

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ СУДОВЫХ КОТЛОВ ПРИ СЖИГАНИИ ВОДНО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

*Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Тендитный Ю.Г.,
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Херсонский филиал*

Анализ проблемы и постановка задачи исследований.

Первоочередными задачами, которые стоят перед отечественной энергетикой, являются: обеспечение надежной работы эксплуатируемого оборудования в широком диапазоне регулирования мощности и повышение эффективности путем поэтапного обновления технической базы. Простейшее и доступное решение – научно-обоснованное продление срока эксплуатации энергооборудования с учетом их реального технического состояния. Более сложный, но и более эффективный путь – это модернизация оборудования, которая предусматривает индивидуальный подход при выборе технических мероприятий, которые обеспечивают повышение надежности и эффективности работы энергооборудования при продлении срока его эксплуатации. При этом следует отметить, что затраты на контроль, диагностику, ремонтновосстановительные мероприятия и замену ресурсопределяющих элементов новейшими при продлении сроков эксплуатации оборудования на 15...20 лет значительно ниже (в 6...7 раз) затрат, необходимых для замены оборудования в полном объеме.

Работы по усовершенствованию энергооборудования практически не ведутся, а замена физически и морально уставшего оборудования практически невозможна из-за отсутствия как оборудования, так и финансирования.

Продолжение ресурса теплоэнергетического оборудования дает значительный экономический эффект, который на данный момент – единственный выход из критического положения. В последние годы проектными организациями, заводами-изготовителями и эксплуатационниками совместно с ремонтными предприятиями выполнена большая работа по продлению службы энергооборудования. Восстановление его работоспособности осуществляется или путем замены или обновления отдельных элементов с обеспечением необходимого уровня надежности и безопасности. Большое влияние на надежность работы оказывают режимы работы элементов энергооборудования.

Безопасность, надежность и эффективность работы энергооборудования существенным образом зависят от эрозионно-коррозийной стойкости металла оборудования. Следствия эрозионно-коррозийного влияния проявляются в виде утонения, и в конечном итоге, разрушения элементов энергетического оборудования с последующей разгерметизацией рабочего тракта.

Поэтому снижение интенсивности коррозионных процессов в котлах является постоянной задачей при проектировании и эксплуатации котлов.

Обзор публикаций, анализ нерешенных проблем и постановка задачи исследований. Наряду с традиционными процессами теплообмена и аэродинамики в котлах большое влияние на показатели работы котла оказывают теплохимические процессы, которые все в большей мере ограничивают надежность, долговечность и экономичность работы энергетического оборудования. Одним из факторов, влияющих на конструктивные особенности котлов (энергетических вспомогательных, утилизационных) и их эксплуатацию при сжигании сернистых топлив, являются интенсивное загрязнение и коррозия высокотемпературных и низкотемпературных поверхностей нагрева. Коррозионная агрессивность потока продуктов сгорания органического топлива приводит к ограничению пределов использования их энергии в котлах из-за необходимости поддерживать относительно высокие значения температур низкотемпературных поверхностей нагрева, при которых скорость коррозии находится в допустимых пределах (0,15...0,25 мм/год). Верхний предел температуры стенки ограничен ростом высокотемпературной коррозии при температурах металла выше 450...550 °С в зависимости от марки стали, что объясняется появлением расплава оксидов Na и V, а значит электрохимической коррозии на поверхности труб. Это может ограничить температуру перегрева пара и приводит к необходимости применения дорогих легированных сталей. Нижний предел обусловлен резким усилением низкотемпературной коррозии (НТК) при температурах стенки поверхности нагрева ниже 130...140 °С, что обусловлено конденсацией паров серной кислоты. Появление конденсата кислоты на поверхности нагрева также приводит к возникновению электрохимической коррозии и резкому увеличению скорости коррозионных процессов. В связи с неравномерностью массопереноса паров серной кислоты при температуре поверхности около 100...110 °С появляется так называемый "кислотный пик" коррозии, что существенно ограничивает величину температуры уходящих газов, а следовательно, и величину КПД утилизации энергии продуктов сгорания [3, 9, 10, 13].

Если бы удалось снизить скорость коррозии в области «кислотного пика» коррозии до 0,15...0,25 мм/год, то нижний предел значения температуры стенки поверхности нагрева можно было бы уменьшить до 70...80 °С, что привело бы к снижению температуры уходящих газов до 100...120 °С, а значит к увеличению КПД котлов и к повышению надежности и долговечности низкотемпературных поверхностей нагрева.

До последнего времени мероприятиями, применявшимися для предупреждения или уменьшения коррозии и загрязнения поверхностей нагрева котлов, являлись поддержание температуры поверхности нагрева выше температуры точки росы, ввод присадок в топливо и дымовые газы, использование кислотоупорных покрытий или стойких к коррозии материалов. Считается, что переход к сжиганию мазута с низкими коэффициентами избытка воздуха (при $\alpha=1,03...1,01$) позволяет в какой-то

степени решать проблему и существенно снижает интенсивность НТК в области «кислотного» пика до 0,25...0,3 мм/год, но его применение вызывает большие трудности в эксплуатации при организации процесса горения и его автоматизации при таких низких избытках воздуха [2, 3, 13].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности использования жидкого топлива с точки зрения энергосбережения и защиты окружающей среды считается сжигание водотопливных эмульсий (ВТЭ): при содержании воды до 10...20 % КПД котлов может даже повышаться; с увеличением содержания воды в эмульсии обеспечивается уменьшение содержания токсичных компонентов (NO_x , SO_x , CO, бензапирена) в продуктах сгорания. Опубликованы конкретные данные результатов исследований о ходе коррозионных процессов на низкотемпературных поверхностях нагрева (НТК) котлов при сжигании водотопливных эмульсий [1], которые показывают, что с увеличением содержания воды в эмульсии до 30 % скорость НТК снижается до уровня газовой коррозии, которая наблюдается при температурах стенки выше температуры точки росы серной кислоты (ТТР), т.е. до $\approx 0,15...0,2$ мм/год.

На надежность работы большое влияние оказывает и характер коррозионного процесса. При сжигании стандартных сернистых топлив с содержанием воды 2 % на низкотемпературной поверхности появляется локальная язвенная коррозия, которая переходит к непредсказуемой питтинговой коррозии, существенно снижающей надежность работы низкотемпературных поверхностей нагрева котлов (экономайзера, газового воздухоподогревателя) особенно при температурах стенки ниже точки росы паров серной кислоты [2, 3, 14].

Цель работы – определить интенсивность НТК и характера коррозионного процесса при сжигании водно-топливной эмульсии (ВТЭ), приготовленной на основе сернистых топлив.

Так как проведение исследований коррозионных процессов длительностью 1000 ч на экспериментальной установке вызывает большие трудности (а при обеспечении постоянства параметров процессов горения и коррозии в такой продолжительности нет необходимости), с целью оценки интенсивности низкотемпературной коррозии при сжигании ВТЭ, а также сравнения НТК при сжигании различных топлив при разных режимах сжигания было принято решение о проведении исследований кинетики коррозионных процессов. Для этого в газоход экспериментальной установки одновременно помещались коррозионные образцы, которые затем извлекались последовательно через короткое время (2, 4, 6, 8, 12 ч), что обеспечивает практически одинаковые условия воздействия коррозионной среды с постоянными параметрами при проведении исследований на экспериментальной установке и, следовательно, достаточную воспроизводимость условий проведения опытов [1].

Чтобы при проведении исследований коррозионных процессов при сжигании ВТЭ на экспериментальной установке обеспечить достоверность

проводимых опытов, сначала были проведены исследования при сжигании стандартных топлив при соответствующих коэффициентах избытка воздуха α , для которых имеются литературные данные с результатами длительных опытов, проведенных на действующих котлах или лабораторных установках.

Для получения зависимостей кинетики коррозионных процессов были проведены исследования при сжигании различных видов топлив с разными α . Всего было проведено 25 серий опытов при S^r в топливе от 0,7 % до 2,0 %, при α от 1,01 до 1,5, при содержании воды от 2,0 до 30,0 %: при сжигании необводненного мазута М100 ($W^r = 2$ %) с содержанием серы 0,96 и 2 % при α , равных 1,01; 1,025; 1,05, продолжительностью до 100 ч, а также ВТЭ на основе М40 с содержанием воды 4, 10, 15, 17, 20 и 30 % при α , равных 1,5; 1,45; 1,35; 1,2; 1,15. Для сравнения результатов коррозионных испытаний при горении ВТЭ и стандартного топлива, но с впрыском воды и пара в корень факела сжигался мазут М40. В топку впрыскивалась вода и вводился пар в количествах, эквивалентных водосодержанию эмульсии 30 %.

Аппроксимация экспериментальных данных по убыли массы (глубины коррозии) была проведена в виде степенной зависимости, как предлагается многими авторами [4, 5, 6] в виде $\Delta G_k = A \cdot \tau^n$; где A , n – постоянные коэффициенты для каждого режима, которые определяют характер кривой. Для поиска коэффициентов были использованы математические средства программного комплекса Microsoft Office, в частности Microsoft Excel, а также система Mathcad. На основании полученных данных могут быть найдены аппроксимационные зависимости кинетики коррозии от времени воздействия дымовых газов: убыли металла $\Delta G = f(\tau)$; скорости коррозии $K = f(\tau) = (\Delta G)'$; ускорения коррозии $K' = f(\tau) = (\Delta G)''$, которые дают возможность прогнозировать развитие этих процессов.

Графики и уравнения регрессии, полученные в результате обработки результатов экспериментов, а также значения коэффициентов детерминации R^2 при сжигании ВТЭ с содержанием воды 30% ($S^r = 1,8$ %; $\alpha = 1,45$), при котором наблюдается минимальная интенсивность коррозии, и при сжигании стандартного топлива (М40+Ф12) ($S^r = 1,5$ %; $\alpha = 1,35$), при котором наблюдается максимальная коррозия, представлены на рисунке 1.

Как показали результаты стендовых коррозионных исследований время стабилизации коррозионного процесса, особенно при сжигании ВТЭ, составляет 2...3 ч. Это позволяет оценить уровень коррозионного процесса и прогнозировать процесс на длительное время по результатам исследований кинетики в течение 2...12 ч. В первые 1...3 ч процессы носят ускоренный характер, а затем идут с замедлением. После 4...5 ч практически наступает динамическое равновесие и коррозионный процесс идет с почти постоянной скоростью. Это позволяет расчетным путем при одинаковых условиях работы определить (прогнозировать) значение ΔG в течение любого периода эксплуатации, но при обеспечении стабильных режимов работы.

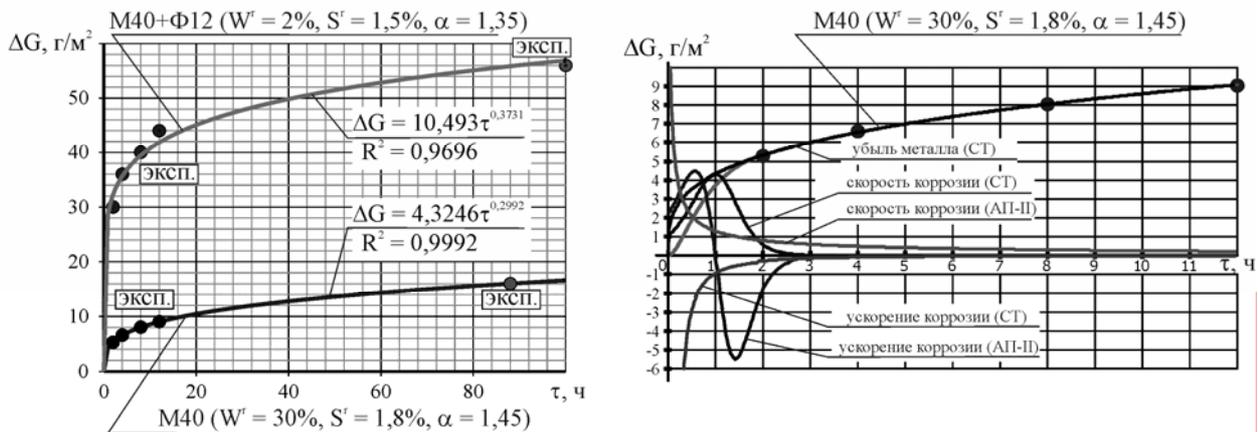


Рисунок 1. Исследование динамики коррозионных процессов:
 $СТ$ – по степенной функции; $АП-II$ – по аperiодической функции 2-го
 порядка

На основании результатов исследований зависимостей $\Delta G = f(\tau)$, полученных при сжигании различных топлив с разными α , было принято решение по данным 8-часовых опытов построить зависимости ΔG от содержания серы S^r в топливе, α и W^r в эмульсии. При этом рассматривались значения ΔG , полученные в области “кислотного” коррозионного пика при $t_{CT} = 105 \dots 115$ °C.

На рисунке 2, *а* представлена зависимость $\Delta G = f(S^r)$ при различном W^r в эмульсии: 2, 4, 10, 15 и 30 %. С увеличением S^r более 0,5 % при любом W^r в эмульсии наблюдается рост ΔG , но темп увеличения ΔG снижается с ростом W^r в эмульсии.

На рисунке 2, *б* представлена зависимость $\Delta G = f(\alpha)$, которая показывает, что начиная с $\alpha = 1,05$ и выше зависимость $\Delta G = f(\alpha)$ имеет практически прямолинейный характер, аналогично данным зависимости скорости коррозии от α , представленным в [13]. Однако с уменьшением α до 1,025 и 1,01 наблюдается резкое снижение ΔG . Причина видимо в том, что при таких значениях α резко снижается содержание SO_3 , а значит и паров H_2SO_4 в дымовых газах, от которых зависит скорость коррозии. Зависимость содержания $SO_3 = f(\alpha)$ носит такой же экспоненциальный характер [3, 11, 12].

На рисунке 2, *в* представлены зависимости ΔG от содержания воды W^r в эмульсии при сжигании мазутов с содержанием серы 0,98, 1,5 и 1,8% при значениях α , равных 1,35...1,45. С увеличением W^r в эмульсии ΔG снижается, причем, чем выше содержание серы в топливе, тем круче снижается кривая зависимости $\Delta G = f(W^r)$. Так, при $S^r = 0,98$ % ΔG снижается с 18,5 г/м² при $W^r = 2,0$ % до 3,5 г/м² при $W^r = 30$ % (т.е. ΔG уменьшилось в 5,3 раза). При $S^r = 1,8$ % ΔG снижается с 58,0 г/м² при $W^r = 2,0$ % до 7,5 г/м² при $W^r = 30$ % (т.е. ΔG снизилось в 7,7 раза). Значение R^2 находится в пределах 0,98...0,99, что указывает на высокую

достоверность проведенных исследований на экспериментальной установке при постоянных параметрах. То, что значения ΔG при $W^r = 30\%$ при разном S^r практически сходятся в одной точке, можно объяснить только тем, что при этом W^r в эмульсии создаются условия для появления пассивации металла. Опыты показывают, что на поверхности создается сплошной солевой слой, отделяющийся в виде тонкой пленки при обработке образцов раствором соляной кислоты, причем поверхность металла имеет характерный при пассивации блеск.

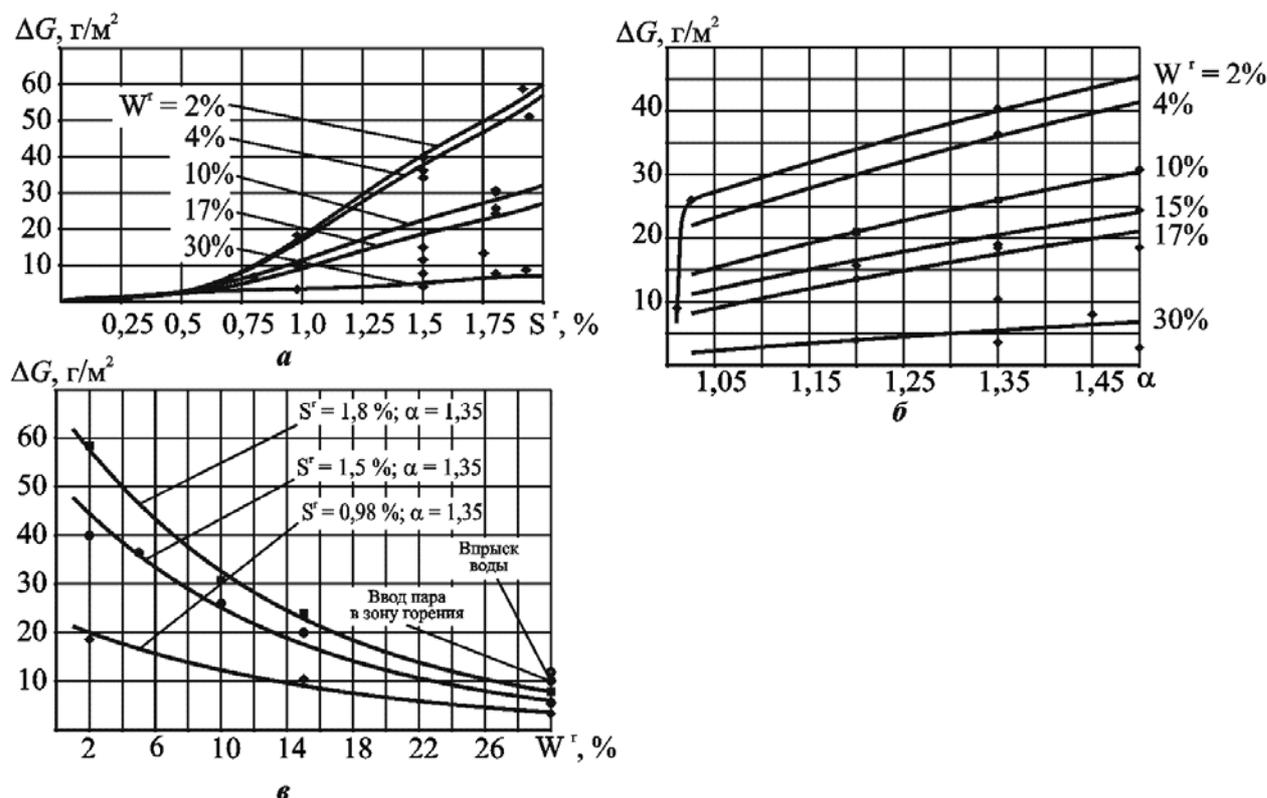


Рисунок 2. Зависимость удельной массы металла ΔG вследствие низкотемпературной коррозии при температуре стенки в области кислотного "пика" при $\tau = 8$ ч от содержания серы S^r (а), от избытка воздуха α (б) при разном водосодержании W^r , а также от водосодержания при разном содержании серы S^r (в)

Если при сжигании стандартного топлива ($W^r = 2\%$) при увеличении S^r от 0,5 до 1,5% ΔG растет с 7,5 г/м² до 40,0 г/м² (т.е. значение ΔG выросло в 5 раз), то при $W^r = 10\%$ ΔG увеличивается до 30 г/м² при $S^r = 1,8\%$ (т.е. значение ΔG возросло в 4 раза). При сжигании ВТЭ с $W^r = 30\%$ наблюдается незначительный рост ΔG : при увеличении S^r от 0,9 до 2,0 % ΔG растет с 3,0 до 9,0 г/м², т.е. убыль массы металла в 5...8 раз ниже, чем при сжигании стандартного топлива.

Необходимо отметить, что при вводе в топку распыленной воды или

водяного пара в количестве, соответствующем 30% воды в эмульсии, значение ΔG меньше, чем при сжигании стандартного топлива, но все-таки выше, чем при сжигании ВТЭ с тем же содержанием воды.

Выводы и перспективы дальнейшего использования результатов. Результаты проведенных исследований показывают, что в отличие от сжигания безводных стандартных топлив при сжигании ВТЭ с водосодержанием около 30 % на интенсивность низкотемпературной коррозии практически не влияет содержание серы S' в топливе и значение коэффициента избытка воздуха α , что упрощает эксплуатацию котлов. И особенно важно, что исчезает «кислотный пик», «перемещение» которого при переменных значениях α и особенно температуры стенки, что всегда имеет место при эксплуатации, приводит к существенному росту скорости коррозии (до 1...1,2 мм/год). Изменяется характер электрохимической НТК: вместо язвенной и питтинговой коррозии, которая приводит к непрогнозируемому выходу из строя поверхности нагрева в короткие сроки и следовательно, существенному снижению надежности работы котлов при сжигании стандартных необводненных топлив, наблюдается равномерная по окружности и незначительная по величине коррозия при сжигании ВТЭ с содержанием воды 30 % [1]. Это подтверждается двухгодичной эксплуатацией котлов на танкере «София» при сжигании ВМЭ с 20...30 % воды. Такой характер НТК позволяет существенно повысить долговечность низкотемпературных поверхностей (воздухоподогревателя, экономайзера), а, следовательно, надежность работы особенно вспомогательных и утилизационных котлов.

Поэтому важно выяснить влияние внедрения режимов сжигания водотопливных эмульсий на надежность поверхностей нагрева паровых котлов. Определение допустимых значений скорости НТК, определяющих не только надежность работы НТК, но и значения температуры уходящих газов, от величины которых зависит КПД котлов, что станет целью последующих исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбов В.М., Горячкин А.В. Исследование интенсивности коррозионных процессов при сжигании водомазутных эмульсий : збірка наук. праць УДМТУ. – Николаїв : УДМТУ, 2003. – № 5 (391). – С. 87–95.
2. Внуков А.К. Надежность и экономичность котлов для газа и мазута. – Л. : Энергия, 1966. – 367 с.
3. Внуков А.К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 296 с.
4. Герасимов В.В. Прогнозирование коррозии металлов. – М. : Металлургия, 1989. – 152 с.
5. Горохов В.А. Расчет загрязнения и коррозии трубчатых поверхностей нагрева котельных агрегатов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996.

6. Жук Н.П. Курс коррозии и защиты металлов. – М. : Металлургия, 1968. – 408 с.
7. Колпаков С.П. Использование топливных суспензий в судовых паровых котлах // Судостроение. – 2001. – № 32. – С. 32–36.
8. Низкотемпературная коррозия и загрязнение поверхностей нагрева в продуктах сгорания ГТД / В.А.Романов, Г.И.Дмитриев, В.И.Щербинкин, Г.В.Проценко // Энергомашиностроение. – 1979. – № 8. – С. 22–25.
9. Низкотемпературная коррозия теплоутилизирующих поверхностей нагрева судового вспомогательного котла / Г.В.Проценко, Н.П.Проценко, В.А.Романов, А.А.Волков // Судостроение. – 1987. – № 10. – С. 20–22.
10. Проценко Г.В., Романов В.А. Низкотемпературная коррозия поверхностей нагрева судовых котлов // Технология судостроения. – 1982. – № 7. – С. 53–57.
11. Стаценко В.Н., Суменков В.Н., Селезнев Ю.С. Эффективность применения водотопливных эмульсий в судовых котлах // Судостроение. – 1999. – № 2. – С. 31–34.
12. Бахирев В.И., Шелыгин Б.Л., Салов Ю.В. Анализ образования SO_3 при горении серосодержащих топлив и отходов // Промышленная энергетика. – 1988. – № 5. – С. 45–48.
13. Брытчиков Н.Я., Горбатенко В.Я. Образование серного ангидрида в топках парогенераторов // Теплоэнергетика. – 1985. – № 10. – С. 23–27.
14. Магадеев В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
15. Эксплуатация производственных котлов КВГ-34К на водотопливной эмульсии / Ю.В. Якубовский, В.М. Суменков, Ю.С. Селезнев и др. // Рыбное хозяйство. – 1991. – № 3. – С. 16–18.