

А. Ю. Приймак, М. Ю. Сербиновский

АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФОРСУНОК ВПРЫСКИВАЮЩИХ ПАРООХЛАДИТЕЛЕЙ

Аннотация. На основании проведенного анализа научно-технической и патентной информации, дефектов и разрушений основных элементов конструкции впрыскивающих парохладелителей (ВПО), выявленных в ходе эксплуатации котлоагрегатов, в частности их форсунок, отмечены основные процессы, влияющие на ресурс ВПО. С учетом результатов анализа и современного состояния исследований по повышению надежности и ресурса ВПО сформулированы пути совершенствования основных элементов конструкции ВПО, которые направлены на повышение надежности и ресурса ВПО при сохранении высокого качества распыла форсунками охлаждающей воды. Эти пути включают выбор перспективных материалов форсунок и оптимизацию конструкции форсунок и других частей ВПО с учетом выявленных потенциальных зон разрушения, моделирования напряженно-деформированного состояния, полей температур форсунок и ВПО в целом, особенностей распределения потоков сред и полей распределения скоростей сред в форсунках и ВПО в целом, эрозионного износа их поверхностей, процесса трещинообразования и развития трещин.

Ключевые слова: впрыскивающий парохладелитель, центробежная форсунка, ресурс, паровой котел, регулирование температуры пара.

Для цитирования: Приймак, А. Ю. Анализ причин разрушения центробежных форсунок впрыскивающих парохладелителей / А. Ю. Приймак, М. Ю. Сербиновский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4. – С. 48–53. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_48.

Введение

В настоящее время разрабатываются масштабные планы по развитию Восточного полигона России, в том числе его железных дорог. Для обеспечения третьего этапа электрификации БАМа и Транссиба необходимо до 2030 года дополнительно ввести 1,8 ГВт новых мощностей тепловых электрических станций (ТЭС) в основном угольной генерации [1, 2]. Такая грандиозная задача может быть решена только при строительстве крупных электростанций с современными и высокоманевренными энергоблоками большой мощности. Другой стороной энергообеспечения развития железных дорог является продолжающаяся реализация программы ДПМ-2, которая предусматривает широкую модернизацию электроэнергетики России [3, 4].

Высокая маневренность энергоблоков напрямую связана с качественным регулированием параметров пара, уходящего из котла в турбину блока. Одним из существенных элементов, обеспечивающих эффективное регулирование температуры пара в паропроводах котла энергоблока ТЭС, являются впрыскивающие парохладелители (ВПО), которые обеспечивают подачу и распыление нужного количества воды в паровой тракт. Подача воды в паровой тракт котла как способ регулирования температуры пара отличается простотой, удобством эксплуатации и автоматизации, экономичностью и возможностью обеспечения широкого диапазона регулирования.

Работа ВПО, осуществляющаяся в нестационарных пусковых режимах, связана со значительной разницей температур пара и впрыскиваемой воды, что вызывает большие градиенты температур в элементах конструкции ВПО и, как следствие, высокие напряжения в металле, которые зачастую приводят к разрушению этих элементов конструкции: форсунок, водоподводящих устройств, защитных рубашек и элементов их дистанционирования.

Самым ответственным узлом, который определяет ресурс самого ВПО, а также ресурс и надежность работы энергоблока в целом, является центробежная форсунка для подачи питательной воды в паровую область трубопровода. Об этом свидетельствуют статистические данные анализа более двух десятков аварий на крупнейших энергоблоках тепловых электростанций [5]. Многолетний опыт и исследования выявленных повреждений позволили создать усовершенствованную конструкцию центробежной форсунки ВПО, которая используется в современных отечественных котлах [6].

Основная часть

На сегодняшний день проблема разрушения центробежных форсунок остается нерешенной, о чем свидетельствует информация, полученная от крупных тепловых электростанций. Например, в 2021–2023 гг. Пермская ГРЭС сообщала о разрушении центробежных форсунок пусковых ВПО на всех трех энергоблоках с котлами ТПП-804 [7, 8]. На каждом из таких котлов установлено по два пусковых ВПО, каждый из которых имеет по четыре форсунки. Вышедшие из строя центробежные форсунки были разрушены в процессе эксплуатации (рис. 1), что повлекло попадание элементов разрушенных форсунок в паропроводы (рис. 2) с дальнейшим продвижением их к паровой турбине. Нарботка энергоблока ст. № 2 до разрушения форсунки ВПО составляла не более 20 тысяч часов, что вызывает особую настороженность и необходимость регулярной диагностики состояния форсунок. Следует отметить, разрушение форсунок существенно снижает эффективность регулирования выходных параметров пара, а также качество распыла охлаждающей воды. Попадание же капель воды на защитную рубашку ВПО приводит к появлению на ней трещин и последующему разрушению.



Рис. 1. Фото разрушенной форсунки



Рис. 2. Фото разрушенного впрыскивающего устройства

В связи с вышеизложенным требуется проведение детального анализа вида и причин разрушений элементов ВПО, особенно форсунок, и формулирования задач по дальнейшему совершенствованию конструкции ВПО.

Регулирование температуры пара в котлах производится впрыском воды (собственного конденсата или питательной воды) в горизонтальный или вертикальный участок парового тракта котла (коллектор или трубу паропровода). Впрыск осуществляется в ВПО, который представляет собой теплообменный аппарат смешивающего типа (рис. 3 [6]) и состоит из цилиндрического корпуса, выполненного из толстостенной трубы, тонкостенной стальной защитной рубашки, закрепленной на корпусе с помощью рёбер с одной стороны и цилиндрической опоры – с другой стороны, которая, в свою очередь, прикреплена к корпусу с помощью рёбер. К корпусу приварен штуцер с конусообразным патрубком для ввода и закрепления водоподводящей трубы, на одном конце которой приварена втулка, в которой центрируется корпус центробежной форсунки и к которой приварен венец, соединённый с корпусом форсунки. Корпус форсунки имеет внутреннюю полость с цилиндрической и полусферической частями. К корпусу форсунки приваривается доньшко с полусферической полостью. Корпус форсунки, доньшко и венец изготавливают из металла стойкого к эрозии. Корпус форсунки имеет тангенциальные каналы и сопло, а со стороны потока пара защищён кожухом.

Во время работы ВПО вода подаётся по водоподводящей трубе через тангенциальные каналы во внутреннюю полость центробежной форсунки. Происходит закручивание потока жидкости и распыление её в перегретый пар, проходящий через ВПО, затем перемешивание капель воды и пара и испарение воды. За счет испарения воды пар охлаждается до заданной температуры.

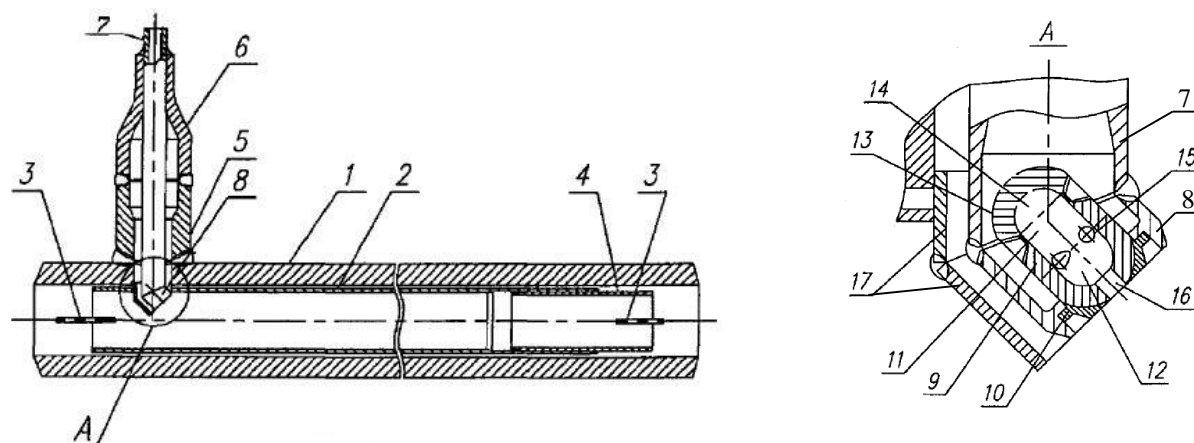


Рис. 3. Конструкция ВПО в целом и центробежной форсунки:

- 1 – корпус; 2 – защитная рубашка; 3 – ребра; 4 – цилиндрическая опора; 5 – штуцер; 6 – патрубок;
 7 – водоподводящая труба; 8 – втулка форсунки; 9 – корпус форсунки; 10 – венец;
 11 – внутренняя полость корпуса; 12 – цилиндрическая часть полости; 13 – доньшко корпуса;
 14 – полусферическая часть внутренней полости; 15 – тангенциальные каналы;
 16 – сопло; 17 – защитный кожух

Защитная рубашка ВПО предотвращает попадание охлаждающей среды на толстостенный корпус и, соответственно, его растрескивание. Защитный кожух исключает прямой контакт перегретого пара с водоподводящей трубой, которая имеет температуру впрыскиваемой воды. Тем самым снижаются температурные напряжения в водоподводящей трубе и форсунке, уменьшается вероятность образования трещин, повышается надежность ВПО и котла в целом.

Металлографический макроанализ выполнялся использованием бинокулярного микроскопа STEMI 2000-C фирмы KARL ZEISS. Микроанализ проводился на стационарном оптическом микроскопе Olympus с анализатором фрагментов микроструктуры твердых тел Siams 800.

Контроль твердости образцов осуществлялся по общепринятой методике с помощью твердомера Виккерса «Металаб 422» (свидетельство о поверке № С-ВР/07-04-2023/241882692, действительно до 06.04.2024) по шкале Роквелла.

В рамках исследования металла элементов разрушенных форсунок силами лаборатории технической диагностики Пермской ГРЭС [7, 8] и центральной заводской лаборатории ПАО ТКЗ «Красный котельщик» [9] были выявлены множественные кольцевые и радиальные трещины, располагающиеся, в основном, между входными отверстиями, а также трещины, отходящие от выходного отверстия форсунок (рис. 4). Трещины распространяются по подкалочной троостомартенситной структуре, окончание трещин зафиксировано вблизи границы части металла форсунки подкалочной структуры и со структурой основного металла, не претерпевшей изменения. Твердость металла форсунок в зоне подкалочной структуры составляет 43–44 HRC.

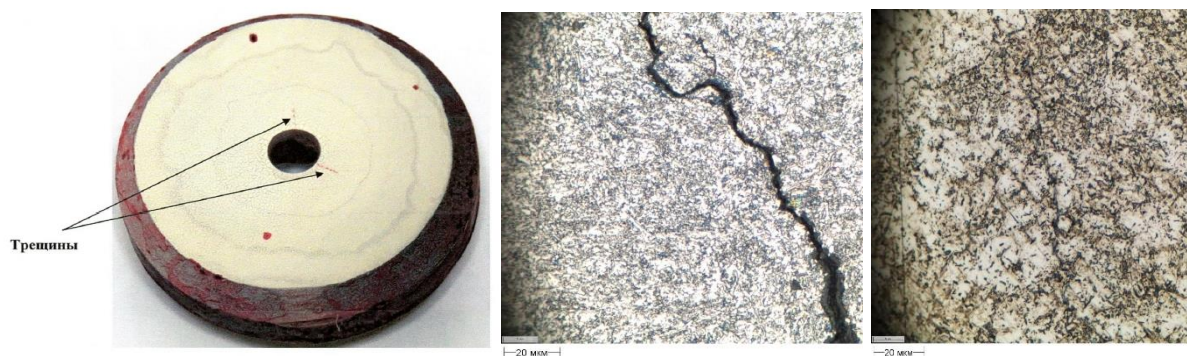


Рис. 4. Трещины на элементах разрушенных форсунок

Кроме трещин на наружной поверхности форсунок в зоне входных отверстий и внутренней поверхности донной части форсунки выявлены следы эрозионного износа от воздействия потока питательной воды (см. рис. 1). Такой износ приводит к утонению стенок форсунки с последующим

увеличением в них напряжений, пластической деформации и разрушению стенок. В зонах металла с высокой твердостью эрозионный износ вызывает появление и развитие трещин, например, в зоне отверстий подачи воды во впрыскивающую камеру форсунки.

Таким образом разрушение форсунок происходит под влиянием двух параллельно протекающих процессов. Это, во-первых, появление и рост трещин ввиду закалки и повышения твердости за счет периодически изменяющейся температуры во время пусков и остановов котла и высоких напряжений, в том числе температурных, а во-вторых, эрозионный износ материала на локальных участках поверхности форсунок в зонах высокой скорости движения среды.

Несомненно необходима необходимость продолжения совершенствования конструкции форсунок ВПО с целью нивелирования причин эрозионного износа и снижения напряжений при сохранении или улучшении качества распыла впрыскивающей воды.

Однако нужно отметить, что исследования распределения напряжений в материале форсунок и ВПО в целом крайне скудны, в качестве примера можно привести работы [10, 11]. Нет экспериментальных научных данных по эрозионному износу форсунок, за исключением анализа разрушений форсунок, отсутствуют исследования по распределению в них скоростей потоков среды, математическому моделированию процессов, происходящих в форсунках ВПО, и их напряженно-деформированному состоянию. Всё это сужает базу материалов, на основании которых возможно дальнейшее эффективное совершенствование форсунок ВПО. Недостаточно исследован вопрос выбора оптимального материала, который бы сочетал высокую стойкость к трещинообразованию в специфических условиях работы форсунок ВПО и устойчивость к эрозионному износу. Недостаточно исследован вопрос о термообработке частей форсунок и форсунок в сборе для создания необходимой структуры, снижения остаточных напряжений.

Выводы

В связи с вышеизложенным можно сделать следующие выводы:

1 Проведенный инженерно-технический анализ научно-технической и патентной информации по конструкциям центробежных форсунок ВПО показал необходимость продолжения процесса совершенствования конструкции форсунок и выпрыскивающих пароохладителей котлов ТЭС с целью повышения их ресурса и надежности работы.

2 Целесообразно дальнейшее проведение работ по поиску оптимального материала форсунок и их термообработки, обеспечивающей нужную структуру во всех частях форсунки.

3 Требуется оптимизация конструкции центробежной форсунки на основании выявленных потенциальных зон разрушения.

4 Необходимо проведение комплекса исследований по моделированию напряженно-деформированного состояния и полей температур в форсунках и ВПО в целом и их частях, особенностей распределения потоков сред, полей распределения скоростей потока сред в форсунках и ВПО в целом, эрозионного износа их поверхностей, процесса трещинообразования и развития трещин в их материале.

5 Результаты моделирования, выбора материалов и их термообработки должны быть подтверждены механическими испытаниями, металлографическими исследованиями, испытаниями на эрозионную стойкость, а также натурными испытаниями форсунок и ВПО в условиях, соответствующих их эксплуатационным режимам.

Список литературы

- 1 БАМу добавят мощности // Коммерсантъ. Электроэнергетика : официальный сайт. – 2021. – 10 июня. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4850205?ysclid=lo2jeuy6ec641013042> (дата обращения 23.10.2023).
- 2 РЖД скорректировала программу модернизации БАМа и Транссиба // РЖД : официальный сайт. – 2023. – 11 июля. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=210583&ysclid=lo2lhi4v6x970846203> (дата обращения 20.10.2023).

References

- 1 BAM will add capacity // Kommersant. Electric Power Industry : official website. – 2021. – June 10. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4850205?ysclid=lo2jeuy6ec641013042> (date of access: 10/23/2023).
- 2 Russian Railways has adjusted the modernization program of BAM and Transsib // Russian Railways : official website. – 2023. – July 11. – URL: <https://company.rzd.ru/ru/9401/page/78314?id=210583&ysclid=lo2lhi4v6x970846203> (date of access: 10/20/2023).

3 Постановление Правительства Российской Федерации от 25.01.2019 № 43 «О проведении отборов проектов модернизации генерирующих объектов тепловых электростанций» // Официальное опубликование правовых актов (pravo.gov.ru). – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201901300002?ysclid=lo2j5q7rer616789193&index=1> (дата обращения 23.10.2023).

4 Что такое программа ДПМ-2 и чем она обернется для энергетиков // БКС Экспресс / Среднесрочные тренды. – 07.09.2018. – URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/chto-takoe-programma-dpm-2-i-chem-ona-obernetsia-dlia-energetikov?ysclid=lo2kloellu129301016> (дата обращения 23.10.2023).

5 **Израилев, Ю. Л.** Живучесть паропроводов стареющих тепловых электростанций / Ю. Л. Израилев, Ф. А. Хромченко, А. П. Ливинский. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва : Торус-пресс, 2002. – 599 с. – ISBN 5-94588-007-8.

6 **Патент № 2339873 Российская Федерация, МПК F22G 5/12.** Впрыскивающий пароохладитель / А. И. Сивцов. – № 2006136072/06; заявл. 20.04.2008; опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.

7 Заключение № 12-04/21 по результатам исследования повреждения впрыскивающих устройств пусковых пароохладителей паропровода «острого» пара энергоблока ст. № 2 / Лаборатория технической диагностики Пермской ГРЭС. – 2021. – 14 с.

8 Протокол осмотра пусковых впрысков ОП бл. 3, нитка Б (12г), лаборатория технической диагностики «Пермской ГРЭС». 2021. – 14 с.

9 Отчет № 4307-380-2021 по исследованию разрушенных элементов форсунок пусковых пароохладителей котла ТПП-804 ст. 2 филиала «Пермская ГРЭС» / Центральная заводская лаборатория ПАО ТКЗ «Красный котельщик». – 2021. – 28 с.

10 **Плоткин, Е. Р.** Исследование термостойкости водоподающего устройства впрыскивающего пароохладителя / Е. Р. Плоткин, В. Н. Черняк, М. Н. Зингер // Электрические станции. – 1991. – № 10. – С. 53–57.

11 **Черняк, В. Н.** Повышение надежности впрыскивающих пароохладителей низкого давления котла ТГМП-314. / В. Н. Черняк, Н. А. Зройчиков, Т. М. Макарова // Теплоэнергетика. – 1999. – № 2. – С. 44–47.

3 Decree of the Government of the Russian Federation No. 43 dated 25.01.2019 “On the selection of projects for the modernization of generating facilities of thermal power plants” // Official publication of legal acts (pravo.gov.ru). – URL:

<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201901300002?ysclid=lo2j5q7rer616789193&index=1> (date of access: 10/23/2023).

4 What is the PDM-2 program and how it will turn out for power engineers // BCS Express / Medium-term trends. – 07.09.2018. – URL: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/chto-takoe-programma-dpm-2-i-chem-ona-obernetsia-dlia-energetikov?ysclid=lo2kloellu129301016> (date of access: 10/23/2023).

5 **Izrailev, Y. L.** Survivability of steam pipelines of aging thermal power plants. / Y. L. Izrailev, F. A. Khromchenko, A. P. Livinsky. – 3rd ed., corr. and expand. – Moscow : Torus press, 2002. – 599 p. – ISBN 5-94588-007-8.

6 **Patent No. 2339873 Russian Federation, IPC F22G 5/12.** Spray attemperator / A. I. Sivtsov. – No. 2006136072/06; applied 20.04.2008; published on 27.11.2008, Bull. No. 33.

7 Conclusion No. 12-04/21 based on the results of a study of damage to the spray devices of the starting attemperators of the steam pipeline of live steam, Power unit No. 2 / Permskaya GRES technical diagnostics laboratory. – 2021. – 14 p.

8 Protocol of inspection of starting sprays of live steam, Unit 3, run B (12g), Permskaya GRES Technical Diagnostics Laboratory. – 2021. – 14 p.

9 Report No. 4307-380-2021 on the study of the destroyed elements of the atomizers of the starting attemperators of the ТПП-804 boiler of Station 2 of the Permskaya GRES branch / Central Laboratory of PJSC “Krasny Kotelshchik”. – 2021. – 28 p.

10 **Plotkin, E. R.** Study of the thermal resistance of the water supply device of the spray attemperator. / E. R. Plotkin V. N., Chernyak, M. N. Singer // Electric stations. – 1991. – No. 10. – P. 53–57.

11 **Chernyak, V. N.** Improving the reliability of low-pressure spray attemperators of the ТГМП-314 / V. N. Chernyak N. A. Zroychikov, T. M. Makarova // Teploenergetika. – 1999. – No. 2. – P. 44–47.

A. Yu. Priymak, M. Yu. Serbinovsky

**ANALYSIS OF THE DESTRUCTION CAUSES OF CENTRIFUGAL
ATOMIZERS OF SPRAY ATTEMPERATORS**

Abstract. Based on the analysis of scientific, technical and patent information, defects and destructions of the main structural elements of injecting steam coolers (ISC) identified during the operation of boilers, in particular their nozzles, the main processes affecting the ISC resource are noted. Using the results of the analysis and the current state of research on improving the reliability and resource of the ISC, the ways of improving the main elements of the ISC design are formulated, which are aimed at improving the reliability and resource of the ISC while maintaining the high quality of spraying with cooling water nozzles. These ways include the selection of promising materials of nozzles and optimization of the design of nozzles and other parts of the ISC with the identified potential fracture zones, modeling of the stress-strain state, temperature fields of nozzles and ISC as a whole, features of the distribution of media flows and velocity distribution fields of media in nozzles and ISC as a whole, erosive wear of their surfaces, the process of cracking, etc. the development of cracks.

Keywords: injecting steam cooler, centrifugal nozzle, resource, steam boiler, steam temperature control.

For citation: Priymak, A. Yu. Analysis of the destruction causes of centrifugal atomizers of spray attempersators / A. Yu. Priymak, M. Yu. Serbinovsky // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2023. – No. 4. – P. 48–53. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_4_48.

Сведения об авторах

Приймак Антон Юрьевич

Ростовский государственный университет
путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Основы проектирования машин»,
аспирант,
e-mail: A290488@yandex.ru

Сербиновский Михаил Юрьевич

ПАО ТКЗ «Красный котельщик»
конструкторское бюро,
главный специалист,
e-mail: serb-m@mail.ru

Information about the authors

Priymak Anton Yurievich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair «Machine Design Fundamentals»,
Postgraduate Student,
e-mail: A290488@yandex.ru

Serbinovsky Mikhail Yurievich

PJSC TKZ “Krasny Kotelshchik”,
Design Bureau,
Chief Specialist,
e-mail: serb-m@mail.ru