



Научная статья

УДК 621.18

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-147-160>

Разработка технических решений по выбору схемы замены барабанов, выработавших ресурс

А.В. Охлопков^{1✉}, Н.В. Попов², Д.О. Моисеев³, В.Д. Битней⁴^{1,3}НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия^{1,2,4}ПАО «Мосэнерго», г. Москва, Россия

Резюме. Замена барабана является сложным технологическим решением и может включать в себя различные варианты технического перевооружения (реконструкции), в зависимости от множества факторов, таких как результаты обследования, наличия подъемной техники, качества подъездных путей, компоновки котельного отделения главного корпуса и ряда экономических вопросов. А также несет в себе, как экономически, так и технически сложную задачу, связанную с возможностью замены устройства, которое расположено на самой высокой отметке в котельном отделении. Компанией ПАО «Мосэнерго» в рамках научно-исследовательской работы для обеспечения максимально длительного срока эксплуатации паровых энергетических котлов при замене главного сепарационного устройства были выделены три варианта замены сепарационного устройства: аналогичный барабан, выполненный из стали импортного производства марки WB36; альтернативная схема с малым барабаном и батареей выносных циклонов; установка безбарабанной схемы, основанной на многоступенчатой схеме испарения и состоящей из батареи циклонов. Также проведен анализ материалов, которые используются в сепарационных устройствах на данный момент, такими являются сталь 16 ГНМ и 16 ГНМА, и их сравнение со сталью импортного производства WB36. Каждый из вариантов имеет свой ряд преимуществ и недостатков, которые будут проанализированы по следующим критериям: массогабаритные характеристики, предполагаемая необходимость в подъемной технике; гидравлические потери, предполагаемые изменения в автоматике котла; относительные затраты на выполнение проекта, анализ и управление рисками. В данной статье будут представлены рекомендации по выбору варианта решения замены барабана, которое может стать основополагающим в дальнейшем продлении ресурса и осуществлении надежной и безопасной работы котельного оборудования.

Ключевые слова: эксплуатация энергетических котлов, замена барабана, сепарационное устройство, батарея циклонов, схемы испарения, работа котельного оборудования

Для цитирования: Охлопков А.В., Попов Н.В., Моисеев Д.О., Битней В.Д. Разработка технических решений по выбору схемы замены барабанов, выработавших ресурс // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 147–160. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-147-160>.

ENERGY INDUSTRY

Original article

Technical solutions for selecting an option for replacing overaged boiler steam drums

Andrey V. Okhlopov^{1✉}, Nikolai V. Popov², Danil O. Moiseev³, Vladislav D. Bitney⁴^{1,3}National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia^{1,2,4}PJSC "Mosenergo", Moscow, Russia

Abstract. This work investigates possible options for replacing the main separator of steam power boilers to ensure their maximal service life. Separators of drum-type boilers are reviewed in terms of their advantages and disadvantages. An analysis of two steels – WB36 and 16GNMA – is carried out by comparing their performance characteristics, chemical composition, and welding procedures. Possible technical solutions for replacing overaged drum boilers are analyzed from the technical and economic perspectives. Three options were selected for replacing the separator: a similar drum made of imported grade WB36 steel; an alternative option with a small drum and a bank of off-mounted cyclones; a drumless option based on a multi-stage evaporation cycle and a bank of cyclones. The materials currently used in separators, i.e., 16GNM and 16GNMA, are compared with imported WB36 steel. It was found that each option had its own advantages and disadvantages, which should be analyzed according to the following parameters: weight and dimensions; assumed need in lifting equipment; hydraulic losses; assumed changes in automatic boiler equipment; relative costs associated with designing, analysis, and risk management. Therefore, the presented recommendations for selecting a drum replacement option are essential for extending the service life and ensuring the reliable and safe operation of boiler equipment.

Keywords: power-generating boiler operation, drum replacement, separating device, cyclone battery, evaporation schemes, boiler equipment operation

For citation: Okhlopkov A.V., Popov N.V., Moiseev D.O., Bitney V.D. Technical solutions for selecting an option for replacing overaged boiler steam drums. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):147-160. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-147-160>.

ВВЕДЕНИЕ

Барабан – это цилиндрический сосуд, часть оборудования котлов, элемент тепловой схемы, предназначенный для сбора и дальнейшей раздачи рабочего тела, для разделения пароводяной смеси на воду и насыщенный пар. Так как это устройство, работающее под высоким давлением, то ключевым требованием к эксплуатации такого вида оборудования является безопасность. На котлах, которые эксплуатируются более сорока лет, особенно остро стоит вопрос альтернативной и грамотной замены корпуса барабана [1]. Основной задачей данной работы является сравнительный анализ возможных решений по замене сепарационных устройств, отслуживших свой срок службы, с учетом экономических и технических условий [2, 3].

Чтобы обеспечить максимально длительный срок эксплуатации паровых энергетических котлов при замене главного сепарационного устройства, были предложены альтернативные варианты:

- замена барабана на аналогичный барабан;
- замена барабана на альтернативную схему с малым барабаном;
- замена барабана на батарею циклонов.

АНАЛИЗ РАБОТЫ

Сепарационные устройства. Надежность работы барабанных котлов во многом определяется устойчивой работой внутрибарабанных и выносных сепарационных устройств.

Сепарационные устройства котлов предназначены для защиты внутренних поверхностей пароперегревателя от образования отложений, вызванных содержанием в паре различных примесей. В барабанных котлах применяются по отдельности или в различных исполнениях сепарационных устройств. В них используются такие принципы сепарации пара, как гравитационная, инерционная, циклонная, пленочная и комбинированная [5, 6]. При подборе сепарационных устройств в части работы контуров циркуляции особо важным является расчет гидравлического сопротивления сепараторов [7]. При увеличении сопротивления труднее добиваться стабильной (нормальной) работы контуров. Высокое сопротивление в основном создают циклоны, но возможно получение достаточно большого сопротивления и в других элементах сепараторов. К тому же важно заметить, что конструктивные особенности котлов также влияют на выбор сепарационных механизмов. Наибольшими являются следующие: размеры барабана (диаметр и длина); размещение подводящих и отводящих, опускных и подъемных труб; подвод питательной воды; размеры лазов и их размеры; наличие пароперегревателя; тип топочного устройства и вид топлива. Все это влияет из-за наличия гидравлических потерь.

Внутрибарабанные устройства. Необходимый уровень сухости пара достигается за счет уменьшения кинетической энергии пароводяных струй, выходящих из пароподводящих труб экранных панелей топки,

равномерной раздачи пара площади, называемой зеркалом испарения (поверхность воды, с которой происходит испарение пара), и его осушкой на жалюзийной решетке или циклонах. Схемы внутрибарабанных устройств котлов значительно типизированы и приведены на рис. 1.

Равномерное распространение пара во всем объеме барабана и пароотводящих труб обусловлено установкой погружаемых дырчатых щитов в водяном пространстве барабана котлов среднего и низкого давлений и парораспределительных решеток в паровом объеме барабана котлов высокого давления. Широкое применение нашли жалюзийные сепараторы, схемы расположения которых в барабанах показаны на рис. 2.

Внутрибарабанные центробежные сепараторы пара. Начальное разделение пароводяной смеси, выходящей из экранов топки, гашение ее кинетической энергии, а также двухступенчатая сепарация пара,

которая в основном используется в барабанах котлов высокого давления, осуществляются в циклонах. Типовая схема представлена на рис. 3. Эти устройства используются для первичной сепарации, что позволяет уменьшить пенообразование котловой воды и устранить захват пара в водоотпускные трубы. Первая ступень сепарации – центробежная, создаваемая за счет тангенциальной подвода пароводяной смеси в циклон, вторая же ступень выполняется осадительной, что достигается установкой жалюзийного сепаратора в верхней части циклона [8].

Конструкция, размеры и элементы, расположенные внутри барабанных циклонов, выбираются согласно следующим требованиям – с учетом расчетов гидравлических потерь выбирают ширину патрубка, включающего циклоны, а также из условий сопротивлений в пределах надежности циркуляции. На рис. 4 рассмотрена сепарационная схема с внутрибарабанными циклонами.

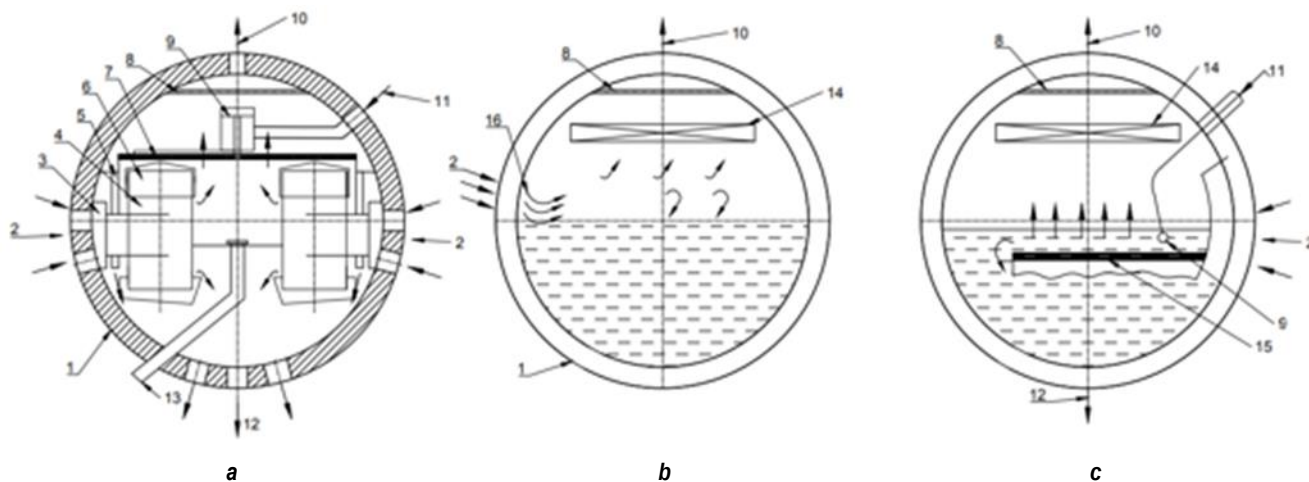


Рис. 1. Типовые схемы внутрибарабанных устройств котлов высокого (а), среднего (b) и низкого (с) давления: а – для котлов высокого давления с внутрибарабанными циклонами; b и с – для котлов среднего и низкого давления с отбойными щитками и погруженным дырчатым щитом, соответственно; 1 – барабан; 2 – ввод пароводяной смеси; 3 – короб; 4 – циклон; 5 – сливной короб; 6 – крышка; 7 – дырчатый лист промывочного устройства; 8 – парораспределительная решетка; 9 – раздающий короб питательной воды; 10 – пароотводящие трубы; 11 – подвод питательной воды; 12 – опускные трубы; 13 – труба аварийного слива воды;

14 – жалюзийный сепаратор; 15 – затопленный дырчатый щит; 16 – отбойные подушки

Fig. 1. Typical diagrams of drum internals for high (a), medium (b) and low (c) pressure boilers: a – for high-pressure boilers with drum internal cyclones; b and c – for medium and low pressure boilers with baffle plates and a submerged perforated plate, respectively; 1 – drum; 2 – steam-water mixture inlet; 3 – casing; 4 – cyclone; 5 – drain tank; 6 – cover; 7 – perforated distributor of the flushing device; 8 – steam distribution grate; 9 – feed water dispensing box; 10 – steam discharge pipes; 11 – feed water inlet; 12 – downcomers; 13 – water emergency discharge pipe; 14 – louvered separator; 15 – submerged perforated plate; 16 – baffle pads

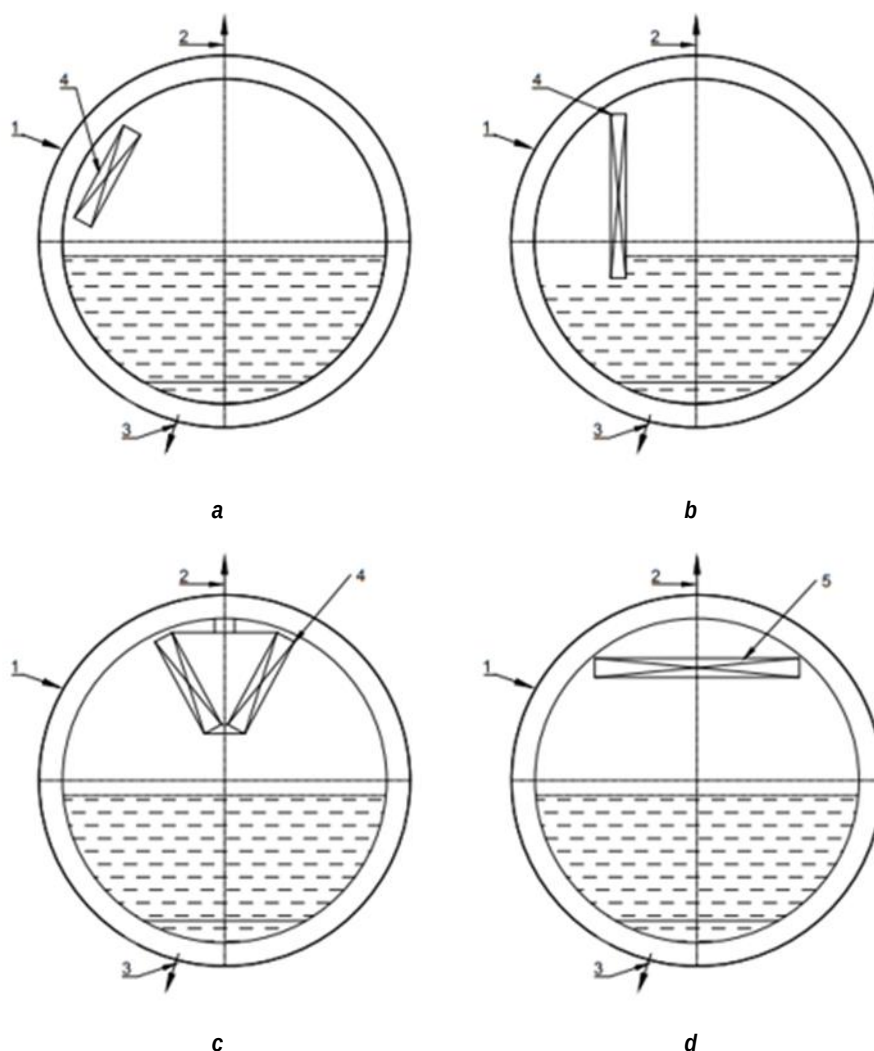


Рис. 2. Схемы расположения жалюзи в барабане котла (1 – ввод пароводяной смеси, 2 – отбор пароводяной смеси, 3 – отвод воды, 4 – жалюзи, 5 – жалюзийный потолок): а – входные; б – промежуточные; с – выходные; д – выходные горизонтальные
 Fig. 2. Diagrams of louver location in the boiler drum (1 – steam-water mixture inlet, 2 – steam-water mixture outlet, 3 – water drainage, 4 – louvers, 5 – louvered ceiling): a – input louvers; b – intermediate louvers; c – output louvers; d – output horizontal louvers

Выносные центробежные сепараторы пара. Отличия в конструкциях различных сепараторов, а также всевозможные способы присоединения реализуют различающиеся условия работы. Что, в свою очередь, дает разную эффективность отделения влаги от пара. При ступенчатом испарении пар последней ступени осушается в выносных циклонах.

Ряд плюсов и минусов работы выносных циклонов отмечен в таблице.

Анализ эксплуатационных характеристик сталей WB36 и 16ГНМА. На ТЭС России в эксплуатации более 700 барабанов котлов высокого давления. Большая часть из них выполнена из стали 22К. Кроме того, барабаны

изготавливались из сталей 15М (16М), 16ГНМ, 16ГНМА. Сталь 16ГНМА пришла на замену стали 16ГНМ в связи с выявлением трещин в теле барабана в местах отверстий для водопускных труб, что приводило к повышению эксплуатационных расходов на ремонт [9]. Процентное соотношение использования различных марок стали для изготовления барабанов котлов представлено на рис. 6.

Как видно из рис. 6, на данный период времени большинство барабанов в России изготовлено из сталей 22К, 15М (16М), 16ГНМ, их замена приведет к большим капиталовложениям. Со временем в процессе эксплуатации в металле барабанов котлов появляются дефекты в

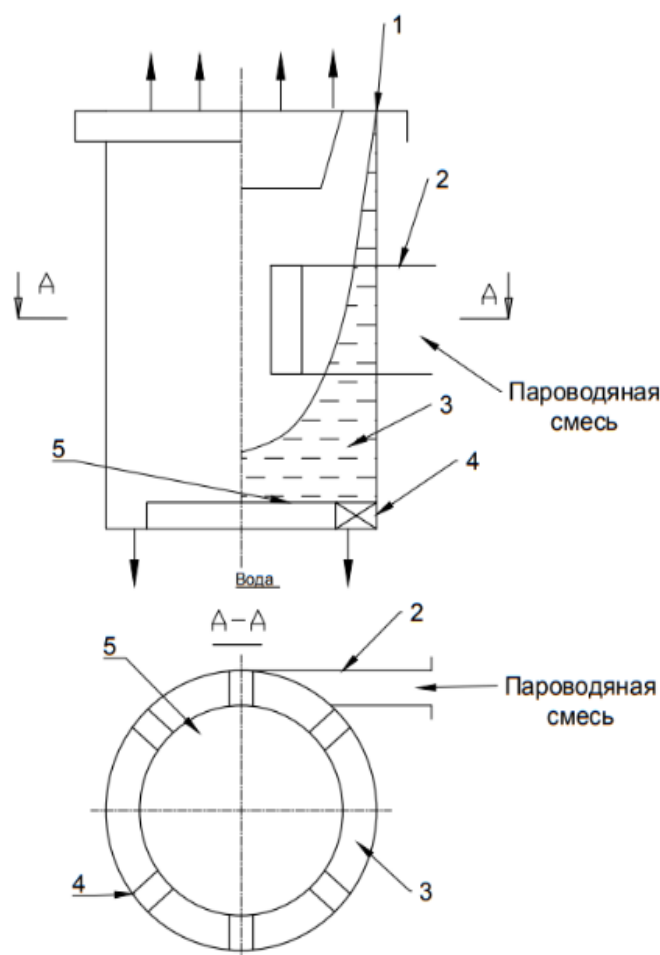


Рис. 3. Внутрибарабанный циклон (1 – крышка, 2 – подводящий патрубков, 3 – цилиндрический корпус, 4 – направляющие лопатки, 5 – доньшко)
Fig. 3. Drum internal cyclone (1 – cover, 2 – inlet pipe, 3 – cylindrical body, 4 – guide vanes, 5 – bottom)

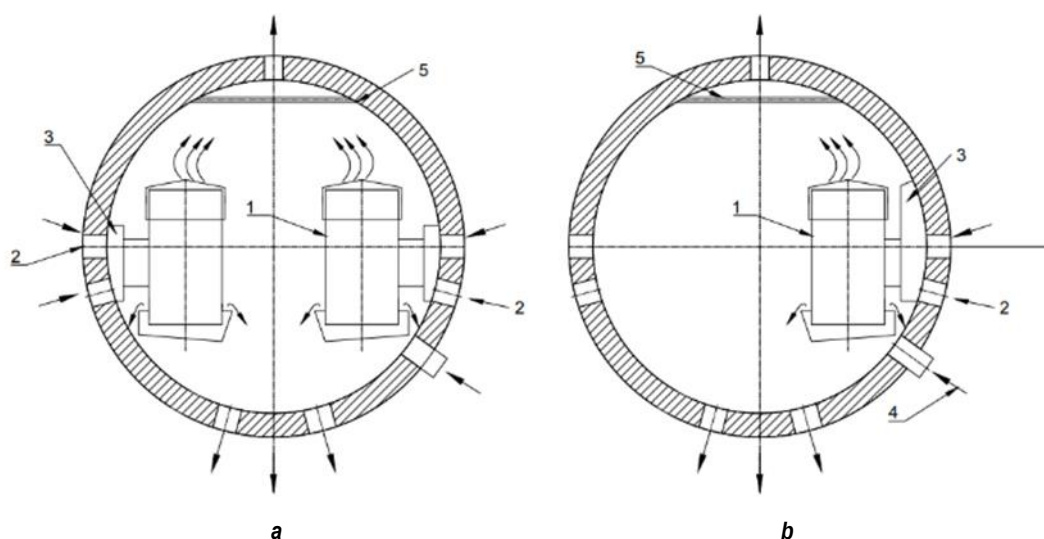


Рис. 4. Сепарационная схема с циклонами внутри барабана (1 – внутрибарабанный циклон, 2 – трубы, подводящие пароводяную смесь, 3 – подводящие короба, 4 – водоотпускные трубы, 5 – парораспределительная решетка): а – при двустороннем подводе пароводяной смеси; б – при одностороннем подводе
Fig. 4. Separation diagram with drum internal cyclones (1 – drum internal cyclone, 2 – steam-water mixture supplying pipes, 3 – supply boxes, 4 – water downcomers, 5 – steam distribution grate): а – under two-way supply of the steam-water mixture; б – under one-way supply of the steam-water mixture

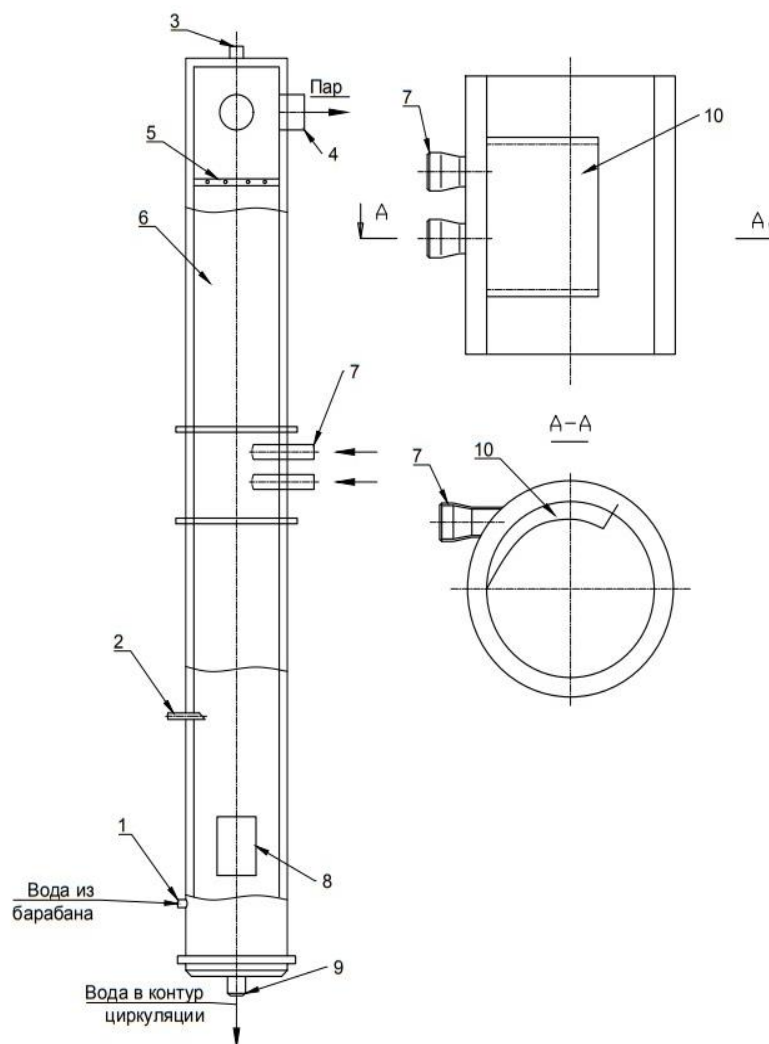


Рис. 5. Эскиз принципиального выносного циклона (1 – штуцер для трубопровода, подводящего котловую воду, 2 – штуцер для трубопровода непрерывной продувки, 3 – штуцер для воздушника, 4 – штуцер для пароотводящего трубопровода, 5 – пароприемный дырчатый щит, 6 – корпус, 7 – штуцера для трубопровода пароводяной смеси, 8 – крестовина, 9 – штуцер для водоотпускной трубы, 10 – вставка для образования улитки)
 Fig. 5. A sketch of a basic outside cyclone (1 – fitting for a boiler water supplying pipeline, 2 – fitting for a continuous blow-down pipeline, 3 – fitting for an air vent, 4 – fitting for a steam outlet pipeline, 5 – steam intake perforated plate, 6 – body, 7 – fittings for a steam-water mixture pipeline, 8 – crosspiece, 9 – fitting for the water downcomer, 10 – insert for volute formation)

виде трещин и коррозионных язв⁵. Накопление указанных дефектов зависит от уровня культуры эксплуатации (соблюдение допустимой разницы температур между верхом и низом металла барабана, выдерживание требуемой скорости подъема давления пара при пусках, качество питательной воды) и действия циклических нагрузок, зависящих от режима работы (пиковый, полупиковый, базовый). Циклические нагрузки ведут к уменьшению пластичности

металла барабана в области концентрации напряжений и появлению в нем трещин. Схема, представленная на рис. 7, отражает конструкционно-технологические и эксплуатационные факторы, влияющие на разрушение целостности барабанов и их взаимосвязь.

Можно выделить несколько ключевых причин увеличения вероятности хрупких разрушений [10, 11]. Первая – это большие габариты изделия. Объемные напряжения или так

⁵СО 153-34.17.469-2003. Инструкция по продлению срока безопасной эксплуатации паровых котлов с рабочим давлением до 4,0 МПа включительно и водогрейных котлов с температурой воды выше 115°C. Введ. 24.06.2003.

называемое состояние «плоской деформации» происходят при нагружении толстостенных деталей [12]. Еще один фактор, связанный с большими габаритами изделия – это сложность технологии изготовления, а также сварки листов из толстостенного металла и необходимость термообработки после сварки.

Внутрибарабанные устройства привариваются без термообработки к стенкам барабана на монтаже в периоды проведения планового контроля металла, когда внутрибарабанные устройства демонтируются и монтируются вновь. Эти технологические факторы в случаях отклонения от заданных значений могут привести к формированию и сохранению высокого уровня остаточных напряжений в зонах сварных соединений. Дефекты, образован-

ные посредством производственно-технологических факторов, перерастают в эксплуатационные факторы, приводящие к последующим развитиям этих дефектов.

Распространение трещин происходит по коррозионно-усталостному механизму. Некоторыми факторами, способствующими этому процессу, являются высокий уровень действующих напряжений и воздействие на металл среды рабочего тела. Высокий уровень напряжений обусловлен следующими причинами:

- конструктивной концентрацией напряжений;
- остаточными напряжениями;
- пониженным запасом прочности;
- отклонениями от штатных режимов эксплуатации.

Плюсы и минусы работы выносных циклонов
Pros and cons of outside cyclones

Преимущества	Недостатки
– выносные циклоны в 5 раз более эффективны в сравнении с внутрибарабанными за счет большей высоты; – процесс управляемый; – более приемлемые монтажные работы	– высота по паровому пространству; – при переходе с режима на режим возможен захват пара в опускной участок и вынос пара в экранные поверхности нагрева, что грозит их перегревом и разрушением

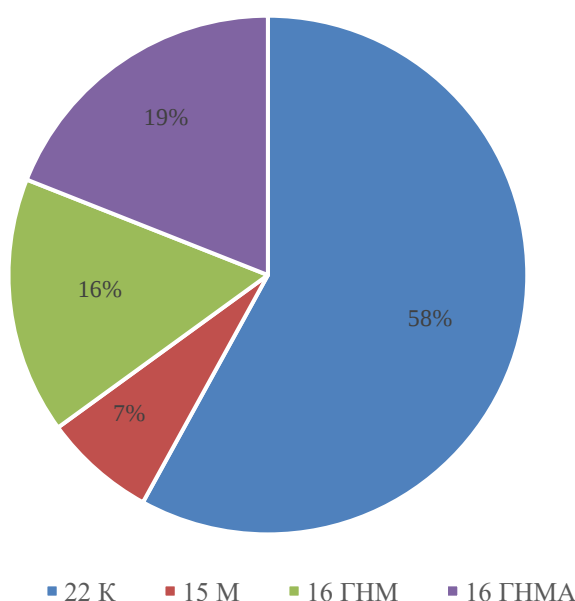


Рис. 6. Доля эксплуатируемых барабанов котлов, изготовленных из различных марок сталей
Fig. 6. Proportion of operating boiler drums made of different steel grades

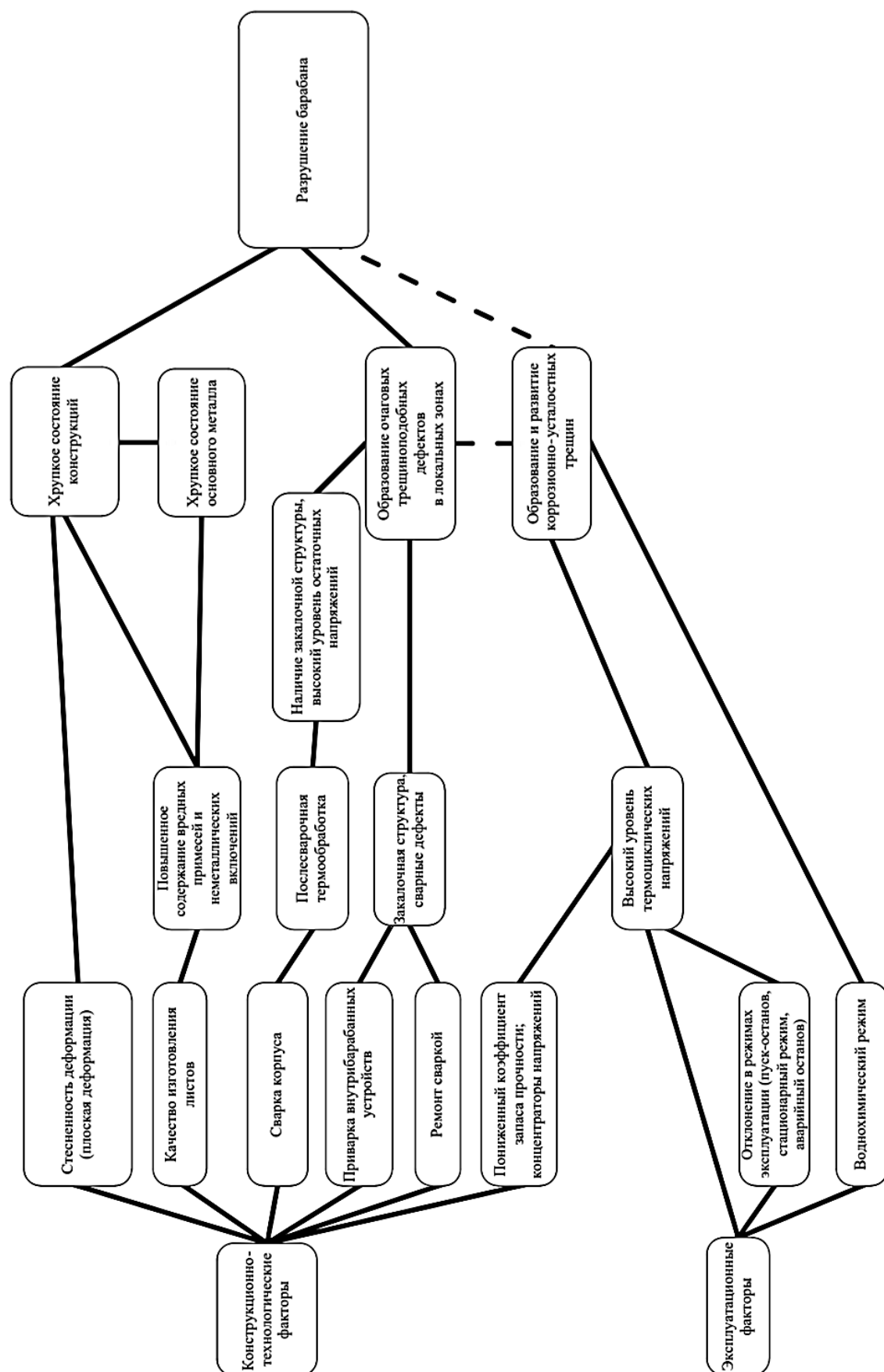


Рис. 7. Совокупность факторов, ответственных за разрушение барабанов котлов высокого давления
Fig. 7. A combination of factors causing failures of high-pressure boiler drums

Из рис. 7. следует, что конструкционно-технологические факторы являются ключевыми в процессе формирования дефектов, вызывающих разрушение барабанов. При этом такие факторы, как производственные (конструкционные) и эксплуатационные, могут быть взаимосвязаны. К тому же, технологические дефекты могут развиваться в процессе эксплуатации при воздействии рабочих напряжений и среды теплоносителя одновременно. Поэтому огромное количество подверженных данным факторам барабанов стоит заменить в ближайшем будущем либо производить ремонты, которые будут также иметь огромные капиталовложения.

Сравнительные характеристики сталей 16ГНМА и WB36. Стали 16ГНМА и WB36 обладают очень близким химическим составом, за исключением наличия меди в WB36. Нормальная микроструктура данных сталей состоит из бейнита и феррита. При отпуске медь осаждается в виде мелких частиц и служит в качестве упрочняющего элемента. За счет этого сталь WB36 обладает повышенными прочностными характеристиками, что позволяет снизить толщину стенки барабана по сравнению со сталью 16ГНМА на 18–20% при расчете толщины стенки барабана котла по нормам РД 10-249-98. Сталь 16ГНМ при изготовлении барабанов была заменена на сталь 16ГНМА, отвечающую повышенным требованиям к качеству листов для изготовления барабанов котлов высокого давления⁶. Кроме того, была увеличена толщина стенки барабана с расчетных 92–95 мм до 115 мм.

В процессе эксплуатации трубопроводов и барабанов, изготовленных из стали WB36, были выявлены повреждения трубопроводов и разрушения барабанов котлов⁷. Анализ случаев выявил в качестве причины упрочнение материала, вызванное осаждением остатков растворенной меди при длительной эксплуатации при температуре 320–350°С. Это также приводит к уменьшению ударной вязкости и

дает существенный сдвиг вверх критической температуры металла. Вышеприведенные данные дают основания к тому, чтобы при расчете барабана из стали WB36 закладывать повышенный коэффициент запаса прочности.

Технология производства барабанов котлов подразумевает использование сварки для соединения элементов конструкции барабанов и при дальнейшей их эксплуатации. В связи с этим необходимо отметить наличие отработанной и проверенной технологии сварки элементов из стали 16ГНМА [13–21]. Для стали WB36 также существует разработанная и испытанная за рубежом технология сваривания элементов из этого материала. В большинстве своем используются запатентованные материалы и технологии.

КРАТКОЕ ОБОБЩЕНИЕ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ВАРИАНТОВ ЗАМЕНЫ

Замена барабана является непростым технологическим решением и может видоизменяться в зависимости от множества факторов [1]. Например, от наличия подъемной техники, от качества подъездных путей, котельного отделения главного корпуса, от ряда экономических факторов.

Наиболее явным вариантом замены барабана, отработавшего свой ресурс, представляется замена на аналогичный барабан, выполненный из подобных материалов. Перевозка, демонтажное обслуживание, работы по подъему столь тяжелого и негабаритного изделия в условиях действующей электростанции приведут к серьезным материальным затратам. В некоторых случаях такая замена не является возможной по условиям компоновки котельного отделения, отсутствия в нем штатных ГПМ.

Второй рассматриваемый вариант – замена барабана на барабан из более прочной стали. Это приведет к уменьшению массы изделия за счет утончения стенок, однако все внутрикорпусные устройства будут

⁶ОСТ 108.030.118-78. Листы из стали марки 16ГНМА для барабанов котлов высокого давления. Технические условия.

⁷Интеллектуальная диагностика и предиктивный анализ – основа цифровой энергетики / Интеграл [Электронный ресурс]. URL: <https://integral-russia.ru/2017/10/06/intellektualnaya-dagnostika-i-prediktivnyj-analiz-osnova-tsifrovoj-energetiki> (12.03.2022).

выполнены из тех же материалов. Можно предположить, что по схеме включения при такой замене изменений не будет. Новый барабан будет находиться на штатном месте и включаться по двухступенчатой или трехступенчатой схеме испарения в зависимости от типа котла. При замене барабана возможность улучшения качества котловой воды и насыщенного пара не рассматривается.

Третий вариант – замена барабана на альтернативную схему с малым барабаном, задачей которой является упрощение набора технологических мероприятий при замене барабана, минимизация изменения в конструкции и эксплуатации котла, улучшение качества котловой воды. Смысл модернизации состоит в организации устойчивого тока котловой воды по длине барабана, что увеличивало бы число ступеней испарения и, как следствие, повышало бы качество котловой воды и насыщенного пара.

Техническая реализация схемы с малым барабаном представляет собой барабан уменьшенной длины, но при этом стандартного диаметра, к которому подключается батарея циклонов, представленная на рис. 8. Циклоны в данной схеме могут быть соединены в различном порядке и зависеть от следующих факторов:

- паропроизводительности котла;
- длины малого барабана (площади зеркала испарения малого барабана);

- возможности компоновки малого барабана и батарей циклонов на верху котла;
- числа ступеней испарения.

Можно констатировать факт, что схема «барабан-циклон» с двумя или тремя ступенями испарения благополучно работает на всех котельных агрегатах. Наиболее распространенной является двухступенчатая схема испарения с четырьмя циклонами, включенными попарно справа и слева от барабана.

Замена барабана на батарею циклонов, с одной стороны, представляется наиболее перспективной, а с другой – требует проведения достаточно большого объема экспериментальных работ для исследования номинальных и переходных режимов эксплуатации котла, изменения автоматики агрегата.

Плюсы безбарабанной схемы при доставке и монтаже оборудования:

- логистика батарей циклонов;
- простота подъема циклонов;
- возможность сварки по месту установки циклонов.

Преимуществом безбарабанной схемы при эксплуатации котла является его повышенная маневренность в связи с уменьшением металлоемкости сепарационных устройств.

Минусы безбарабанной схемы:

- отсутствие данных исследований;
- сложность работы автоматических систем / удорожание работ по наладке;

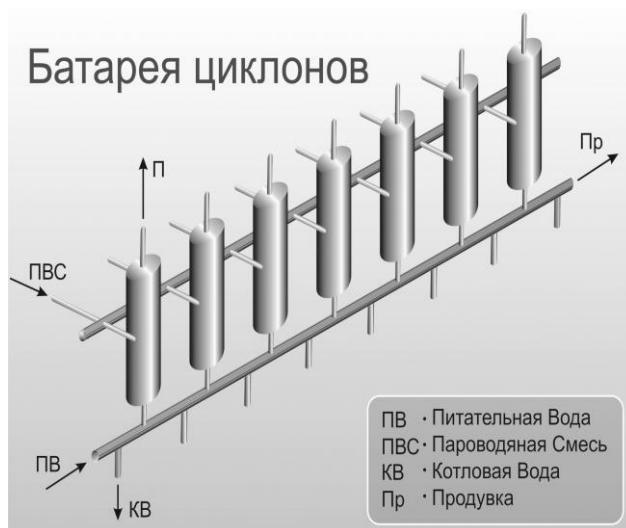


Рис. 8. Эскиз батареи циклонов
Fig. 8. A sketch of a cyclone battery

– невозможность определения или оценки поведения уровня в циклонах при растопке котла, останове или при переходе с одного режима на другой, что связано с изменением формы мениска раздела фаз при центробежной сепарации.

Существует несколько технически возможных вариантов соединения батарей: параллельные, последовательные и последовательно-параллельные. Из этих вариантов могут формироваться секционные схемы.

Комбинация количества циклонов и их способ соединения в батарею зависят от следующих факторов:

– гидравлическое сопротивление – градиент давления по раздающему коллектору обусловлен большим количеством циклонов, к которым непосредственно происходит подача питательной воды;

– возможности попадания в «непродуваемые зоны» – в основном этот фактор надо учитывать при проектировании точки раздачи питательной воды;

– конструкции конкретного котла.

«Основные недостатки батарейных схем:

– меньшее зеркало испарения по сравнению с существующим барабаном (по расчетам ВТИ, зеркало испарения составляет меньшую в 17,5 раза площадь);

– аккумулирующая способность котла уменьшается по причине отсутствия запаса воды в барабане;

– в переходных режимах возникают угрозы уноса влаги в пароперегреватель или захвата

пара в опускную трубу за счет сложности регулирования уровней в циклонах;

– может возникать солевое заклинивание при неправильной подаче питательной воды;

– в батарейных схемах не предусмотрена возможность промывки пара» [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной статьи состоит в проведении подробного анализа возможных технических решений при замене барабанов котлов, отработавших свой индивидуальный ресурс. Анализ технических решений проводился по двум главным категориям – технической и экономической.

В настоящее время для изготовления барабанов котлов используется сталь 16ГНМА, однако в современных котлах-утилизаторах, импортируемых из-за рубежа, для изготовления барабана применяется сталь WB36. Таким образом, при замене барабана появляется возможность выбора материала изготовления. Ограничивающими параметрами при замене барабана являются три группы показателей: затраты на монтажные работы, изменение методов и способов эксплуатации котла после проведения замены (см. также [22]), а также качество котловой воды и перегретого пара.

По всему вышеизложенному можно сделать вывод, что при выборе технического решения по замене барабана рекомендуется выбирать альтернативную схему с малым барабаном.

Список источников

1. Зройчиков Н.А., Горбуров Д.В. Комплексное обоснование замены барабанов, отработавших свой срок // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва, 2 марта 2017 г.). М.: МЭИ, 2011. Т. 3. С. 98.
2. Байдакова Н.В., Афонин А.В., Благочиннов А.В. Разработка алгоритма реализации ремонтной программы паровых котлов и турбин ТЭС по техническому состоянию энергетического оборудования // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 1. С. 40–44. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-40-44>.
3. Попов А.Б. О предельных сроках эксплуатации энергетического оборудования // Энергетик. 2021. № 2. С. 8–14. <https://doi.org/10.34831/EP.2021.18.78.002>.
4. Федоров А.И., Петров И.П., Тоболь Д.А. Анализ

5. влияния конструкции и состояния внутрикотловых устройств на надежность работы барабанных котлов // Электрические станции. 2006. № 6. С. 65–73.
6. Ларькин И.С., Овчинникова С.М. Анализ принципов сепарации в котлоагрегатах с точки зрения энергетической эффективности // Ограв-Online. 2014. № 23. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-printsipov-separatsii-v-kotloagregatah-s-tochki-zreniya-energeticheskoy-effektivnosti> (12.03.2022).
7. Молдареева М.Д. Обзор сепарационных устройств барабанных котлов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва, 11–12 марта 2021 г.). М.: Радуга, 2021. С. 877.
8. Мынкин К.П. Сепарационные устройства паровых котлов. М.: Энергия, 1971. 192 с.

8. Бузников Е.Ф. Циклонные сепараторы в паровых котлах. М.: Энергия, 1969. 248 с.
9. Ланин А.А., Дьяков Ю.Г., Рева В.В. Влияние технологии сварочного ремонта на хрупкую прочность барабанов высокого давления // Энергетик. 2018. № 4. С. 14–17.
10. Sultanov M.M., Baidakova N.V., Afonin A.V. Analysis of the technical condition of the equipment of generating systems // Materials Science and Engineering: IOP Conference Series. 2020. Vol. 1035. P. 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1035/1/012004>.
11. Гринь Е.А. Хрупкие разрушения барабанов котлов высокого давления – основные причины и способы предотвращения // Теплоэнергетика. 2008. № 2. С. 40–45.
12. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
13. Гринь Е.А., Анохов А.Е., Зеленский А.В., Федина И.В. Исследование металла барабанов паровых котлов из стали 16ГНМ после длительной эксплуатации // Теплоэнергетика. 2010. № 6. С. 37–42.
14. Ожигов Л.С., Митрофанов А.С., Толстоуцкая Г.Д., Василенко Р.Л., Руденко А.Г., Ружичкий В.В. [и др.]. Комплексные исследования металла барабанов котлов тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2017. № 5. С. 40–47. <https://doi.org/10.1134/S004036361705006X>.
15. Султанов М.М., Байдакова Н.В., Афонин А.В. Анализ оценки технического состояния оборудования генерирующих систем // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 16–18 сентября 2020 г.). Воронеж: ВГТУ, 2020. С. 312–313.
16. Косинов Ю.П., Романов А.А., Трофимов Ю.В. Совершенствование ремонта энергетического оборудования для обеспечения надежной его эксплуатации за пределами паркового ресурса и сроков службы / Триггерация [Электронный ресурс]. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/691-Sovershenstvovanie-remontaenergeticheskogo-oborudovaniya> (12.03.2022).
17. Grabchak E.P. Assessment of technical condition of power equipment in digital economy // Safety and reliability of the electric power industry. 2017. Vol. 10. Iss. 4. P. 268–274. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274>.
18. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Kuryanova E.V., Skopova E.M. Mathematical model of the processes of restoration of power equipment in power systems by criterion of the index of technical condition // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1683. P. 042041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042041>.
19. Sultanov M.M., Tyagunov M.G., Baydakova N.V. Procedure for assessment of technical condition of equipment of generating systems taking into account control effects on the basis of data management complex of monitoring and diagnostics system // Journal of Physics Conference Series. 2020. Vol. 1683. Iss. 4. P. 042035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042035>.
20. Kokorin E.L., Khalyasmaa A.I. Electrical equipment condition based maintenance strategy // International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781439>.
21. Султанов М.М., Аракелян Э.К., Шестопалова Т.А., Смирнов А.А., Горбань Ю.А. Усовершенствование информационного обеспечения надежности и безопасности энергетического оборудования современных генерирующих систем на основе цифровой технологии «Блокчейн» // Новое в российской электроэнергетике. 2019. № 1. С. 6–13.
22. Моисеев Д.О., Охлопков А.В. Исследование особенностей эксплуатации паровых энергетических котлов при замене главного сепарационного устройства // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XXVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (г. Москва, 17–19 марта 2022 г.). М.: Радуга, 2022. С. 705.

References

1. Zrojchikov N.A., Gorburov D.V. Comprehensive justification for expired service life drum replacement. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy dokladov XVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov i aspirantov = Radioelectronics, electrical engineering and power engineering: report abstracts of the 17th International scientific and technical conference of students and postgraduate students*. 2 March 2017, Moscow. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2011, vol. 3, p. 98. (In Russ.).
2. Baidakova N.V., Afonin A.V., Blagochinnov A.V. Development of an implementation algorithm of CHP steam boiler and turbine repair program based on technical condition of power equipment. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry*. 2021;14(1):40-44. (In Russ.). <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-1-40-44>.
3. Popov A.B. On service life limits of power equipment. *Energetik*. 2021;2:8-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.34831/EP.2021.18.78.002>.
4. Fedorov A.I., Petrov I.P., Tobol' D.A. Analysis of the influence of inter-boiler device design and state on drum boiler operation reliability. *Elektricheskie stantsii*. 2006;6:65-73. (In Russ.).
5. Larkin I.S., Ovchinnikova S.M. An analysis of separation principles in boilers in terms of energy efficiency. *Ogarev-Online*. 2014;23. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-printsipov-separatsii-v-kotloagregatah-s-tochki-zreniya-energeticheskoy-effektivnosti> [Accessed 12th March 2022]. (In Russ.).
6. Moldareeva M.D. Review of separation devices for drum boilers. In: *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy dokladov XXVII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii studentov i aspirantov = Radioelectronics, electrical engineering and power engineering: report abstracts of the 27th International scientific and technical*

conference of students and postgraduate students. 11–12 March 2021, Moscow. Moscow: Raduga; 2021, p. 877. (In Russ.).

7. Mynkin K.P. *Separation devices of steam boilers*. Moscow: Energiya; 1971, 192 p. (In Russ.).

8. Buznikov E.F. *Cyclone separators in steam boilers*. Moscow: Energiya; 1969, 248 p. (In Russ.).

9. Lanin A.A., D'yakov Yu.G., Reva V.V. The effect of welding technology on the brittle strength of high-pressure drums. *Energetik*. 2018;4:14-17. (In Russ.).

10. Sultanov M.M., Baidakova N.V., Afonin A.V. Analysis of the technical condition of the equipment of generating systems. In: *Materials Science and Engineering: IOP Conference Series*. 2020;1035:012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1035/1/012004>.

11. Grin E.A. Brittle fractures of the drums of high-pressure boilers: main causes and methods for preventing them. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2008;2:40-45. (In Russ.).

12. Makhutov N.A. *Deformation criteria of destruction and strength calculation of structural elements*. Moscow: Mashinostroenie; 1981, 272 p. (In Russ.).

13. Grin E.A., Anokhov A.E., Zelenskii A.B., Fedina I.V. Studying the metal of steam boiler drums made of grade 16GNM steel after its long-term operation. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2010;6:37-42. (In Russ.).

14. Ozhigov L.S., Mitrofanov A.S., Tolstolutskaia G.D., Vasilenko R.L., Rudenko A.G., Ruzhytskyi V.V., et al. Comprehensive investigation of the metal in drums of boilers at thermal power stations. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2017;5:40-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S004036361705006X>.

15. Sultanov M.M., Bajdakova N.V., Afonin A.V. Analysis of the technical condition assessment of generating system equipment. *Alternativnaya i intellektual'naya energetika: materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii = Alternative and intelligent power engineering: materials of the 2nd International scientific and practical conference*. 16–18 September 2020. Voronezh, Voronezh State Technical University; 2020;312-313. (In Russ.).

16. Kosinov Yu.P., Romanov A.A., Trofimov Yu. V. Improving power equipment repair to ensure its reliable operation

beyond the fleet life and service life. *Trigeneratsiya*. Available from:

<http://www.combienergy.ru/stat/691-Sovershenstvovanie-remontaenergeticheskogo-oborudovaniya> [Accessed 12th March 2022]. (In Russ.).

17. Grabchak E.P. Assessment of technical condition of power equipment in digital economy. *Safety and reliability of the electric power industry*. 2017;10(4):268-274. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2017-10-4-268-274>.

18. Kuryanov V.N., Sultanov M.M., Kuryanova E.V., Skopova E.M. Mathematical model of the processes of restoration of power equipment in power systems by criterion of the index of technical condition. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1683:042041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042041>.

19. Sultanov M.M., Tyagunov M.G., Bajdakova N.V. Procedure for assessment of technical condition of equipment of generating systems taking into account control effects on the basis of data management complex of monitoring and diagnostics system. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1683(4):042035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042035>.

20. Kokorin E.L., Khalyasmaa A.I. Electrical equipment condition based maintenance strategy. In: *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781439>.

21. Sultanov M.M., Arakelyan E.K., Shestopalova T.A., Smirnov A.A., Gorban Yu.A. Improving information support of reliability and safety of modern generating system power equipment based on Blockchain digital technology. *Novoe v rossijskoj elektroenergetike*. 2019;1:6-13. (In Russ.).

22. Moiseev D.O., Okhlopov A.V. Studying operation features of steam power boilers under main separator replacement. In: *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy dokladov XXVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii studentov i aspirantov = Radio electronics, electrical engineering and energy: abstracts of the 28th International Scientific and Technical Conference of students and postgraduates*. 17–19 March 2022, Moscow, Moscow: Raduga; 2022, p. 705. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Охлопков Андрей Владимирович,
ассистент кафедры теоретических основ
теплотехники им М.П. Вукаловича,
НИУ «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14/1,
Россия;
начальник службы экспертизы и технического
развития,
ПАО «Мосэнерго»,
115280, г. Москва, ТЭЦ-9, ул. Автозаводская, 12/1,
Россия
✉ OhlopkovAV@mosenergo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0973-3863>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Okhlopov,
Assistant Professor of the M.P. Vukalovich Department
of Theoretical Foundations of Heat Engineering,
National Research University "Moscow Power
Engineering Institute",
14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250,
Russia;
PJSC "Mosenergo",
12/1, Avtozavodskaya St., CHP-9, Moscow 115280,
Russia
✉ OhlopkovAV@mosenergo.ru
<http://orcid.org/0000-0002-0973-3863>

Попов Николай Витальевич,

эксперт службы экспертизы и технического развития,
ПАО «Мосэнерго»,
115280, г. Москва, ТЭЦ-9, ул. Автозаводская, 12/1,
Россия
Popov_NV@mosenergo.ru

Моисеев Данил Олегович,

студент,
НИУ «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14/1,
Россия
MoiseevDO@mosenergo.ru

Битней Владислав Дмитриевич,

эксперт службы экспертизы и технического развития,
ПАО «Мосэнерго»,
115280, г. Москва, ТЭЦ-9, ул. Автозаводская, 12/1,
Россия
BitneyVD@mosenergo.ru
<http://orcid.org/0000-0003-2814-6709>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 31.01.2022; одобрена после рецензирования 28.06.2022; принята к публикации 08.02.2023.

Nikolai V. Popov,

Expert of Expertise and Technical Development Service,
PJSC "Mosenergo",
12/1, Avtozavodskaya St., CHP-9, Moscow 115280,
Russia
Popov_NV@mosenergo.ru

Danil O. Moiseev,

Student,
National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
14/1, Krasnokazarmennaya St., Moscow 111250, Russia
MoiseevDO@mosenergo.ru

Vladislav D. Bitney,

Expert of Expertise and Technical Development Service,
PJSC "Mosenergo",
12/1, Avtozavodskaya St., CHP-9, Moscow 115280,
Russia
BitneyVD@mosenergo.ru
<http://orcid.org/0000-0003-2814-6709>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 31.01.2022; approved after reviewing 28.06.2022; accepted for publication 08.02.2023.