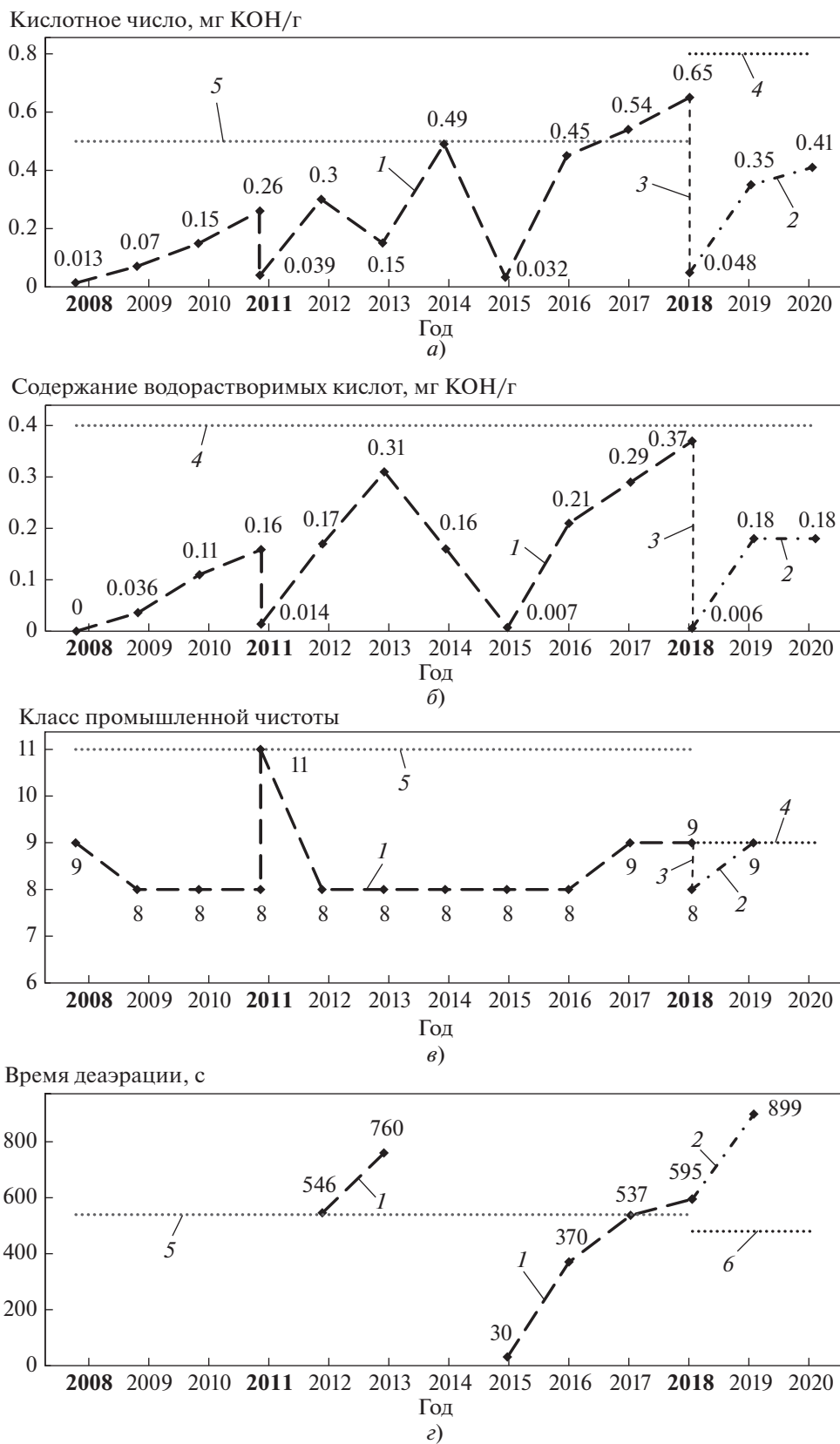
Далее рассматриваются вопросы применения огнестойких масел в системах регулирования паровых турбин (ПТ) на ТЭС-А и ТЭС-Б, расположенных в центральной части России, и на ТЭС-В и ТЭС-Г в южной части России.

В 2008 г. в систему регулирования паровой турбины ПТ-1 ТЭС-А залили огнестойкое масло марки Fyrguel L, показатели качества которого соответствовали нормативным значениям [9]. В течение 5 лет эксплуатации при однократной полной замене масла наблюдалось изменение значений показателей качества с превышением нормативного времени деаэрации (рис. 1). Значения остальных показателей оставались в пределах нормативных. В 2013 г. в период капитального ремонта, несмотря на отсутствие превышения нормы по кислотному числу, которое является браковочным показателем согласно [10], была выполнена промывка маслосистемы регулирования с полной заменой

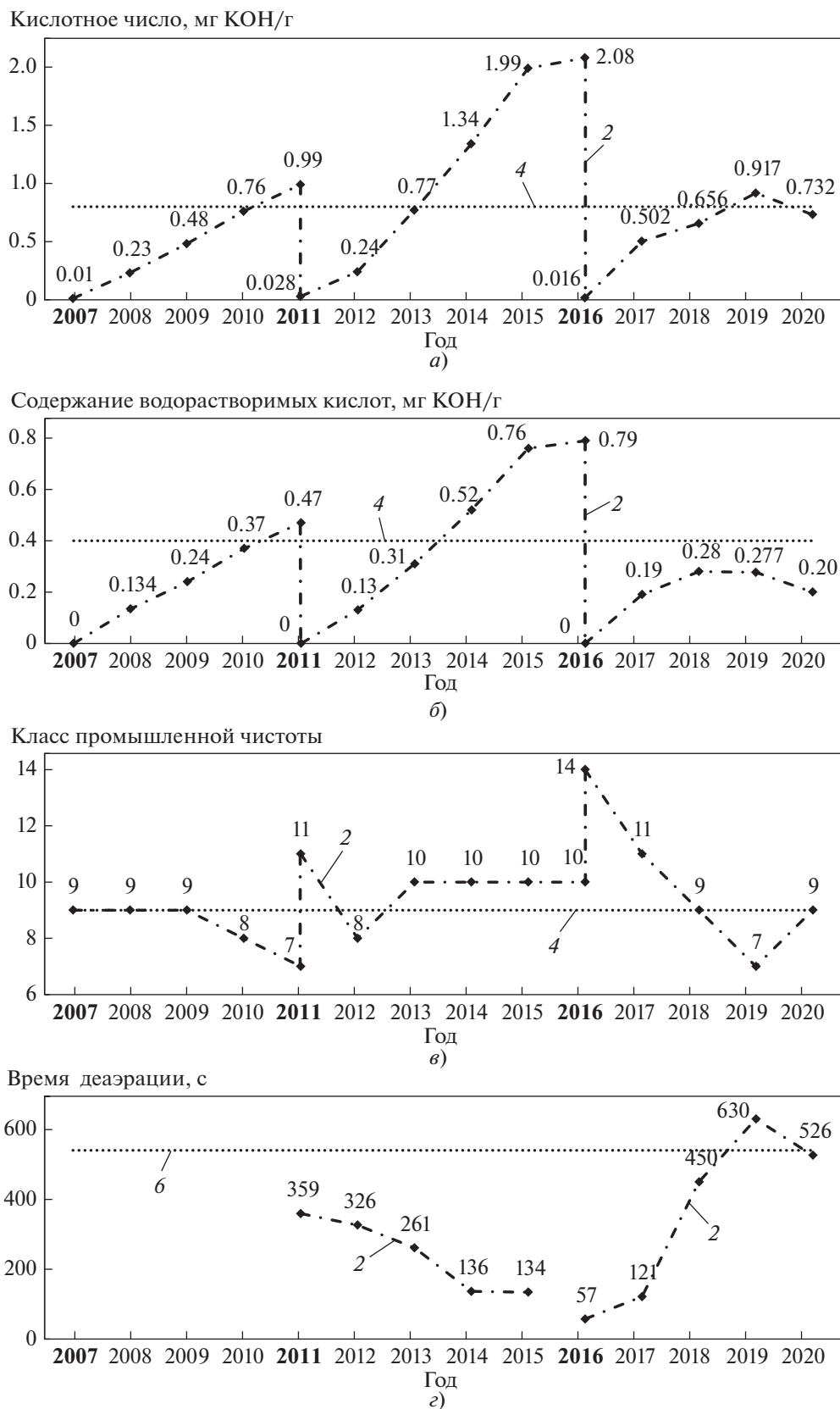
масла на аналогичное масло марки Fyrguel L. В 2015 и 2017 гг. выполняли частичные замены масла (на 15–20% общего объема в течение одной замены).

В апреле 2018 г. в период капитального ремонта в связи с превышением кислотным числом нормируемого значения была проведена полная замена на масло марки Reolube OMTI-32. Промывку маслосистемы осуществляли в интенсивном режиме с применением дополнительных средств, способствующих уменьшению количества масла, остающегося в системе от предыдущей заливки. После капитального ремонта показатели качества масла соответствовали нормативным значениям.

В 2007 г. в систему регулирования паровой турбины ПТ-1 ТЭС-Б было залито огнестойкое масло марки Reolube OMTI-32, показатели качества которого соответствовали нормативным значениям. В течение 4 лет эксплуатации наблюдалось повышение кислотного числа до 0.99 мг КОН/г и содержания водорастворимых кислот до 0.47 мг КОН/г (рис. 2). Остальные показатели оставались в пределах нормативных. В 2011 г. в период капитального ремонта в связи с превышением кислотным числом нормативного значения была проведена полная замена масла на аналогичное масло марки Reolube OMTI-32. Качество свежего масла соответствовало нормативному по всем основным показателям. По итогам следующей четырехлетней эксплуатации динамика изменения основных эксплуатационных показателей была даже хуже, чем в предыдущий период.



**Рис. 1.** Кислотное число (а), содержание водорастворимых кислот (б), класс промышленной чистоты (в), время деаэрации (г) масел в системе регулирования ПТ-1 на ТЭС-А.  
 1 – Fuguel L; 2 – Reolube OMTI; 3 – замена масла; 4 – [9]; 5 – [12]



**Рис. 2.** Кислотное число (а), содержание водорастворимых кислот (б), класс промышленной чистоты (в), время деаэрации (з) масел в системе регулирования ПТ-1 на ТЭС-Б.  
б – [4]. Остальные обозначения см. рис. 1

**Таблица 3.** Показатели качества масла Reolube ОМТИ-32 в системах регулирования ПТ-1, ПТ-2 ТЭС-В и ПТ-1, ПТ-2 ТЭС-Г на 2020 г.

Показатель	ПТ-1 ТЭС-В	ПТ-2 ТЭС-В	ПТ-1 ТЭС-Г	ПТ-2 ТЭС-Г
Кислотное число, мг КОН/г	0.13	0.17	0.18	0.52
Содержание воды, %	0.0651	0.0646	0.0648	0.0679
Время деаэрации, с	573	325	547	395
Потенциал лакообразования	27	27	25	27

В 2016 г. при капитальном ремонте была проведена полная замена на масло марки Reolube ОМТИ-32. Через 3.5 года эксплуатации кислотное число достигло предельных допустимых значений. В июле 2020 г. была выполнена очистка масла на очистительной установке, оснащенной ионообменными фильтрами, что позволило снизить кислотное число до 0.752 мг КОН/г, время деаэрации изменилось до 526 с. При этом потенциал лакообразования снизился незначительно – до 74.2.

В 2008 г. в систему регулирования паровой турбины ПТ-2 ТЭС-Б было залито огнестойкое масло марки Fugquel L, показатели качества которого соответствовали нормативным значениям. В течение 4 лет эксплуатации наблюдалось повышение кислотного числа до 1.0 мг КОН/г (рис. 3). Значения остальных показателей оставались в пределах нормативных. В 2012 г. в период капитального ремонта в связи с превышением нормы по кислотному числу была проведена полная замена масла на огнестойкое масло марки Fugquel L, качество которого соответствовало нормативным требованиям.

В 2017 г. в период капитального ремонта в связи с превышением нормативных значений по всем показателям была проведена полная замена на масло Reolube ОМТИ-32. По состоянию на октябрь 2020 г. продолжительность эксплуатации масла Reolube ОМТ-32 составляла 4 года 2 месяца. К этому сроку время деаэрации достигло 996 с, потенциал лакообразования составлял 85.1. Значения остальных показателей соответствовали нормативным.

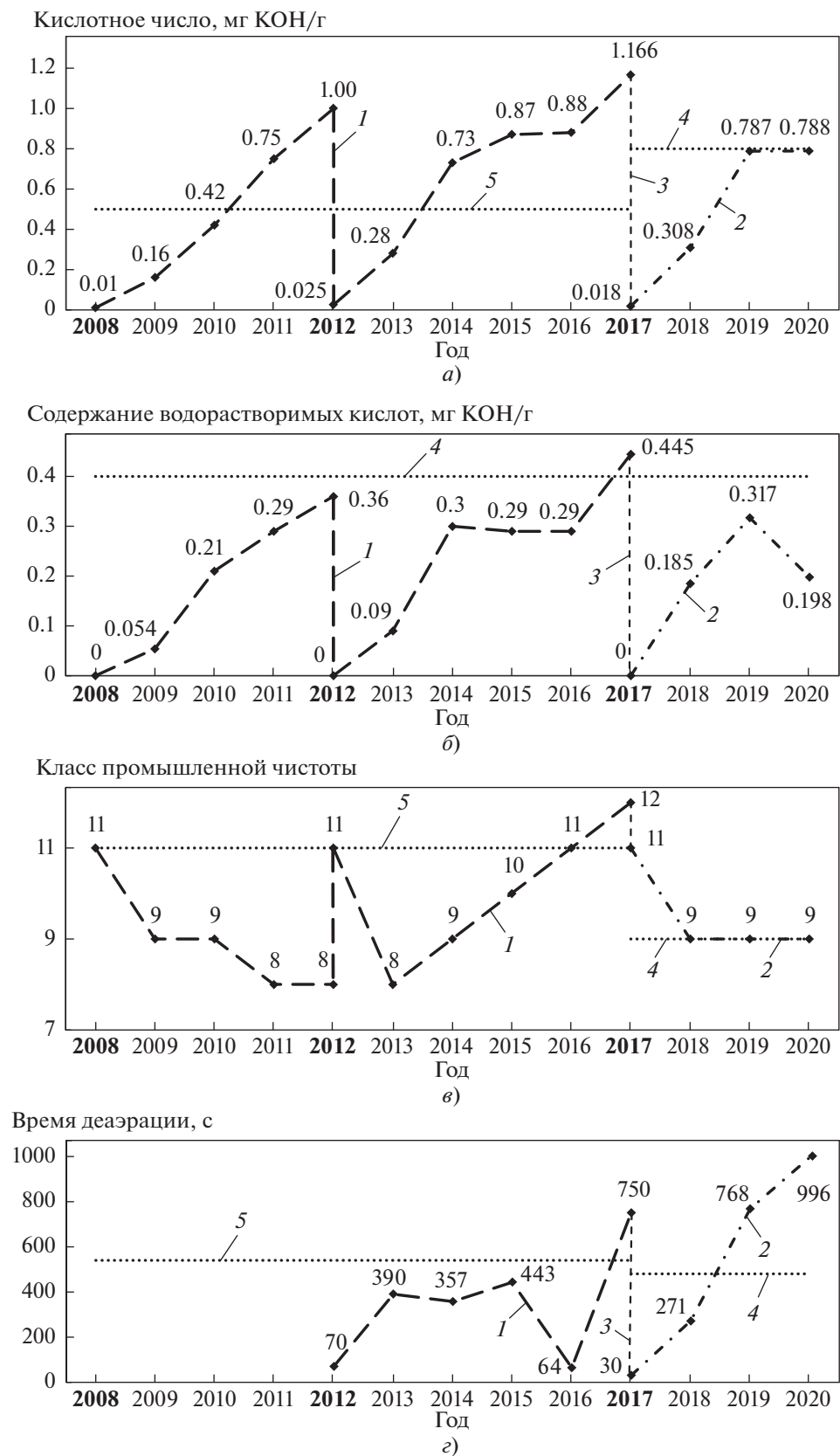
В 2019 г. в системы регулирования паровых турбин ПТ-1, ПТ-2 ТЭС-В и ПТ-1, ПТ-2 ТЭС-Г было залито отечественное огнестойкое масло Reolube ОМТИ-32, показатели качества которого при эксплуатации в течение 1.5 года приведены в табл. 3.

Вопросы эксплуатации огнестойких жидкостей к настоящему времени во многом являются предметом обсуждения в научной среде, и эксплуатирующие компании не имеют четких указаний по осуществлению контроля их качества (за исключением информации, опубликованной в [10]). Отсутствие нормативных документов, обязательных для применения, в этой области может привести к возникновению аварийных ситуаций и повреждению оборудования. Выполнение но-

вых требований изготовителей турбин по контролю показателей качества свежих огнестойких жидкостей (ОЖ) [4] (например, потенциала лакообразования) зачастую не обеспечивается их производителями. В связи с возможностью локальных перегревов масла в маслоохладителях целесообразно контролировать дополнительные показатели качества свежего масла.

В последние годы активно развивается технология производства ОЖ на основе бутилированных фенолфосфатов. Их свойства отличаются от свойств ОЖ, изготовленных на основе триксиленилфосфатов, что требует разработки нормативных документов по применению и контролю качества новых ОЖ в турбомашиностроении. Основные эксплуатационные характеристики качества жидкостей на основе бутилфенилфосфатов немного отличаются от характеристик жидкостей, произведенных на основе триксиленилфосфатов (более высокие начальное время деаэрации, пенообразование и т.д.). Существенно лучшие характеристики таких жидкостей по токсичности, с учетом современного развития химической индустрии, могут вывести их в будущем на первый план среди эксплуатационных жидкостей в системах автоматического регулирования паровых турбин. Это вызывает необходимость разработки новых нормативных документов по применению и контролю качества ОЖ на основе бутилфенилфосфатов.

Ухудшение качества ОЖ происходит вследствие гидролиза и естественного термоокислительного старения, интенсивность которого зависит от условий эксплуатации и начального качества этих жидкостей. Процесс ускоряется при наличии воды и повышении температуры, времени воздействия высоких температур, присутствия влаги и металлических катализаторов (в первую очередь меди). Приведенные ранее данные по применению ОЖ разных марок (Reolube, Fugquel) в различных энергосистемах России, а также данные, опубликованные в [11], позволяют выполнить анализ динамики ухудшения основных показателей их качества. В среднем через 4 года интенсивной эксплуатации наблюдается характерное резкое повышение кислотного числа. Таким образом, в эксплуатирующих организациях необходимо особое внимание обращать на обеспечение обязательных и факультативных нормативных требований, предъявляемых к огнестойким жидкостям [4].



**Рис. 3.** Кислотное число (а), содержание водорастворимых кислот (б), класс промышленной чистоты (в), время деаэрации (г) масел в системе регулирования ПТ-2 на ТЭС-Б. Обозначения см. рис. 1

Можно выделить следующие наиболее значимые факторы, влияющие на продление эксплуатационного ресурса огнестойких жидкостей:

условия хранения свежего и эксплуатационного масла;

поддержание оптимального режима эксплуатации;

регулярное использование маслоочистительных установок, которые должны обеспечивать удаление влаги, механических примесей, воздуха, шлама и продуктов деградации масла, т.е. комплексную очистку эксплуатационного масла от загрязнений;

необходимость регулярного мониторинга качества эксплуатационного масла с начала заливки свежего масла (определение влагосодержания, кислотного числа, содержания воды, времени деаэрации и дополнительных показателей качества).

Контроль за недавно введенными ПАО «Силовые машины» показателями качества ОЖ должен быть обеспечен приборами, внесенными в Госреестр средств измерений и аттестованными в установленном порядке.

Продолжительность службы ОЖ на обследованных объектах составляет в среднем 4 года. В то же время он не соответствует нормативным срокам, декларируемым основными производителями огнестойких жидкостей, и зависит от многих факторов, в том числе от изначального качества продукта. На исследуемых объектах контролируются разные наборы параметров (например, на ТЭС-В и ТЭС-Г не контролируются класс промышленной чистоты, содержание водорастворимых кислот и потенциал лакообразования). На ТЭС-А и ТЭС-Б отсутствует регулярный контроль содержания воды в ОЖ. Указанные факты позволяют судить о разрозненности нормативной базы в энергетике, в частности в исследуемой области знаний. Отсутствие единых требований по обязательным для контроля показателям может приводить к повышению аварийности и увеличению эксплуатационных расходов.

В соответствии с [3] критериями превышения нормативных значений эксплуатационных ОЖ являются склонность к пенообразованию, время деаэрации, способность отделяться от воды и потенциал лакообразования. Но согласно [10] единственным критерием отбраковки для огнестойких масел является кислотное число. В данном случае в эксплуатирующих организациях возникает неопределенность по продолжительности эксплуатации масла, в котором кислотное число превысило нормируемое значение. Руководитель организации должен принять решение либо об аварийном останове оборудования, либо о продлении его работы до ближайшего планового останова. В инструкции по эксплуатации огнестойких турбинных масел [4] содержится требование о замене масла при невозможности восста-

новить его качество без останова турбоагрегата при отклонении выше нормы значения одного из нормируемых показателей. В соответствии с предложениями заводов – изготовителей паровых турбин необходимо внести в инструкции по эксплуатации огнестойких турбинных масел в генерирующих компаниях корректировки контролируемых норм качества и определить (уточнить) перечень показателей, по которым можно отбраковывать масло в случае невозможности его очистки в условиях электростанции. Эффективные современные маслоочистительные установки позволяют значительно продлить срок службы ОЖ. Как подсказывает зарубежный опыт эксплуатации мощного паросилового оборудования, целесообразно и необходимо, чтобы маслоочистительное оборудование присутствовало в штатном составе турбоагрегатов. Нужно комплексное решение по качеству исходной ОЖ, подготовке маслосистем перед заливом масла, единым требованиям к эксплуатационным характеристикам при приеме и применении ОЖ, эффективной комплексной очистке огнестойких жидкостей и возможности восстановления качества отработанных огнестойких жидкостей.

Современные масла (и новые ОЖ) изготавливаются из различного сырья с применением разнообразных композиций (пакетов) присадок, поэтому актуальным становится не только выбор высококачественного масла, но и применение масел, совместимых при смешении.

Применение ОЖ разных зарубежных производителей и отсутствие нормативно-технической базы по организации контроля их качества не всегда позволяют руководству и обслуживающему персоналу ТЭС четко определять корректные сроки замены огнестойких жидкостей. Также актуальными становятся унификация применения, замещение импортных ОЖ отечественными аналогами, разработка и утверждение регламента контроля качества с использованием отечественных приборов и методик.

## ВЫВОДЫ

1. Разрозненность законодательной базы в энергетике в части контроля нормативных показателей огнестойких жидкостей и отсутствие единых требований по обязательным для контроля показателям могут приводить к повышению аварийности и увеличению эксплуатационных расходов.
2. Современные маслоочистительные установки позволяют значительно продлить срок службы огнестойких жидкостей. Целесообразно оборудовать вновь строящиеся турбоагрегаты комплексными маслоочистительными установками.
3. Современные огнестойкие жидкости изготавливаются из различного сырья с применением раз-

нообразных пакетов присадок, поэтому актуальными научными и практическими задачами являются:

выбор высококачественного масла и применение масел, совместимых при смешении;

унификация применения, замещение импортных огнестойких жидкостей отечественными аналогами, разработка и утверждение регламента контроля качества с использованием отечественных приборов и методик.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 6370-83.** Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. М.: Стандартинформ, 2007.
2. **ГОСТ 6370-2018.** Межгосударственный стандарт. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. М.: Стандартинформ, 2019.
3. **Информационное письмо** ПАО “Силовые машины” от 11.11.2019 № 10-763-201.
4. **1640 РЭ 01.** Руководство по эксплуатации. Проведение работ по маслосистемам турбоагрегатов при применении огнестойкого масла. СПб.: ПАО “Силовые машины”, 2019.
5. **ГОСТ 32344-2013.** Масла смазочные. Определение вспениваемости. М.: Стандартинформ, 2014.
6. **РД ЭО 1.1.2.05.0444-2016.** Требования к эксплуатации, организации и проведению испытаний трансформаторных и турбинных масел на атомных станциях. М.: Росэнергоатом, 2016.
7. **ГОСТ ISO 6614.** Нефтепродукты. Определение способности нефтяных масел и синтетических жидкостей отделяться от воды. М.: Стандартинформ, 2014.
8. **Стандарт ASTM D7843.** Standard test method for measurement of lubricant generated insoluble color bodies in in-service turbine oils using membrane patch colorimetry. American Society for Testing and Materials, 2021.
9. **СТО 70238424.27.100.053-2013.** Энергетические масла и маслохозяйства электрических станций и сетей. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. М.: ИНВЭЛ, 2013.
10. **СО 153-34.20.501-2003.** Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: Минэнерго России, 2003.
11. **Cheraghi S.** Опыт работы с огнестойким маслом для систем регулирования турбин на ТЭС “Рамин” // Теплоэнергетика. 2019. № 3. С. 33–41. <https://doi.org/10.1134/S004036361901003X>
12. **РД ЭО 1.1.2.05.0444-2009.** Требования к эксплуатации, организации и проведению испытаний трансформаторных и турбинных масел на атомных станциях. <https://normativ.su/catalog/standart/1001/303503/>

## Experience in Application of Fire-Resistant Liquids in Automatic Control Systems of Steam Turbines at TPPs

A. V. Okhlopkov<sup>a, \*</sup>, D. V. Shuvarin<sup>a</sup>, and K. A. Orlov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRE MPEI), Moscow, 111250 Russia

\*e-mail: OkhlopkovAV@mpei.ru

**Abstract**—Currently, in order to ensure fire safety, fire-resistant fluids are used in the electro-hydraulic control systems of high-capacity steam turbines in thermal power plants. In the Soviet Union and some other countries, fire-resistant OMTI oil, which consists of a mixture of trixylenyl phosphates, was used and similar oils have been used since the beginning of the 1990s. The accumulated experience in the use of fire-resistant liquids allows us to conclude that their quality has a significant impact on the reliability of turbine units. Improving the reliability of the oil systems of steam turbines and other thermal mechanical equipment, as well as increasing the service life of turbine oils, is of wide scientific and industrial interest. The results of long-term studies into the quality of fire-resistant liquids during their operation in automatic control systems of steam turbines of power units of combined-cycle plants located in the central and southern parts of Russia are presented. The objectives of this study were to determine the reasons for the decrease in the resource of fire-resistant liquids and the formation of proposals for updating regulatory documents for their use and quality control. The issues of ensuring the regulatory requirements for fire-resistant liquids are considered, the volumes and methods of conducting chemical analyzes of their quality are analyzed, proposals are made to adjust the instructions for operating equipment and the scope of tests, the causes of aging of fire-resistant liquids are determined, and ways to extend their service life are proposed. Based on the production experience of using imported and domestic fire-resistant liquids, conclusions were drawn about the impact of the quality of the original product and the operating mode on the quality of the oil during its operation as well as the importance of informing the responsible services of the operating organization about the compliance of the production process with the requirements of current regulatory documents.

**Keywords:** fire-resistant liquids, acid number, content of water-soluble acids, industrial purity class, deaeration time, varnish formation potential