

## ЭНЕРГЕТИКА

Научная статья

УДК 620.186.5:621.181

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-43-52>

## Повышение коррозионной стойкости внутренних поверхностей энергетического оборудования

Наталья Павловна Герасимова<sup>1✉</sup>, Татьяна Валерьевна Коваль<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия<sup>1</sup>[gerasimova@istu.edu](mailto:gerasimova@istu.edu)<sup>2</sup>[kovaltv@istu.irk.ru](mailto:kovaltv@istu.irk.ru)

**Резюме.** Цель – изучение возможности влияния индукционных токов на повышение надежности работы оборудования тепловых электростанций путем увеличения коррозионной стойкости внутренних поверхностей энергооборудования (поверхностей нагрева котельных агрегатов). Стойкость к коррозии возрастает за счет повышения прочности оксидной пленки, образующейся при пассивировании (оксидировании). Для повышения прочности защитной пленки применен способ электрохимического пассивирования металлической поверхности, основанный на использовании индукционных токов. С помощью метода многомерного математического моделирования многопараметрических и многофункциональных процессов установлено, что для змеевикового экономайзера парового котла, состоящего из стальных труб с внутренним диаметром 32 мм (при параллельно включенных 24 змеевиках), обработка водным раствором окислителя (кислорода) должна осуществляться не менее 4 ч при пропуске по всей системе труб переменного тока 25 А. При этом дозирование кислорода в водный раствор должно производиться при температуре 130–450°C и концентрации кислорода 1 г/кг, со скоростью воды 0,5–5,0 м/с. Показано, что периодичность обработки зависит от условий эксплуатации оборудования: предпускового режима, останова или консервации. Эффективность способа также зависит от величины электрического тока, пропускаемого по металлической поверхности, продолжительности обработки, концентрации окислителя, типа и размеров обрабатываемой металлической поверхности. Предлагаемый способ пассивации можно применять как в барабанных, так и в прямоточных котлах. Например, пассивацию экранных поверхностей нагрева рекомендуется проводить в растопочном режиме при 30–40% нагрузке котла, также как и пассивацию пароперегревательных поверхностей котельных агрегатов и экономайзеров. Таким образом, применение способа электрохимического пассивирования позволит повысить коррозионную стойкость металлической поверхности оборудования тепловых электрических станций.

**Ключевые слова:** коррозионное разрушение, котельный агрегат, надежность работы энергооборудования, внутренняя коррозия, пассивация, оксидирование

**Для цитирования:** Герасимова Н. П., Коваль Т. В. Повышение коррозионной стойкости внутренних поверхностей энергетического оборудования // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 1. С. 43–52. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-43-52>.

## POWER ENGINEERING

Original article

## Improvement of corrosion resistance of internal surfaces in power-generating equipment

Natalia P. Gerasimova<sup>1✉</sup>, Tatyana V. Koval<sup>2</sup>

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup>[gerasimova@istu.edu](mailto:gerasimova@istu.edu)<sup>2</sup>[kovaltv@istu.irk.ru](mailto:kovaltv@istu.irk.ru)

**Abstract.** We investigate the possibility of using induction currents for improving the reliability of thermal power plants by increasing the corrosion resistance of internal surfaces of power-generating equipment, such as heating surfaces of boiler units. Corrosion resistance can be enhanced by improving the strength of an oxide film formed during

passivation (oxidation). In this work, the oxide film strength was increased by electrochemical passivation of metal surfaces with induction currents. Using the method of multidimensional mathematical modeling of multi-parametric and multi-functional processes, we established that, for a continuous-loop economizer of a steam boiler comprising steel pipes with an inner diameter of 32 mm (24 coils operated simultaneously), an aqueous oxidant (oxygen) solution should be passed through the entire system of pipes for 4 h at an alternating current of 25 A. Under this treatment, oxygen should be added into the aqueous solution at a temperature of 130–450°C, an oxygen concentration of 1 g/kg, and a water flow rate of 0.5–5.0 m/s. Treatment intervals should be determined depending on the operating conditions of the equipment: reset, shutdown, or preservation. The efficiency of the method depends on the electric current passed over metal surface, treatment duration, oxidant concentration, as well as the type and size of the treated metal surface. The proposed passivation method can be used in both drum boilers and single-pass boilers. For example, it is recommended that passivation of water walls be carried out during boiler warm-up operation at 30–40% of boiler load, as well as passivation of superheat surfaces of boiler units and economizers. Therefore, the use of electrochemical passivation can increase the corrosion resistance of metal surfaces of power-generating equipment at thermal power plants.

**Keywords:** corrosion destruction, boiler unit, reliability of power-generating equipment, internal corrosion, passivation, oxidation

**For citation:** Gerasimova N. P., Koval T. V. Improvement of corrosion resistance of internal surfaces in power-generating equipment. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):43-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-43-52>.

## ВВЕДЕНИЕ

Коррозионное разрушение является причиной проблем надежности работы оборудования тепловых электрических станций (ТЭС). Важной задачей при эксплуатации основного и вспомогательного оборудования ТЭС является поиск возможностей, методов и разработок по сохранению ресурса и обеспечение их надежной работы. В связи с этим внедрение методов борьбы с коррозионным разрушением представляет собой одно из главных направлений обеспечения бесперебойной работы оборудования на ТЭС [1–3].

## АНАЛИЗ ПРИЧИН КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТОВ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ НЕГО

Классификация и причины разрушений металлических поверхностей нагрева котельных агрегатов представлены на рис. 1 и 2, из которых очевидно, что совместное воздействие всех эксплуатационных факторов приводит к ухудшению оптимальных условий работы металла [4].

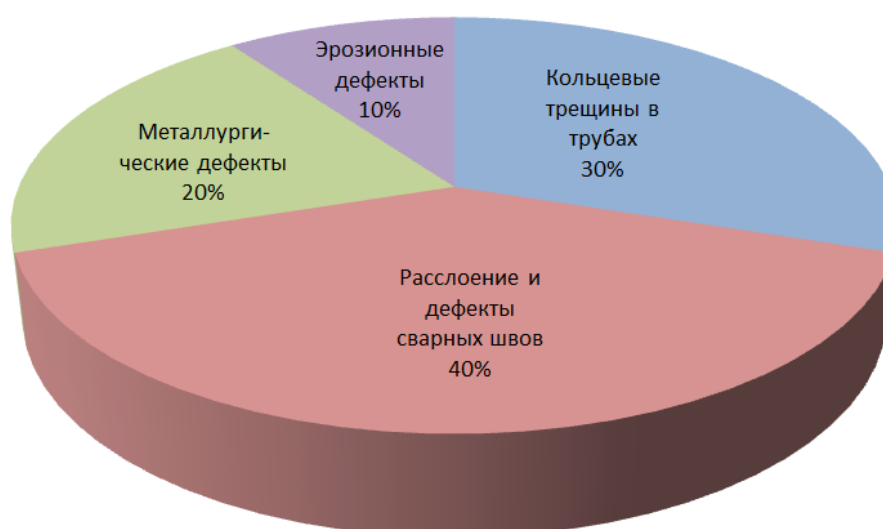


Рис. 1. Виды разрушений в микроструктуре металла энергетического оборудования  
Fig. 1. Types of metal microstructure destruction in power generating equipment



**Рис. 2. Эксплуатационные факторы, влияющие на разрушение поверхностей нагрева котельных агрегатов (ВХР – водно-химический режим)**  
**Fig. 2. Operational factors affecting the destruction of boiler unit heating surfaces (BXP – water-chemical regime)**

Из анализа данных, приведенных на рис. 2, видно, что основная причина повреждений поверхностей нагрева котельных агрегатов заключается в температурных отклонениях в структуре металла труб (термоусталостная коррозия) вследствие специфики их изготовления (дефекты изготовления и дефекты металла) и условий эксплуатации (перегрев из-за нарушения ВХР и отложений), которые в совокупности приводят к коррозионному разрушению теплоэнергетического оборудования.

Как известно, коррозия – самопроизвольная окислительно-восстановительная реакция, протекающая при взаимодействии металла с окружающей средой, вследствие которой происходит разрушение металла. Процесс коррозионного разрушения можно представить в виде стадий в следующей последовательности [5–7]:

- транспортировка компонентов агрессивной среды к металлической поверхности;
- химическая окислительно-восстановительная реакция ионов металла и компонентов коррозионной среды, продуктом которой является окисленная форма металла и восстановленная форма компонента среды;
- отвод продуктов химической реакции

(коррозии) от поверхности раздела фаз.

Вместе с тем разрушение металла вследствие коррозии может происходить равномерно по металлической поверхности и локально (в виде язв).

Если процесс коррозионного разрушения протекает равномерно, то поверхность энергетического оборудования при воздействии агрессивной среды подвергается утонению полностью с одновременным уменьшением толщины труб с внутренней и внешней сторон. При этом микроструктура металла не изменяется [8]. На поверхностях нагрева энергетического оборудования, прежде всего в котлоагрегатах, такой вид коррозионного разрушения происходит вследствие углекислотной, общей кислородной коррозии внутренней поверхности труб, а также высокотемпературной коррозии наружной их поверхности.

Теплоэнергетическое оборудование изготавливается, как правило, из перлитных сталей. В период эксплуатации поверхности находятся под постоянным воздействием растягивающих напряжений, близких к пределу текучести металла; при этом одновременное воздействие реагентов, способствующее интенсивному протеканию коррозии металлической поверхности, приводит к рас-

трескиванию под напряжением. Возникает локальная коррозия с характерным растрескиванием вследствие электрохимического растворения металла. Прогрессирование растрескивания металлической поверхности из-за коррозионного разрушения, осложненное воздействием растягивающих напряжений, приводит к ее разрыву, обеспечивая контакт агрессивной среды и анодной поверхности [9–11].

Опасным видом коррозии металлического оборудования является язвенная или локальная коррозия. В этом случае разрушению подвергаются небольшие участки поверхности с углублением в толщу металла. Такое сквозное повреждение металлической поверхности происходит при эксплуатации энергетического оборудования вследствие кислородной язвенной коррозии, из-за наличия в питательной воде нитритных ионов, а также из-за образования рыхлых продуктов коррозии, включающих в основном гидратированные трехвалентные окислы железа.

**Процесс коррозионного разрушения.** Механизм коррозионного процесса разрушения оборудования различен в зависимости от того, на внутренней или на внешней поверхности оснащения он протекает. В связи с этим коррозию оборудования классифицируют на внешнюю и внутреннюю.

Коррозия на внутренней поверхности оборудования теплоэнергетических систем является менее предсказуемой и трудно контролируемой, поэтому в настоящее время уделяется большое внимание поиску более совершенных методов защиты оборудования от коррозионного разрушения.

Повреждения от внутренней коррозии обычно имеют вид небольших сквозных отверстий, образующиеся при этом свищи имеют незначительные размеры, которые трудно обнаружить и своевременно устранить. В связи с этим на наружной поверхности трубы получают благоприятные условия для интенсивного развития наружной коррозии [12–15]. Известно, что внутренняя коррозия способствует утонению металла на большой площади и, как правило, при уменьшении толщины стенки трубы до критической величины приводит к ее разруше-

нию. Таким образом, внутренняя коррозия является причиной большого числа отказов оборудования на ТЭС, однако основной причиной указывается наружная (внешняя) коррозия [16].

Классифицируют способы уменьшения коррозионного разрушения: активные, пассивные и пассивно-активные.

К **активным** относят такие, в которых осуществляется интенсивное влияние на природу металла и электролита. К ним относят также способы, заменяющие механизм коррозионного разрушения и его кинетику. В качестве примера можно привести применение ингибиторов коррозии или изменение состава коррозионной среды за счет снижения ее агрессивности. Активными способами защиты от коррозии являются специальное легирование и устранение самих причин, вызывающих коррозионное разрушение.

**Пассивные** способы характеризуются непосредственным влиянием на природу металла и механизм процесса разрушения. К ним относят применение лакокрасочных и других неметаллических покрытий на металлической поверхности.

**Пассивно-активные** способы не включают влияние на природу металла, а отличаются тем, что металлическая поверхность изолируется от агрессивной среды специальными покрытиями, которые могут быть выполнены из другого металла или неметаллических неорганических материалов.

Одним из известных современных и несложных в применении способов защиты от электрохимического коррозионного разрушения теплоэнергетического оборудования на основе изменения характеристик микроструктуры его материала являются пассивация или оксидирование.

## ПАССИВАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТОВ

Пассивация является способом защиты металлов от коррозионного разрушения вследствие применения специальных растворов или процессов, приводящих к образованию оксидной пленки на их поверхности.

При пассивации на металлической по-

верхности происходит образование адсорбционного слоя в виде микроскопической пленки, который образуется в результате реагирования металла и компонента раствора в конкретном диапазоне потенциалов. Сформированная таким образом плотная оксидная пленка представляет собой непроницаемый барьер для протекания коррозионных реакций, тормозя их, а в некоторых случаях полностью прекращая коррозионное разрушение.

Явлениями пассивности объясняется замедление скорости коррозии металлов, что приводит к образованию защитной оксидной металлической пленки на поверхности.

Известно много современных способов пассивирования (оксидирования) металлических поверхностей для повышения надежности работы теплоэнергетического оборудования.

Основными, используемыми в настоящее время, способами оксидирования являются жидкостные. Образование больших объемов отходов реагентов (октадециламин, различные ингибиторы коррозии) при применении жидкостных способов оксидирования приводит к высокой экологической опасности при низкой прочности защитной пассивной пленки, формирующейся на поверхности теплоэнергетического оборудования.

В качестве наиболее перспективного способа оксидирования можно привести метод очистки и пассивации внутренних поверхностей нагрева теплоэнергетического оборудования (котлоагрегатов и турбин) пароводокислородной обработкой, в основе которого лежит применение пароводяной смеси с кислородом в качестве окислителя. Сущность метода заключается в том, что при одновременном воздействии на загрязненную поверхность перегретого водяного пара и кислорода происходят интенсивное окисление отложений на стенке, уменьшение их сцепления с поверхностью металла, вынос их из очищаемого тракта и одновременное формирование пассивной оксидной пленки на металлической поверхности [17]. Увеличить прочность защитной оксидной пленки на внутренних поверхностях трубопроводов энергетического оборудования, предотвра-

щаяющей их коррозионное разрушение во время эксплуатации или консервации оборудования котельных агрегатов, можно путем интенсификации процесса оксидирования за счет применения индукционных токов.

### **ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ТОКОВ ПРИ ПАССИВИРОВАНИИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ**

Раствор окислителя, обогащенный кислородом – это электролит, поэтому при наведении индукционных токов в нем можно получить эффект, который позволит активизировать электрохимические процессы.

В одном из законов Фарадея включена величина электродвижущей силы электромагнитной индукции ( $E$ ), которую можно выразить, заменив через переменные параметры величину силовой характеристики – магнитную напряженность, используемую в электродинамическом анализе [18].

Электродвижущая сила (ЭДС) индукции складывается из ЭДС ( $E_1$ ), возникающей из-за изменения силы тока  $I$  во времени, а также ЭДС ( $E_2$ ), образующейся вследствие токов – первичного  $I_1$  и вторичного  $I_2$  при варьировании расстояния между ними. Обратная пропорциональность ЭДС индукции и квадрата расстояния до электрода с током свидетельствует об образовании сверхвысоких напряжений в непосредственной близости от первичных проводников с переменным током, то есть

$$E = E_1 - E_2 = -A \left( \frac{1}{r} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{I}{2\pi r^2} \cdot \frac{dr}{dt} \right),$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент пропорциональности;  $r$  – расстояние до поверхности металла, м;  $t$  – время воздействия индукционных токов, с.

Таким образом, вследствие возникновения наибольшей величины электромагнитного поля в непосредственной близости от электрода создается область, где особенно интенсивно протекает ионизация. Следовательно, вблизи первичного тока интенсивно протекает ионизация всех компонентов рас-

твор в результате действия индукционных токов.

Это заключение можно использовать и для процессов электрохимического взаимодействия металлов и компонентов раствора, таким образом, прослеживается аналогичная закономерность по интенсификации процесса ионизации при протекании электрохимических реакций под влиянием индукционных токов [18].

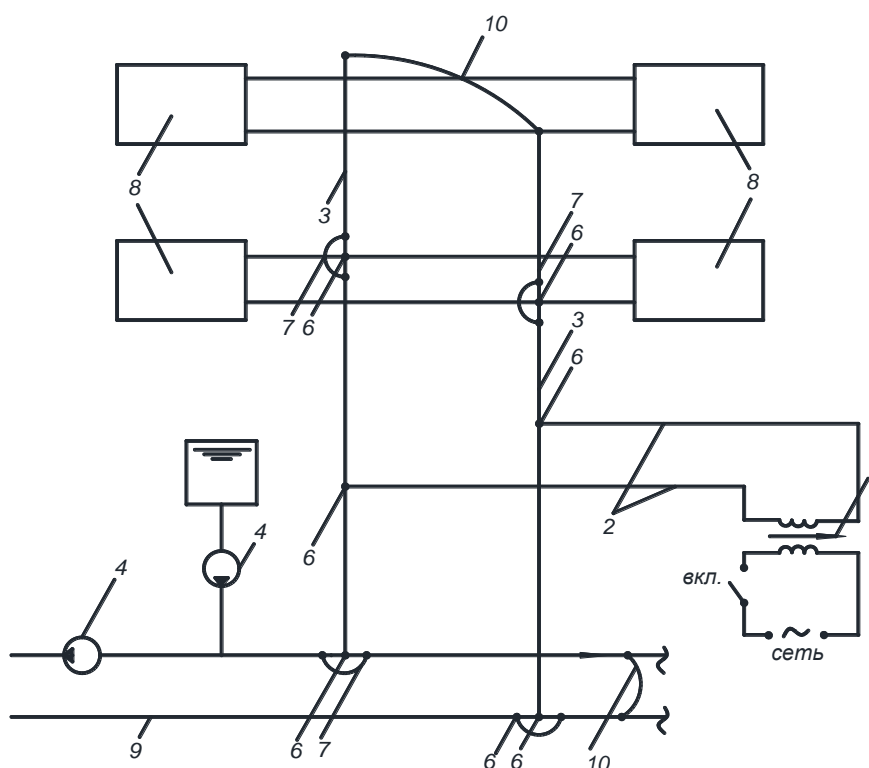
Вышеперечисленные выводы можно применить к решению проблемы интенсификации процесса пассивации металлической поверхности и увеличения прочностных характеристик образующейся при этом оксидной пленки, защищающей поверхность оборудования от коррозионного разрушения.

Способ электрохимической пассивации внутренней поверхности металлических труб

энергетического оборудования включает выдержку обрабатываемой поверхности в среде окислителя (например, применение пароводородной обработки) и одновременное пропускание переменного тока [19].

Индуктируемый вторичный ток возникает в результате образовавшегося переменного электромагнитного поля возле поверхности энергетического оборудования, по которому пропускается переменный ток. Вследствие этого в непосредственной близости от поверхности, находящейся под током, возникает область действия индукционных токов (рис. 3).

Предлагаемый способ осуществляется следующим образом: источник переменного тока подключают к обрабатываемой металлической поверхности, применяя электрическую схему (рис. 4).



**Рис. 3. Схема установки процесса электрохимической пассивации внутренней металлической поверхности энергетического оборудования на примере двухтрубной системы: 1 – источник переменного тока; 2 – электропровод; 3 – металлическая поверхность энергетического оборудования (например, труба), подвергаемого обработке индукционными токами; 4 – дозатор окислителя; 5 – емкость с раствором окислителя; 6 – электрические клеммы; 7 – шунтирующие перемычки; 8 – элементы энергетического оборудования; 9 – вспомогательный трубопровод для отвода отработанного раствора; 10 – перемычки**  
**Fig. 3. Diagram of the installation designed to implement electrochemical passivation of the inner metal surface of power-generating equipment on the example of a two-pipe system: 1 – AC source; 2 – electric wires; 3 – metal surface of power equipment (for the case of a pipe) subjected to treatment with induction currents; 4 – oxidizer dispenser; 5 – container with oxidizer solution; 6 – electrical terminals; 7 – shunt jumpers; 8 – elements of power-generating equipment; 9 – auxiliary pipeline for disposal of waste solution disposal; 10 – jumpers**

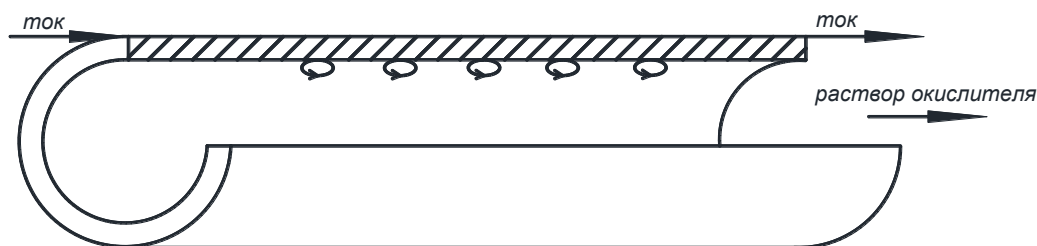


Рис. 4. Эскиз металлической поверхности (на примере трубы) с образованием индукционных токов в непосредственной близости от нее  
Fig. 4. A sketch of a metal surface (for the case of a pipe) with forming induction currents in its immediate vicinity

Переменный электрический ток протекает по металлической поверхности за счет включения источника переменного тока, при этом защита от коррозии внутренних поверхностей нагрева энергооборудования происходит в результате их обработки водным раствором окислителя. При движении переменного тока вокруг проводника, которым в данном случае является само оборудование, создается переменное магнитное поле, вследствие чего в растворе окислителя индуцируются вторичные короткозамкнутые токи, активизируя при этом ионизацию компонентов раствора. Водный раствор обогащен атомарным кислородом, поэтому вблизи металлической поверхности создается область с повышенной концентрацией ионизированного атомарного кислорода.

Итак, вблизи металлической поверхности, обработанной в среде окислителя, например, применяя пароводокислородную обработку, создается наиболее высокая величина ЭДС индукции в соответствии с закономерностью, в которой величина электродвижущей силы (ЭДС) индукции обратно пропорциональна квадрату расстояния до обмотки индуктора. Этим объясняется повышенная ионизация компонентов раствора в непосредственной близости от металлической поверхности и, как следствие, активизируется их взаимодействие с атомами металла. Очевидно, что при пропускании переменного тока по теплоэнергетическому оборудованию интенсивность процесса окислирования увеличивается. Структура оксидного слоя, образовавшегося при пассивации, характеризуется повышенной прочностью, так как он сформирован в

условиях интенсификации процесса окислирования индукционными токами, и в дальнейшем, в рабочих условиях или при консервации оборудования, защищает металлическую поверхность от коррозии, что и является достижением технического результата. С помощью метода многомерного математического моделирования многопараметрических и многофункциональных процессов [19] получено, что для змеевикового экономайзера парового котла, состоящего из стальных труб с внутренним диаметром 32 мм (при параллельно включенных 24 змеевиках), обработка водным раствором окислителя (кислорода) осуществляется не менее 4 ч при пропускании по всей системе труб переменного тока 25 А при дозировании кислорода в водный раствор при температуре 130–450°C и концентрации кислорода 1 г/кг при скорости воды 0,5–5,0 м/с. Периодичность обработки определяется в зависимости от условий эксплуатации оборудования: предпускового режима, останова или консервации.

Эффективность способа зависит от величины электрического тока, пропускаемого по металлической поверхности, времени обработки, концентрации окислителя, например, при пароводокислородной обработке, типа и размеров обрабатываемой металлической поверхности [20].

Предлагаемый способ пассивации поверхностей нагрева котельных агрегатов возможно применять как в барабанных, так и в прямоточных котлах, например, пассивацию экранных поверхностей нагрева рекомендуется проводить в растопочном режиме при 30–40% нагрузке котла, как и пассивацию

пароперегревательных поверхностей котельных агрегатов. Рассмотренный способ еще можно применить и для защиты от коррозии турбинного оборудования ТЭС, например, в период вывода турбины в резерв на срок 7 сут и более и при проведении мер консервации оборудования турбоустановок и т.п.

Таким образом, применение способа электрохимического пассивирования, который включает в себя обработку внутренних поверхностей нагрева энергетического оборудования окислителем, обогащенным атомарным кислородом, одновременно пропускаемая по ним переменный ток, позволит повысить коррозионную стойкость металлической поверхности оборудования ТЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Поиск возможностей и методов сохранения ресурса и обеспечения надежной работы основного и вспомогательного оборудования при эксплуатации котельных агрегатов позволяет выделить среди многочисленных направлений повышения надежности теплоэнергетического оборудования перспективное и сравнительно простое воздействие на свойства углеродистых сталей с точки зрения совершенствования характеристик микроструктуры, а именно – пассивацию

металла.

2. Основными способами пассивации являются жидкостные с применением октадециламина и различных ингибиторов коррозии. Образование больших объемов отходов реагентов при применении жидкостных способов оксидирования приводит к высокой экологической опасности при низкой прочности защитной пассивной пленки, формирующейся на поверхности теплоэнергетического оборудования.

3. Увеличить прочность защитной оксидной пленки на внутренних поверхностях энергетического оборудования можно путем интенсификации процесса оксидирования за счет применения индукционных токов. Применение способа электрохимического пассивирования, включающего обработку внутренних поверхностей нагрева энергетического оборудования окислителем, обогащенным атомарным кислородом, например, применяя пароводокислородную обработку, и одновременно пропускаемая по ним переменный ток, позволяет увеличить коррозионную стойкость металлической поверхности за счет повышения прочности оксидной пленки в связи с интенсификацией процесса пассивации индукционными токами.

## Список источников

1. Воронин С. В. Влияние коррозии на оборудование топливно-энергетического комплекса // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности: сб. науч. статей V Междунар. науч. конф. (г. Казань, 30–31 мая 2020 г.). Казань: ООО «Конверт», 2020. Ч. 1. С. 52–54.
2. Томаров Г. В., Шипков А. А. Применение программных средств прогнозирования скорости эрозии-коррозии для обеспечения целостности оборудования и трубопроводов энергоблоков АЭС // Теплоэнергетика. 2020. № 8. С. 101–112. <https://doi.org/10.1134/S0040363620080056>.
3. Maurice V., Marcus P. Progress in corrosion science at atomic and nanometric scales // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 95. P. 132–171. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.03.001>.
4. Бухин В. Е. Предварительно изолированные трубопроводы для систем централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2002. № 4. С. 24–29.
5. Томаров Г. В., Шипков А. А. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 2. Прогнозирование и предупреждение общей и локальной эрозии-коррозии // Теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 17–28. <https://doi.org/10.1134/S0040363618080076>.
6. Томаров Г. В., Шипков А. А., Афлитонов Д. В. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 3. Управление эрозией-коррозией трубопроводов и оборудования // Теплоэнергетика. 2018. № 9. С. 84–93. <https://doi.org/10.1134/S0040363618090102>.
7. Томаров Г. В., Шипков А. А., Корешкова Н. С. Расчетно-экспериментальное обоснование режимов работы, обеспечивающих эрозионную стойкость арматуры энергоблоков АЭС // Теплоэнергетика. 2010. № 5. С. 19–25.
8. Томаров Г. В., Шипков А. А. Эрозионно-коррозионный износ энергетического оборудования: исследование, прогнозирование и предупреждение. Ч. 1. Процессы и закономерности эрозии-коррозии // Теплоэнергетика. 2018. № 8. С. 5–16. <https://doi.org/10.1134/S0040363618080064>.
9. Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice. Boca Raton: CRC Press, 2012. 941 p.



10. Liu Xiaolong, Hwang Woonggi, Park Jaewoong, Van Donghyun, Chang Yunlong, Lee Seung Hwan, et al. Toward the multiscale nature of stress corrosion cracking // *Nuclear Engineering and Technology*. 2018. Vol. 50. Iss. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.10.014>.
11. Fu Junwei, Li Feng, Sun Jiajun, Cui Kai, Du Xiaodong, Wu Yucheng. Effect of crystallographic orientations on the corrosion resistance of Fe17Cr ferritic stainless steel // *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2019. Vol. 841. P. 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.04.031>.
12. Dugdale H., Armstrong D. E. J., Tarleton E., Roberts S. G., Lozano-Perez S. How oxidized grain boundaries fail // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. Iss. 13. P. 4707–4713. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.05.012>.
13. Moss T., Was G. S. Accelerated stress corrosion crack initiation of alloys 600 and 690 in hydrogenated supercritical water // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017. Vol. 48. No. 4. P. 1613–1628. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3898-4>.
14. Ren Jian, Yu Liming, Liu Yongchang, Ma Zongqing, Liu Chenxi, Li Huijun, et al. Corrosion behavior of an Al added high-Cr ODS steel in supercritical water at 600°C // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 480. P. 969–978. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.019>.
15. Chang Litao, Burke M. G., Scenini F. Stress corrosion crack initiation in machined type 316L austenitic stainless steel in simulated pressurized water reactor primary water // *Corrosion Science*. 2018. Vol. 138. P. 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.003>.
16. Поваров О. А., Томаров Г. В. Эрозия-коррозия металлов энергетического оборудования в одно- и двухфазных потоках // *Тяжелое машиностроение*. 2002. № 8. С. 16–21.
17. Манькина Н. Н., Гольдин А. А., Столяров А. А. Парокислородный и пароводокислородный методы очистки, пассивации и консервации энергетического оборудования // *Теплоэнергетика*. 2008. № 7. С. 36–39.
18. Fujimara K., Domaе M., Yoneda K., Inada T., Hisamune K. Correlation of flow accelerated corrosion rate with iron solubility // *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241. Iss. 11. P. 4482–4486. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.04.035>.
19. Вертинская Н. Д., Герасимова Н. П. Конструирование технических систем на основе многомерного математического моделирования технологических процессов // *Моделирование неравновесных систем – 2002: матер. V Всерос. семинара МНС-2002 (г. Красноярск, 18–20 октября 2002 г.)*. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2002. С. 30–31.
20. Пат. № 2441075, Российская Федерация, МПК C25 D 7/04 9/04. Способ электрохимического пассивирования внутренней поверхности длиномерных металлических труб / Е. Ю. Медведева, Н. П. Герасимова, Н. Д. Вертинская; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет, № 2002130477. Заявл. 13.11.2002; опубл. 27.05.2004. Бюл. № 5.

## References

1. Voronin S. V. Corrosion effect on fuel and energy complex equipment. In: *Prioritetnye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti: sbornik nauchnykh statej pyatj mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii = Priority directions of innovation activity in industry: collected scientific articles of the fifth international scientific conference*. 30–31 May 2020, Kazan, Kazan: ООО "Konvert"; 2020;1:52-54. (In Russ.).
2. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Application of software tools for predicting the corrosion-erosion rate to ensure integrity of equipment and piping of power units at nuclear power stations. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2020;8:101-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363620080056>.
3. Maurice V., Marcus P. Progress in corrosion science at atomic and nanometric scales. *Progress in Materials Science*. 2018;95:132-171. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.03.001>.
4. Bukhin V. E. Pre-insulated pipelines for district heating systems. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2002;4:24-29. (In Russ.).
5. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Flow-accelerated corrosion wear of power-generating equipment: investigations, prediction, and prevention: 2. Prediction and prevention of general and local flow-accelerated corrosion. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;8:17-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363618080076>.
6. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Flow-accelerated corrosion wear of power-generating equipment: investigations, prediction and prevention: part 3. Managing the flow-accelerated corrosion of pipelines and equipment. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;9:84-93. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363618090102>.
7. Tomarov G. V., Shipkov A. A., Koreschkova N. S. Calculated and experimental substantiation of operating conditions under which adequate erosion resistance of valves used in power units at nuclear power stations is ensured. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2010;5:19-25. (In Russ.).
8. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Flow-accelerated corrosion wear of power-generating equipment: investigations, prediction, and prevention: 1. Flow-accelerated corrosion processes and regularities. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2018;8:5-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363618080064>.
9. Marcus P. *Corrosion mechanisms in theory and practice*. Boca Raton: CRC Press; 2012, 941 p.
10. Liu Xiaolong, Hwang Woonggi, Park Jaewoong, Van Donghyun, Chang Yunlong, Lee Seung Hwan, et al. Toward the multiscale nature of stress corrosion cracking. *Nuclear Engineering and Technology*. 2018;50(1):1-17. <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.10.014>.
11. Fu Junwei, Li Feng, Sun Jiajun, Cui Kai, Du Xiaodong, Wu Yucheng. Effect of crystallographic orientations on the corrosion resistance of Fe17Cr ferritic stainless steel. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2019;841:56-62.

<https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.04.031>.

12. Dugdale H., Armstrong D. E. J., Tarleton E., Roberts S. G., Lozano-Perez S. How oxidized grain boundaries fail. *Acta Materialia*. 2013;61(13):4707-4713. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.05.012>.

13. Moss T., Was G. S. Accelerated stress corrosion crack initiation of alloys 600 and 690 in hydrogenated supercritical water. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017;48(4):1613-1628. <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3898-4>.

14. Ren Jian, Yu Liming, Liu Yongchang, Ma Zongqing, Liu Chenxi, Li Huijun, et al. Corrosion behavior of an Al added high-Cr ODS steel in supercritical water at 600°C. *Applied Surface Science*. 2019;480:969-978. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.019>.

15. Chang Litao, Burke M. G., Scenini F. Stress corrosion crack initiation in machined type 316L austenitic stainless steel in simulated pressurized water reactor primary water. *Corrosion Science*. 2018;138:54-65. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.04.003>.

16. Povarov O. A., Tomarov G. V. Erosion-corrosion of metals of power equipment in single- and two-phase flows. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2002;8:16-21. (In Russ.).

17. Mankina N. N., Goldin A. A., Stolyarov A. A. Steam-oxygen and steam-water-oxygen methods for cleaning, passivation and conservation of power engineering equipment. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2008;7:36-39. (In Russ.).

18. Fujimara K., Domae M., Yoneda K., Inada T., Hisamune K. Correlation of flow accelerated corrosion rate with iron solubility. *Nuclear Engineering and Design*. 2011;241(11):4482-4486.

<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.04.035>.

19. Vertinskaya N. D., Gerasimova N. P. Design of engineering systems based on multidimensional mathematical modeling of technological processes: *materialy V Vserossijskogo seminar MNS-2002 = Materials of the 5<sup>th</sup> All-Russian Seminar Modeling of non-equilibrium systems-2002*. Krasnoyarsk. 18–20 October 2002, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk state technical university; 2002, p. 30-31. (In Russ.).

20. Medvedeva E. Y., Gerasimova N. P., Vertinskaya N. D. *Method of electrochemical passivation of the inner surface of long-length metal pipes*. Patent RF, no. 2441075; 2004. (In Russ.).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Герасимова Наталья Павловна**,  
кандидат химических наук, доцент,  
доцент кафедры теплоэнергетики,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

**Коваль Татьяна Валерьевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры теплоэнергетики,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

#### 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 05.10.2021; одобрена после рецензирования 29.12.2021; принята к публикации 20.02.2022.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Natalia P. Gerasimova**,  
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Heat Power  
Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

**Tatyana V. Koval**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Heat Power  
Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia

#### 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 05.10.2021; approved after reviewing 29.12.2021; accepted for publication 20.02.2022.