

8. Etienne Guyon, Etienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Luc Petit, Catalin D. Mitescu. Physical Hydrodynamics. Oxford University Press, 2015. 544 p.

9. Kondranin, T.V., Tkachenko, B.K., Bereznikova, M.V., Evdokimov, A.V., Zuev, A.P. *Primenenie paketov prikladnykh programm pri izuchenii kursov mekhaniki zhidkosti i gaza* [Application packages for

fluid and gas mechanics courses]. Moscow: MFTI, 2005. 104 p.

10. Sentyabov, A.V., Gavrilov, A.A., Dektyarev, A.A. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 81–93.

11. Abiev, R.Sh., Vasil'ev, M.P., Doil'nitsyn, V.A. *Izvestiya SPbGTI(TU)*, 2015, no. 28(54), pp. 64–69.

Барочкин Юрий Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru *Barochkin Yuri Evgenievich,* Ivanovo State Power Engineering University, PhD student of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Горшенин Сергей Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, адрес г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Gorshenin Sergey Dmitrievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering, Associate Professor of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, зав. кафедрой тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: lgv83@yandex.ru

Ledukhovsky Grigory Vasilievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Head of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: lgv83@yandex.ru

Шувалов Сергей Ильич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Shuvalov Sergey Ilyich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Зиновьева Екатерина Витальевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, адрес г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Zinovieva Ekaterina Vitalievna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

УДК 621.187.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ СТАЛИ ВО ВРЕМЯ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

А.Ю. ФЕДОРОВА, Е.Н. БУШУЕВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: abdvlenka@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для химических очисток внутренних поверхностей пароводяных трактов котлов используются традиционные и новые мощные кислотные реагенты. В ранее проведенных исследова-

ниях получены скорости удаления бугорчатых и равномерных отложений в испарительных трубах паровых котлов высокого давления в зависимости от вида моющего раствора и длительности очистки. Однако во время проведения химических очисток, помимо удаления отложений, протекают процессы коррозии металла труб, которые ведут к его потере. В научно-технической литературе практически отсутствуют данные, характеризующие этот процесс при использовании новых моющих реагентов. Целью исследования является получение экспериментальных данных о скорости коррозии сталей во время кислотной стадии химической очистки с применением новых моющих реагентов, таких как Антиржавин, Дескам, Auge Pro Ac 60.

Материалы и методы. Использован гравиметрический метод определения скорости коррозии металла испарительных труб с применением контрольных образцов коррозии в холодных и нагретых моющих растворах во время химической очистки от отложений путем травления.

Результаты. В ходе лабораторного исследования получены зависимости скорости коррозии углеродистой стали испарительных труб котлов и пластин-индикаторов коррозии в нагретых и ненагретых моющих растворах ингибированной соляной кислоты и кислотных реагентов от длительности очистки. Установлено, что скорости коррозии углеродистой стали в процессе очистки уменьшаются и на завершающих этапах кислотной стадии в растворах ингибированной соляной кислоты и растворах реагентов имеют значения, превышающие предельно допустимую скорость коррозии в холодном ингибированном техническом растворе соляной кислоты, но менее чем для чистого металла и металла под окалиной.

Выводы. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при выборе химического реагента для проведения кислотной очистки и оптимальной ее продолжительности, а также способа оперативного контроля коррозии стали в процессе очистки.

Ключевые слова: паровой котел, испарительные трубы, химическая очистка, соляная кислота, моющий реагент, скорость коррозии, гравиметрический метод

THE EVALUATION OF CORROSION RATE OF STEEL DURING CHEMICAL CLEANING OF STEAM BOILERS

A.Yu. FEDOROVA, E.N. BUSHUEV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: abdvlenka@mail.ru

Abstract

Background. Traditional and new washing acid reagents are used for chemical cleaning of internal surfaces of steam-water pipes of boilers. In previous studies, the rate of removal of lumpy and uniform deposits in the evaporative pipes of high-pressure steam boilers depending on the type of cleaning solution and the duration of cleaning was obtained. However, during chemical cleaning, removing deposits is accompanied by corrosion processes of the metal pipes, which leads to their loss. In the scientific and technical literature there are practically no data characterizing this process when using new detergent reagents. The aim of the study is to obtain experimental data on the corrosion rate of steels during the acid stage of chemical cleaning with the use of new cleaning reagents such as Antirzhavin, Deskam and Auge Pro AC 60.

Materials and methods. The gravimetric method of determination of metal corrosion rate of evaporative pipes is used. The samples of corrosion in cold and heated washing solutions during chemical cleaning from deposits by etching are employed.

Results. The laboratory testing has revealed the dependences of corrosion rate of carbon steel of boiler evaporative pipes and corrosion indicating plates in heated and not heated washing solutions of the inhibited hydrochloric acid and acid reagents on cleaning duration. It has been found that the corrosion rates of carbon steel are reduced during the cleaning process and at the end of the acid stage in solutions of inhibited hydrochloric acid and reagent solutions have values exceeding the maximum permissible corrosion rate in a cold inhibited technical solution of hydrochloric acid. However, they are less than those for pure metal and metal with scale.

Conclusions. The experimental data obtained can be used in the selection of a chemical reagent for acid cleaning and its optimal duration, as well as in the selection of the method of steel corrosion control during cleaning.

Key words: steam boiler, evaporative pipes, chemical cleaning, deposits, hydrochloric acid, washing reagent, corrosion rate, carbon steel, gravimetric method

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.6.021-029

Введение. Неизбежность внутренней коррозии пароводяного тракта ТЭС и образования внутритрубных отложений обуславливает потребность в эксплуатационных химических очистках (ХО) внутренних поверхностей пароводяного тракта котлов. На стадии планирования ХО совместно со специализированной организацией следует установить возможность удаления отложений и защиты металла от коррозии при их растворении и разрыхлении [1–4]. Для этого на образцах испарительных труб проводятся лабораторные испытания и составляется заключение о целесообразности проведения ХО. Руководящие документы не указывают условия лабораторных испытаний и недостаточно конкретно устанавливают объем и методы контроля ХО [1–3].

При ХО контролю подлежат [1–3]:

- теплогидравлический режим (изменяются температура, давление, расход моющей среды и ее уровни в барабане и в промежуточном баке);

- химические параметры, характеризующие химические условия и косвенно результат очистки (концентрации реагентов в моющей среде до и после контура очистки, прозрачность или мутность, концентрации компонентов удаляемых отложений (как правило, соединения железа и меди в пересчете на металлы) в моющей среде до и после контура очистки).

Длительность кислотной стадии очистки зависит от скорости растворения железистых отложений. Об окончании процесса растворения отложений на этой стадии судят по стабилизации концентрации растворенного (или «общего») железа в моющем растворе. Стабилизация характеризуется приростом концентрации железа в этом растворе, не превышающем 0,2–0,3 г/л в течение 1,5–2,0 ч. Этому условию стабилизации свойственна неопределенность. Стабилизацию устанавливают по изменению концентрации «общего» железа. В понятие «железо общее» входят как растворенные соединения железа, так и коллоидные и грубодисперсные. Отбор представительной пробы для анализа моющего раствора на содержание в нем соединений железа затруднен их присутствием как в растворенном состоянии, так и в виде взвешенных веществ. Для определения концентрации «общего железа» должна быть обеспечена представительность проб моющего раствора, т. е. фактически двухфазной среды, о чем в РД

нет указаний [1–3]. По этой причине следует признать большую надежность обнаружения окончания кислотной стадии очистки по стабилизации параметра моющего раствора (по кислотности или pH_{25}), а не концентрации соединений железа в нем. Этот метод также обладает недостатком: кислотность моющего раствора уменьшается не только при растворении отложений непосредственно на поверхности очищаемых труб, но и при растворении шлама (продукта разрыхления отложений), перешедшего в моющий раствор и осевшего в застойных зонах контура очистки. Относительная стабилизация кислотности и pH_{25} наблюдается как при уменьшении содержания оксидов железа в контуре очистки, так и при уменьшении кислотности и увеличении pH_{25} вследствие уменьшения скорости растворения оксидов железа при недостатке кислоты.

К технологии и схеме эксплуатационной очистки предъявляются, в частности, следующие требования [2]:

- снижение коррозионных потерь металла при воздействии моющего раствора до допустимых величин;

- отсутствие коррозионных повреждений и сохранение эксплуатационных характеристик элементов штатного оборудования, используемых для очистки (насосы, подогреватели, трубопроводы и др.).

Несмотря на наличие этих требований, в указанных руководящих документах [1, 2] отсутствуют точные определения допустимых величин и методические рекомендации по контролю скоростей коррозии конструктивных материалов контура ХО. В ряде случаев приемлемое рабочее состояние этих поверхностей поддерживается периодическими очистками в режимах пуска и останова, «на ходу». И все-таки жизненный цикл котла начинается с предупредительной ХО и сопровождается его эксплуатационными ХО при выводе из оперативного состояния «работа» [1–3].

Предположение о том, что допустимый прирост концентрации железа в моющем растворе по окончании удаления отложений с внутренних поверхностей контура очистки обусловлен только их коррозией, не может быть принято, так как после окончания очистки при наличии кислоты в этом контуре неизбежно наличие оксидного шлама [5], который продолжает растворяться. Если все же принять данное предположение, то, например, для контура с объемом кислотности

го раствора 200 м³, площадью очищаемых поверхностей 2762 м² (соответствует одному корпусу парового котла ТПЕ-208), приростом концентрации железа в кислотном растворе за 2 ч, равном 0,25 г/дм³, расчетное значение скорости коррозии составит 9,05 г/(м²·ч), что в 45 раз больше скорости коррозии стали в «холодном» ингибированном товарном растворе соляной кислоты, равной 0,2 г/(м²·ч)¹. Приходится констатировать, что контроль скорости коррозии по приросту концентрации соединений железа на заключительном этапе очистки не эффективен. Следует допустить возможность использования других методов.

Материалы и методы лабораторных исследований. В качестве методов контроля ХО применяют гравиметрический метод, а также методы измерения концентрации водорода в моющем растворе и сопротивления поляризации реакции анодного растворения железа. Ниже рассмотрим применяемые методы контроля ХО и более подробно опишем результаты гравиметрического метода.

Метод водородометрии. В реакциях растворения оксидов железа кислотой не выделяется водород. В то же время при коррозии железа в кислотном моющем растворе основным катодным деполяризатором являются катионы водорода и в катодной реакции выделяется водород. При этом для определения текущего значения скорости кислотной коррозии можно контролировать изменение концентрации второго ее продукта – молекулярного водорода (первый продукт – соединения железа).

Парциальное давление водорода в воздухе ($5,50 \cdot 10^{-8}$ МПа при атмосферном давлении) очень мало. По этой причине равновесная концентрация водорода в воде, контактирующей с воздухом, также очень мала и составляет $8,85 \cdot 10^{-4}$ мкг/дм³ при 25 °С. Скорость диффузии водорода в воде относительно велика, и водород коррозионного происхождения выделяется из воды в контактирующий с ней воздух. Из-за его летучести контроль прироста его концентрации следует вести по точкам отбора проб, между которыми нет скоплений воздуха, «ловушек» газов, мест газовой выделенности. Уравнение измерения скорости коррозии ($v_{кор}$, мг/(м²·ч)) «по водороду» имеет следующий вид:

$$v_{кор} = \frac{28 \cdot (\Delta[H_2] \cdot W)}{S}, \quad (1)$$

где $\Delta[H_2]$ – изменение концентрации водорода в кислотном растворе на очищаемом участке поверхности, мкг/дм³; W – расход моющего раствора на очищаемом участке контура, м³/ч; S – площадь корродирующей внутренней поверхности очищаемого участка контура, м².

Применительно к элементарному участку контура в виде отрезка экранной трубы внутренним диаметром 48 мм (трубы 60/6 из стали 20) и длиной 1 м при скорости пропуска моющего раствора 0,5 м/с скорости коррозии, равной 0,2 г/(м²·ч), соответствует изменение концентрации растворенного водорода, равное 0,33 мкг/дм³. Экранные трубы котлов с естественной циркуляцией имеют много большие длины и сгруппированы в панели, имеющие нижний и верхний коллекторы. При длине каждой трубы, равной 25 м, расчетное изменение концентрации водорода при коррозии стали со скоростью 0,2 г/(м²·ч) равно 8,25 мкг/дм³. Погрешность водородомера МАВР-501 в диапазоне измеряемых концентраций растворенного водорода от 0 до 200 мкг/дм³ равна $\pm(2 \text{ мкг/дм}^3 + 10\% \text{ от измеренного значения})$. Если концентрацию водорода на входе в экранные трубы принять равной 5 мкг/дм³, а на выходе из них – 13 мкг/дм³, то расчетные погрешности измерения их разности будут равны 4,6 мкг/дм³ (абсолютная) и 57,5 % (относительная). Погрешность водородомера МАРК-501 в диапазоне измеряемых концентраций растворенного водорода от 0 до 2000 мкг/дм³ равна $\pm(1 \text{ мкг/дм}^3 + 3,5\% \text{ от измеренного значения})^2$, следовательно, при тех же концентрациях водорода на входе и на выходе из экранных труб расчетные погрешности составят 2,1 мкг/дм³ (абсолютная) и 26,2 % (относительная). Относительная погрешность измерения расхода моющего раствора, в зависимости от типа расходомера, находится в пределах от 3 до 10 % и вносит свой вклад в оценку скорости коррозии стали по результатам водородометрии. Таким образом, при малой скорости коррозии погрешность результата косвенного измерения ее текущего значения сопоставима с самим результатом. Реальные значения скоростей коррозии перлитных сталей больше

¹ <https://www.mpservices.ru/product/kislota-solanaa-ingibirovannaa/>

² <http://vzornn.ru/catalog/analizatory-rastvorennogo-vodoroda-mark/portativnye.html>

0,2 г/(м²·ч), а погрешности их водородометрических измерений меньше и вполне допустимы для практической оценки.

При наличии дефектных оксидных слоев они сами (окалина) тормозят общую коррозию, но являются твердофазным катодным деполяризатором и способствуют локальной коррозии. В этом случае происходит подтравливание высших оксидов с растворением вюстита FeO и металлического железа [6, 7]. При локальной коррозии с исключительным действием твердого катодного деполяризатора активного выделения водорода не происходит, хотя характер катодной деполяризации является, скорее всего, смешанным. Применимость водородометрии показательна на заключительном этапе кислотной очистки, когда коррозии подвергается очищенная поверхность контура. В этом случае следует ожидать увеличение концентрации водорода в моющем растворе на выходе из контура очистки. Портативный водородомер позволяет в режиме реального времени контролировать скорость коррозии стали в моющем кислотном растворе.

Достоинством данного метода является наличие прибора контроля и определение текущих значений скорости коррозии поверхности очищаемой стали. Недостатком – отсутствие практического опыта контроля коррозии на кислотной стадии очистки паровых котлов (длительный опыт применения водородометрии при контроле водно-химического режима паровых котлов в энергетике имеется).

Метод измерения сопротивления поляризации реакции анодного растворения железа. Моющие кислотные растворы являются активирующими электролитами. В этом случае для определения текущих значений скорости коррозии используют метод измерения поляризационного сопротивления анодной реакции коррозии, который реализован в приборе «Измеритель скорости коррозии». Уравнение измерения скорости коррозии по сопротивлению поляризации имеет следующий вид:

$$v_{\text{кор}} = \frac{k}{R_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где k – константа датчика (значение и единица измерения определяются геометрическими параметрами датчика и зависят от единицы измерения скорости коррозии); $R_{\text{п}}$ – сопротивление поляризации, Ом.

Достоинство метода – наличие прибора контроля, его недостатки – необходимость измерения сопротивления поляризации в стационарном электрохимическом состоянии электродов (выполнение этого условия приводит к дискретности измерений) и отсутствие практического опыта.

Гравиметрический метод. Для определения средней скорости коррозии и итоговых коррозионных потерь можно установить в контур очистки контрольные образцы (индикаторы коррозии). При этом для установления средних значений скоростей коррозии за периоды кислотной стадии ХО следует использовать специальные отключаемые стенды, допускающие в любое время извлекать и устанавливать образцы.

Достоинством этого метода является длительная апробированность в энергетике; недостатками – контроль скорости коррозии образца вместо очищаемых теплообменных труб и невозможность оперативного получения текущих значений скорости коррозии. Однако данный метод часто используется при определении скорости коррозии металла.

Сущность гравиметрического метода заключается в определении потерь массы металлических образцов за время их пребывания в моющем растворе. Для определения скорости коррозии и итоговых коррозионных потерь в моющих растворах за время кислотных стадий ХО проведены лабораторные испытания. В качестве образцов использованы стальные пластины-индикаторы коррозии (рис. 1).

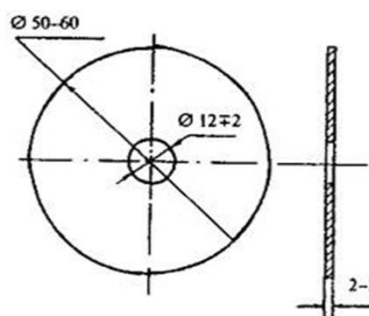


Рис. 1. Пластина-индикатор коррозии

Гравиметрические испытания массового показателя коррозии проведены на стальных образцах в соответствии с требованиями руководящего документа [8].

Площадь индикаторов коррозии определялась в ходе исследований по формуле $S_{\text{инд}} = 6,28 \cdot 10^{-6} [R^2 - r^2 + (R+r)\delta]$, (3)

где R – наружный радиус индикатора, мм; r – наружный радиус дистанционирующей втулки, мм; δ – толщина индикатора, мм.

В (3), в отличие от традиционно используемой формулы расчета площади поверхности пластины-индикатора коррозии, подвергающейся ХО от отложений в моющем растворе, учитывается торцевая поверхность внутреннего кольца.

Предварительная подготовка каждого образца коррозии заключалась в последовательных операциях: маркировке индикатора коррозии; измерении его геометрических размеров для расчета площади поверхности (S); шлифовке, промывании бидистиллированной водой, сушке фильтровальной бумагой, обезжиривании его поверхности ватным тампоном, смоченным этиловым спиртом; сушке индикатора коррозии до постоянного веса в сушильном шкафу при температуре от 105 до 110 °С в течение часа; охлаждении до комнатной температуры индикатора коррозии в эксикаторе над свежeproкаленным хлористым кальцием; взвешивании индикатора коррозии на аналитических весах с основной приборной погрешностью измерения не более 0,1 мг (для определения массы $m_n^{\text{инд}}$ образца).

Индикаторы коррозии, подготовленные к лабораторным испытаниям, и до их начала хранились в эксикаторе.

Коррозионные испытания проводились в статическом режиме (методом травления в моющем растворе). В статическом режиме индикаторы коррозии помещались в химические термостойкие стаканы с неподвижной средой.

Для получения данных по кинетике коррозии в процессе кислотной очистки пластины-индикаторы погружались в моющие растворы одновременно с образцами экранных труб с последующей периодической выгрузкой по достижении заданной длительности испытаний. Для получения зависимости скорости коррозии от времени и кислотности моющего раствора испытания проводились в несколько этапов.

По достижении заданной продолжительности этапа испытаний (ХО) индикаторы коррозии вместе с образцами экранных труб извлекались из моющих растворов, первоначально проводилась их визуальная оценка. После этого индикаторы ополаскивались в бидистиллированной воде. При наличии рыхлого слоя отложений или розовой мед-

ной пленки на поверхности индикатора они удалялись с помощью резинового ластика или тканевого тампона, смоченного в химически чистом этаноле. Чистые индикаторы высушивались в сушильном шкафу при температуре от 105 до 110 °С в течение часа, охлаждались в герметичном эксикаторе над свежeproкаленным хлористым кальцием и взвешивались для определения массы $m_{n+1}^{\text{инд}}$ на аналитических весах с погрешностью до 0,1 мг. Фиксировалось визуальное состояние поверхности индикаторов коррозии после удаления отложений и медной пленки.

Все перечисленные операции выполнялись последовательно до окончания ХО. Критерием окончания ХО являлась визуально чистая поверхность образца экранной трубы.

При гравиметрических испытаниях скорость коррозии характеризуется массовым показателем $v_{\text{кор}}$, г/(м²·ч),

$$v_{\text{кор}} = \frac{m_n^{\text{инд}} - m_{n+1}^{\text{инд}}}{S_{\text{инд}} \tau_n}, \quad (4)$$

где $m_n^{\text{инд}}$ – масса индикатора до этапа кислотной стадии ХО, г; $m_{n+1}^{\text{инд}}$ – масса индикатора после этапа кислотной стадии ХО, г; $S_{\text{инд}}$ – площадь поверхности индикатора коррозии, м²; τ_n – время нахождения индикатора коррозии в моющем растворе (длительность этапа), ч.

Результаты лабораторных исследований. В ходе лабораторного исследования получены зависимости скорости коррозии стальных образцов (пластин-индикаторов коррозии) при удалении бугорчатых и равномерных отложений с образцов экранных труб от вида моющего раствора реагента, его кислотности, длительности очистки, рассчитаны концентрации водорода. На рис. 2–4 представлены результаты лабораторных испытаний определения скорости коррозии стали в моющих растворах соляной кислоты и кислотных реагентов на ее основе. Контроль скорости коррозии выполнен гравиметрически.

Анализ полученных данных (рис. 2–4) показывает уменьшение скорости коррозии стали в процессе кислотной очистки, что связано с уменьшением кислотности растворов соляной кислоты и реагентов на ее основе (Auge Pro Ac 60Н, Дескам, Auge Pro Ac 60 и Антиржавин).

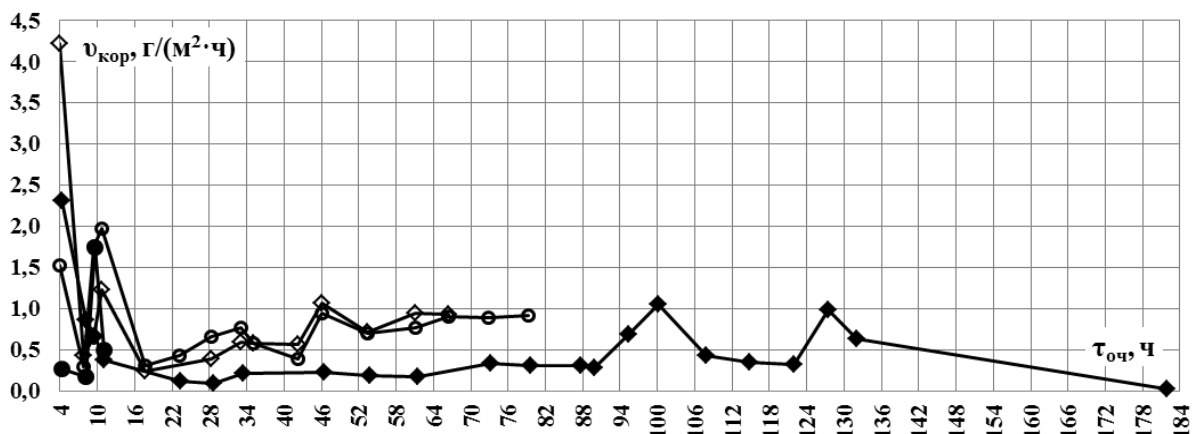


Рис. 2. Изменение скорости коррозии стального дискового индикатора коррозии за время кислотной стадии ХО от равномерных и бугорчатых отложений в нагретых и ненагретых растворах соляной кислоты (исходный раствор: 5 %-ный раствор соляной кислоты, ингибированный уротропином): ● – удаление равномерных отложений при $t_p = 25\text{ }^\circ\text{C}$; ○ – удаление равномерных отложений при $t_p = 55\text{ }^\circ\text{C}$; ◆ – удаление бугорчатых отложений при $t_p = 25\text{ }^\circ\text{C}$; ◇ – удаление бугорчатых отложений при $t_p = 55\text{ }^\circ\text{C}$

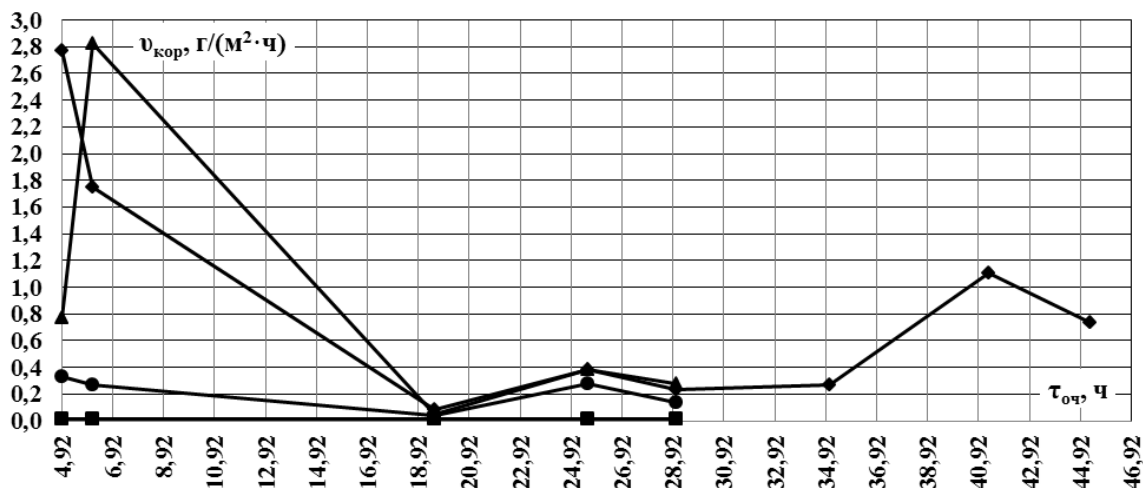


Рис. 3. Изменение скорости коррозии стального дискового индикатора коррозии за время кислотной стадии ХО от равномерных отложений в ненагретых моющих растворах реагентов при температуре растворов, равной $25\text{ }^\circ\text{C}$: ◆ – Auge Pro Ac 60H; ■ – Дескам; ▲ – Auge Pro Ac 60; ● – Антиржавин

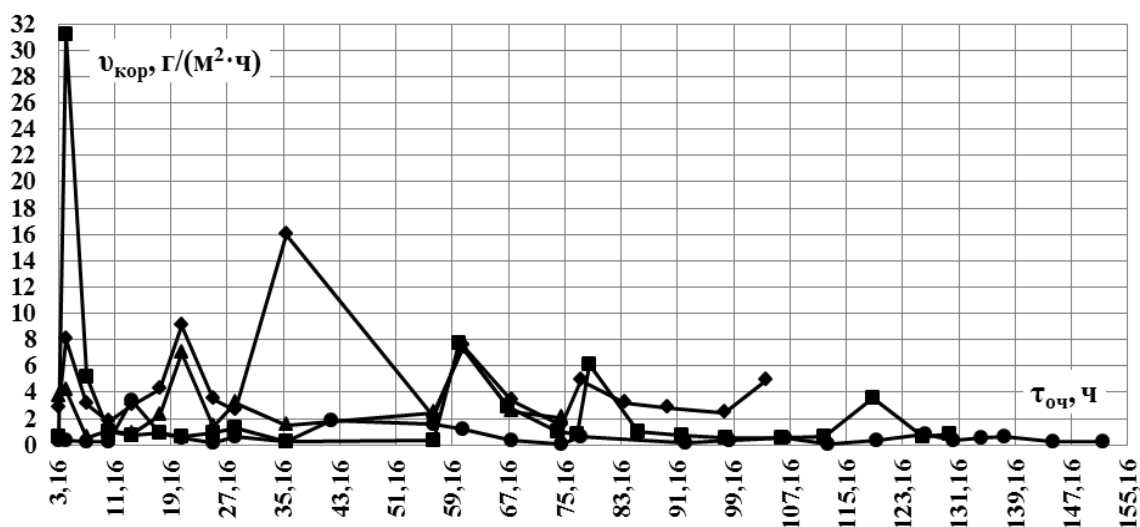


Рис. 4. Изменение скорости коррозии стального дискового индикатора коррозии за время кислотной стадии ХО от бугорчатых отложений в нагретых до $55\text{ }^\circ\text{C}$ моющих растворах реагентов: ◆ – Auge Pro Ac 60H; ■ – Дескам; ▲ – Auge Pro Ac 60; ● – Антиржавин

Скорости коррозии стальных дисковых индикаторов в моющих растворах больше, чем в холодной ингибированной соляной кислоте, которой соответствует значение, равное $0,2 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Однако на конечных кислотных стадиях ХО значения скоростей коррозии близки к нормативно допустимому значению по техническим условиям. Характер эксплуатационных отложений (бугорчатые или равномерные) оказывает влияние на скорость коррозии стальных пластин-индикаторов [6, 7, 9, 10], так как от него зависит скорость уменьшения кислотности моющего раствора и концентрация хлорида железа (III), активирующего коррозию.

Относительно большие значения скоростей коррозии стальных индикаторов в начале кислотной стадии ХО не означают опасность для стали, покрытой оксидными отложениями, которые, несмотря на несовершенство их структуры, все-таки защищают трубы от общей кислотной коррозии.

На завершающем этапе кислотной стадии ХО экранных труб котлов, когда отложения с них практически удалены, большая поверхность стали становится доступной кислотной коррозии, но при этом уменьшена и кислотность моющего раствора. В этих условиях для моющих растворов соляной кислоты и ненагретых растворов реагентов на ее основе (Auge Pro Ac 60H, Дескам, Auge Pro Ac 60 и Антиржавин) экспериментально установлены значения скорости коррозии стали в основном не более $1,0 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, для нагретых растворов реагентов – не более $5 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Полученные значения скоростей коррозии пересчитаны на концентрации водорода в моющих растворах при их циркуляции в зависимости от длительности кислотной обработки. Расчетный выход водорода при коррозии стали вполне соответствует возможности применения водородометрии при контроле скорости коррозии труб на кислотном этапе их очистки.

Выводы. На основании полученных опытных данных в результате лабораторных исследований процесса ХО от бугорчатых и равномерных отложений на внутренних поверхностях экранных труб можно сделать следующие выводы [3, 4, 6]:

1. Скорости коррозии углеродистой стали уменьшаются вследствие уменьшения кислотности моющего раствора.

2. Скорости коррозии углеродистой стали на завершающих этапах кислотной

стадии ХО от бугорчатых и равномерных отложений внутренних поверхностей экранных труб котлов в растворах ингибированной соляной кислоты и растворах реагентов имеют значения, превышающие предельно допустимую скорость коррозии в холодном (при температуре раствора, равной $25 \text{ }^\circ\text{C}$) ингибированном техническом растворе соляной кислоты, которая составляет $0,2 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, но менее $12\text{--}14 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ для чистого металла и $25\text{--}32 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ для металла под окалиной [1].

3. Скорости коррозии углеродистой стали в начале кислотной стадии ХО также не превышают значений (для чистого металла и металла с отложениями) во время очистки ингибированным раствором соляной кислоты.

4. Для контроля коррозии во время кислотной стадии ХО внутренних поверхностей труб паровых котлов целесообразно одно-временное применение пластин-индикаторов коррозии стали (итоговый контроль) и водородометрии (оперативный контроль) с обязательной проверкой на локальные коррозионные повреждения при эксплуатации и очистке представительных образцов, вырезанных из труб поверхностей нагрева в зонах наибольших тепловых потоков.

5. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при выборе технологии проведения кислотной очистки для установления значений скоростей коррозии стальных труб.

Список литературы

1. **МУ 34-70-113-85.** Методические указания по предпусковой химической очистке теплоэнергетического оборудования. – М.: СПО ОРГРЭС, 1986. – 83 с.
2. **РД 34.37.403-91.** Методические указания по эксплуатационной химической очистке котлов энергоблоков сверхкритического давления; утв. Главным научно-техническим управлением энергетики и электрификации: введ. в действие с 17.05.1991 г. – М.: СПО ОРГРЭС, 1991. – 60 с.
3. **Internal Cleaning of Water-Tube Steam Generating Plants and Associated Pipework.** Standard VGB-S-513-00-2014-07-EN. – 2015. – 447 p.
4. **Галикеев А.Р., Аминев Ф.М.** Удаление накипных и шламовых отложений из котельного оборудования химическим путем // Энергосбережение и водоподготовка. – 2004. – № 1. – С. 21–24.
5. **Маргулова Т.Х.** Химические очистки теплоэнергетического оборудования. – М.: Энергия, 1969. – 174 с.
6. **Федорова А.Ю., Бушуев Е.Н.** Выбор реагентов и технологических условий химической

очистки от отложений испарительных труб паровых котлов // Вестник ИГЭУ. – 2018 – Вып. 5. – С. 11–17.

7. **Федорова А.Ю.** Определение скорости коррозии стали применительно к кислотной стадии химической очистки от отложений на внутренних поверхностях испарительных труб паровых котлов // Материалы V науч.-практ. конф. «Теоретические и практические вопросы применения приборов контроля ВХР в энергетике», 18–20 сентября 2019. – Н.Новгород: ВЗОР, 2019. – С. 25–32.

8. **РД 153-34.1-17.465-00.** Методические указания по оценке интенсивности процессов внутренней коррозии в тепловых сетях; утв. РАО «ЕЭС России» 29.09.2000 г. – М., 2001. – 17 с.

9. **Будаева А.Ю., Бушуев Е.Н.** Исследование процесса удаления отложений с внутренних поверхностей нагрева паровых котлов // Материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса. – Иваново, 2017. – Т. 2. – С. 144–147.

10. **Федорова А.Ю., Бушуев Е.Н.** Определение кинетических характеристик химической очистки от отложений в испарительных трубах паровых котлов // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 4. – С. 5–11.

References

1. *Metodicheskie ukazaniya po predpuskovoy khimicheskoy ochistke teploenergeticheskogo oborudovaniya MU 34-70-113-85* [Manual on pre-start chemical cleaning of thermal power equipment MU 34-70-113-85]. Moscow: SPO ORGRES, 1986. 83 p.

2. *Metodicheskie ukazaniya po ekspluatatsionnoy khimicheskoy ochistke kotlov energoblokov sverkhkriticheskogo davleniya RD 34.37.403-91* [Manual on chemical cleaning of boilers of supercritical pressure power units RD 34.37.403-91]. Moscow: SPO ORGRES, 1991. 60 p.

3. Internal Cleaning of Water-Tube Steam Generating Plants and Associated Pipework. Standard VGB-S-513-00-2014-07-EN. 2015. 447 p.

4. Galikeev, A.R., Aminev, F.M. Udaleniye nakipnykh i shlamovykh otlozheniy iz kotel'nogo oborudovaniya khimicheskim putem [Chemical removal of scale and sludge from boiler equipment]. *Energoberezheniye i vodopodgotovka*, 2004, no. 1, pp. 21–24.

5. Margulova, T.Kh. *Khimicheskie ochistki teploenergeticheskogo oborudovaniya* [Chemical cleaning of heat power equipment]. Moscow: Energiya, 1969. 174 p.

6. Fedorova, A.Yu., Bushuev, E.N. Vybor reagentov i tekhnologicheskikh usloviy khimicheskoy ochistki ot otlozheniy isparitel'nykh trub parovykh kotlov [Choice of reagents and technological conditions of chemical cleaning of evaporative pipes of steam boilers from deposits]. *Vestnik IGEU*, 2018, no. 5, pp. 11–17.

7. Fedorova, A.Yu. Opredeleniye skorosti korrozii stali primenitel'no k kislotnoy stadii khimicheskoy ochistki ot otlozheniy na vnutrennikh poverkhnostyakh isparitel'nykh trub parovykh kotlov [The steel corrosion rate at the acidic stage of chemical cleaning from deposits on the inner surfaces of evaporative pipes of steam boiler]. *Materialy V nauchno-prakticheskoy konferentsii «Teoreticheskie i prakticheskie voprosy primeneniya priborov kontrolya VKhR v energetike* [Proceedings of the 5th Conference on Theoretical and practical issues of the use of monitoring devices for water chemistry in the energy sector]. N.Novgorod: VZOR, 2019, pp. 25–32.

8. *Metodicheskie ukazaniya po otsenke intensivnosti protsessov vnutrenney korrozii v teplovykh setyakh RD 153-34.1-17.465-00* [Guidelines for assessing the intensity of internal corrosion processes in heating networks RD 153-34.1-17.465-00]. Moscow, 2001. 17 p.

9. Budaeva, A.Yu., Bushuev, E.N. Issledovaniye protsessov udaleniya otlozheniy s vnutrennikh poverkhnostey nagreva parovykh kotlov [Investigation of the process of removing deposits from the internal heating surfaces of steam boilers]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 175-letiyu so dnya rozhdeniya N.N. Benardosa* [Proceedings of International Scientific and Technical Conference dedicated to the 175th birthday of N.N. Benardos]. Ivanovo, 2017, vol. 2, pp. 144–147.

10. Fedorova, A.Yu., Bushuev, E.N. Opredeleniye kineticheskikh kharakteristik khimicheskoy ochistki ot otlozheniy v isparitel'nykh trubakh parovykh kotlov [Kinetic characteristics of chemical cleaning from deposits in the evaporative pipes of steam boilers]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 4, pp. 5–11.

Федорова Алена Юрьевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», ассистент кафедры химии и химических технологий в энергетике, e-mail: abdvalenka@mail.ru

Fedorova Alena Yuryevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant, Department of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering, e-mail: abdvalenka@mail.ru

Бушуев Евгений Николаевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, телефон 8 (4932) 26-99-32, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru

Bushuev Evgeny Nikolaevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Head of the Department of Theoretical Foundations of Thermal Power Engineering, telephone (4932) 26-99-32, e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru