

*Наведено методики досліджень і результати випробувань інтенсивності корозії, утворення важкорозчинних відкладень на зразках різних металів, що обігриваються і не обігриваються, на масштабній моделі зворотної системи охолодження при заданих водно-хімічних режимах*

*Наведено конструкції експериментальних стендів, що моделюють теплогидравлічні умови роботи різних оборотних систем охолодження великих енергетичних об'єктів*

*Ключові слова: корозія, зворотна система охолодження, рециркуляція, стічна вода, інгібування*

*Приведены методики исследований и результаты испытаний интенсивности коррозии, образования труднорастворимых отложений на обогреваемых и необогреваемых образцах различных металлов на масштабной модели оборотной системы охлаждения при заданных водно-химических режимах*

*Приведены конструкции экспериментальных стендов, моделирующих теплогидравлические условия работы различных оборотных систем охлаждения крупных энергетических объектов*

*Ключевые слова: коррозия, отложение, оборотная система охлаждения, циркуляционная вода, ингибирование*

УДК 621.187.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51205

# ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ И НАКОПЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ПРИ УПАРИВАНИИ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

**В. В. Чиченин**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: ch-v-v@yandex.ru

**В. А. Кишнеvский**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: twf.onpu@gmail.com

**А. С. Грицаенко**

Аспирант\*

E-mail: G.Anastasiy90@gmail.com

**В. Г. Ахрамеев**

Старший преподаватель\*

E-mail: Ahvitalchic@mail.ru

**И. Д. Шуляк**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: Shulyak86@gmail.com

\*Кафедра технологии воды и топлива  
Одесский национальный политехнический университет  
пр. Шевченко, 1, г. Одесса, Украина, 65044

## 1. Введение

Водно-химический режим (ВХР) оборотных систем охлаждения (ОСО) крупных энергопредприятий с воздушными охладителями (градирнями) при их подпитке биологически очищенными бытовыми и промышленными стоками предусматривает высокое содержание в циркуляционной воде деполаризаторов коррозии [1].

Использование добавочной воды с высоким содержанием возможно при ведении коррекционного водно-химического режима с низким коэффициентом упаривания циркуляционной воды  $K_y$  меньше 1,3...1,5. Предупреждение коррозионных повреждений теплообменного оборудования и отложение карбоната кальция в этом случае возможно дозированием в циркуляционную воду ингибиторов на основе фосфонатов.

С целью прогнозирования эффективности ведения такого ВХР необходимо определить граничные концентрации различных солей в циркуляционной воде на интенсивность отложений труднорастворимых солей и коррозии на теплообменных поверхностях энергооборудования, что требует длительных и трудоемких экспериментальных исследований.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Известно, что кислородная коррозия энергетического оборудования при высоких концентрациях АСК, кислорода и углекислоты предопределяет язвенный характер поражения сталей [2, 3]. Неоднозначность прогнозирования интенсивности коррозии теплообменного оборудования и накопления отложений усложняется также тепло-гидравлическими характеристиками процессов охлаждения в градирне и нагрева теплообменных поверхностей конденсатора циркуляционной водой [4, 5]. Процесс рециркуляции сопровождается отложениями грубодисперсных примесей, труднорастворимых соединений карбоната кальция на поверхности теплообмена, а также на необогреваемых поверхностях оросительных устройств градирни и соединительных трубопроводов (транспортных циркуляционных водоводов ОСО) [6].

Связь между интенсивностью коррозии и накоплением отложений на необогреваемой и обогреваемой поверхностях изучалась многими авторами [7, 8]. Результаты исследований интенсивности коррозии на

теплообменной поверхности конденсатора при охлаждении пересыщенной по карбонату кальция циркуляционной водой показано в [9]. В работах [10, 11] предлагался ряд методов, где в качестве инструментов прогнозирования используются критериальные уравнения, которые характеризуют физико-химические свойства циркуляционной воды. Наиболее часто встречающимся в литературе показателем, по которому судят о вероятности образования карбонатных отложений либо коррозии, наряду с индексами Ризнера, Ларсона-Скольда является индекс Ланжелье. Они характеризуют свойства воды в зависимости от соотношения значений рН фактического и рН, соответствующего равновесному состоянию углекислота – карбонат-ион в исследуемой воде.

Показано, что критериальные уравнения характеризуют физико-химические свойства воды, определяющие возможность выделения кристаллов кальция из исследуемой воды, но не могут быть использованы для интерпретации показателей интенсивности отложений [12, 13]. Эффективность и надежность работы теплообменного оборудования возможны при решении задач, связанных с качеством добавочной воды, выбором водно-химического режима ОСО при исследовании на масштабных моделях [14].

При использовании ВХР ОСО с рециркуляцией продувочной воды на включённом осветлителе возмещающие уменьшение удельной величины отложений на теплообменных поверхностях до 0,1...0,2 мм/год [13]. Однако использование предложенных ВХР сопровождается значительным концентрированием деполяризаторов коррозии – АСК в циркуляционной воде.

Обоснование выбора ингибитора отложений и коррозии для таких вод является малоизученным и требует лабораторных и промышленных исследований для заданных коэффициентов упаривания циркуляционной воды.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является исследование влияния фосфатных ингибиторов отложений на процессы отложений и коррозии в ОСО при использовании биологически очищенных бытовых и промышленных стоков в качестве питательной воды.

Для достижения этой цели необходимо решение следующих задач:

- разработать методику исследования интенсивности коррозии и накопления отложений на обогреваемых и необогреваемых «холодных» поверхностях энергооборудования ОСО при различных коэффициентах упаривания и высоких концентрациях сульфатов и хлоридов в добавочной и циркуляционной воде при использовании ингибиторов отложений;

- разработать экспериментальную установку для исследования интенсивности коррозии и накопления отложений на обогреваемых и необогреваемых поверхностях исследуемых образцов металлов при заданном содержании добавочной и циркуляционной воды при ее ингибировании с учетом различных тепло-гидравлических условий омывания исследуемых образцов;

- исследовать интенсивность коррозии и накопления отложений на обогреваемых и необогреваемых образцах из стали Ст.20 и сплавов МНЖ5-1, ЛАМш77-2-0,05 при

различных скоростях омывания жидкостью и заданном физико-химическом составе добавочной и циркуляционной воды.

### 4. Методика исследования и описание экспериментальной установки

Скорости накипеобразования и интенсивности коррозии определялись на основании длительных экспериментальных исследований при соответствующих тепло-гидравлических условиях для теплоносителя заданного качества. Длительность исследований значительно влияет на надежность прогнозирования интенсивности коррозии в промышленных условиях и должна превышать 600...1000 часов.

Контроль за интенсивностью коррозии определялся весовым методом, периодичность снятия образцов металлов для контроля в первый период составляла 50...60 ч, а после прохождения 400...500 ч непрерывного эксперимента время экспозиции составляло 200 ч. На основании литературных источников [3, 14], стабилизация скорости коррозии наступает после 600 часов стеновых испытаний.

Для качественного контроля отложений использовался рентгено-структурный анализ.

Периодичность контроля физико-химического состава циркуляционной воды осуществлялась каждые 12 ч. Объем отбираемой пробы на контроль выполнял также функцию продувки циркуляционной системы.

Качество добавочной воды (Д) и циркуляционной воды (Ц) системы приводится в табл. 1.

Таблица 1

Качество добавочной и циркуляционной вод, использованных для проведения испытаний на масштабной модели

Показатель	Величина		Единица измерения
	Д	Ц	
Жесткость общая	9,0	10,8	мг-экв/дм <sup>3</sup>
в том числе:			
Кальция	3,2	8,5	мг-экв/дм <sup>3</sup>
Магния	3,3	4,0	мг-экв/дм <sup>3</sup>
Содержание натрия	515	909	мг/дм <sup>3</sup>
Щелочность общая	17,3	9,6	мг-экв/дм <sup>3</sup>
Щелочность по фенолфталеину	4,1	0,45	мг-экв/дм <sup>3</sup>
Содержание хлоридов	614	958	мг/дм <sup>3</sup>
Содержание сульфатов	633	741	мг/дм <sup>3</sup>
Сумма фосфатов	20,3	4,6	мг/дм <sup>3</sup>
Солесодержание	1790	3408	мг/дм <sup>3</sup>
Проводимость	4,5...5,5	10,0	См/см
Величина рН	6,8	8,8	
Содержание взвешенных веществ	8	29	мг/дм <sup>3</sup>
Окисляемость	5	10,6	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>

Коэффициент упаривания по концентрации хлоридов составил  $K_y(\text{Cl})=958/614=1,6$ .

Согласно методике [14], критическая величина отложений по карбонату кальция для воды такого качества соответствует коэффициенту упариванию  $K_y=1,2...1,3$ . Для контроля постоянства величины  $K_y$  и солевого содержания теплоносителя в процессе испытания осуществлялся непрерывный контроль за следующими величинами: pH, удельная электропроводность, жесткость общая, жесткость кальциевая, щелочность, концентрация сульфатов, хлоридов, меди и железа.

При циркуляции теплоносителя в контуре ОСО отложения накипеобразователей и коррозия происходят как на необогреваемых участках оборудования: циркуляционные трубопроводы, орошающая система градирни, поверхности емкостей и др., так и на поверхностях теплообменных трубок и трубных досках конденсаторов, теплообменников.

Скорость обтекания для обогреваемых и необогреваемых исследуемых образцов металлов в экспериментальных установках соответствовала промышленным условиям и находилась в пределах  $1...3$  м/с. В исследованиях образцов с обогревом величина удельного теплового потока соответствовала промышленным теплообменным аппаратам и равнялась  $25$  кВт/м<sup>2</sup>.

Исходя из этого, были сконструированы экспериментальные стенды с обогревом поверхности образца при заданной скорости циркуляции, рис. 1, 2 и стенд, работающий в изотермических условиях, рис. 3.

*Описание экспериментального стенда с обогревом поверхности образцов конструкционных материалов (КМ).*

При исследовании обогрев образцов осуществлялся циркуляционной водой 8, подаваемой из масштабной модели оборотной системы охлаждения на батарею из восьми кассет. Конструкция модели, включающая градирню и конденсатор, позволяет изменять в широких пределах: расход оборотной (циркуляционной) воды, величину потерь на испарение  $p_1$ , капельный унос  $p_2$ , продувку  $p_3$  и расход воздуха, подаваемого в градирню.

Кассета состояла из плексигласового корпуса, в котором устанавливались отрезки труб исследуемых материалов – Ст.20, МНЖ5-1 и ЛАМш77-2-0,05, вода проходила в коаксиальном пространстве со значением Рейнольдса – 10000. Необходимая удельная тепловая нагрузка на исследуемой поверхности обеспечивалась нагревателем и лабораторным автотрансформатором (ЛАТР). Через определенное время для проведения контроля образцы труб из исследуемых материалов демонтировались из кассет.

Циркуляционная вода для стенда готовилась путем добавления в подпиточную воду ингибиторов на основе фосфонатов из расчета поддержания их концентраций на уровне  $50$  мг/дм<sup>3</sup>.

При обработке воды этими реагентами в растворах, пересыщенных по карбонату кальция, фосфонаты образуют прочный комплекс с ионами  $\text{Ca}^{2+}$ , который сорбируется на поверхности ранее образованных кристаллов и центров кристаллизации и препятствует дальнейшему росту и агломерации. Отсутствие эффективных и активных центров кристаллизации за счет блокирования поверхности кристаллов обеспечивает поддержание раствора в пересыщенном состоянии без выделения накипи. Процессы ингибирования корро-

зии и накипиобразования взаимосвязаны по влиянию как на состояние теплообменных поверхностей, так и на поведение фосфонатов в циркуляционной воде. Убыль циркуляционной воды вследствие капельного уноса, упаривания в градирне и отбора проб компенсировалась с одновременной корректировкой содержания указанных реагентов в водном объеме стенда.

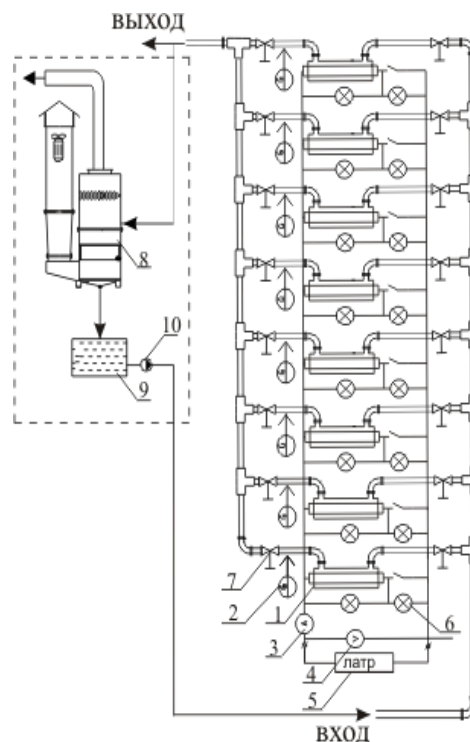


Рис. 1. Схема масштабной тепло-гидравлической модели ОСО: 1 – рабочая ячейка, 2 – расходомер, 3 – амперметр, 4 – вольтметр, 5 – ЛАТР, 6 – индикатор, 7 – задвижка, 8 – градирня, 9 – емкость, 10 – насос

Лабораторный стенд (рис. 3) для испытаний скорости коррозии при изотермических условиях представляет собой три цилиндрические полиэтиленовые емкости 1 объемом  $20$  дм<sup>3</sup> каждая. В емкостях установлены теплообменники 5, коммутированные параллельно и подключенные к термостату 2, с помощью которого в них поддерживалась заданная температура циркуляционной воды.

Емкости закрываются крышками, на которых установлены: привод 3, вращающийся диск 4 с образцами КМ, теплообменник 5 и холодильник 6, установленный для контроля концентрации циркуляционной воды за счет испарения. Величины продувки  $P_3$  и капельный унос регулировались отбором воды на анализ и соответствующим объемом добавочной воды для поддержания заданного значения  $K_y$ .

Маркированные и подготовленные образцы КМ крепились на вращающихся дисках так, чтобы их плоскость была перпендикулярна радиусу дисков. На дисках, установленных в отдельных баках, укреплялись исследуемые образцы из одного металла – Ст.20, МНЖ5-1 или ЛАМш77-2-0,05. Каждая серия состояла из трех образцов, укрепленных на разных расстояниях от центра дисков, что предполагает три разные скорости обтекания образцов. Скорость самого удаленного

от оси образца равна  $\approx 1,5$  м/с при угловой скорости диска 4 об/с.

Перед установкой поверхность пластин зачищалась наждачной бумагой № 0. После механической обработки измерялись геометрические размеры каждого образца, затем образцы обезжиривались этиловым спиртом и протирались фильтровальной бумагой. Далее их располагали на стеклянной подложке и помещали в сушильный шкаф, где выдерживали при  $t=105$  °С в течение двух часов. После этого образцы помещали в эксикатор до достижения температуры окружающей среды. Взвешивание образцов производили на аналитических весах с точностью до 0,0002 г, после чего их вновь возвращали в эксикатор до комплектования кассет.

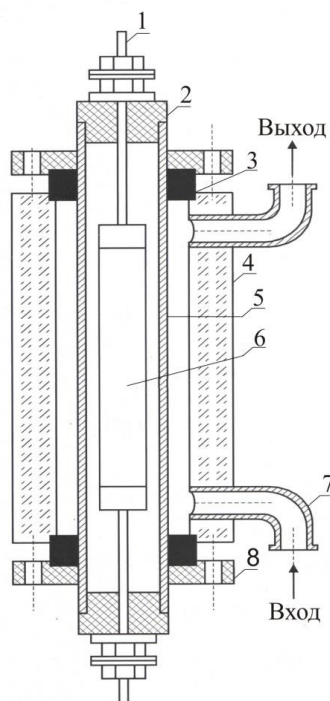


Рис. 2. Конструкция рабочей ячейки:  
1 – клемма подвода электропитания;  
2 – изолятор проходной;  
3 – уплотнительное кольцо; 4 – обечайка;  
5 – исследуемый образец; 6 – электрический нагреватель; 7 – штуцер; 8 – фланец

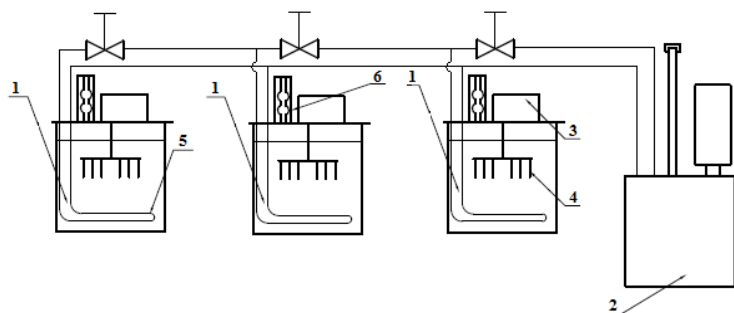


Рис. 3. Схема лабораторного стенда для исследования коррозии конструкционных материалов в динамических условиях: 1 – емкость термостатированная, 2 – термостат, 3 – электропривод, 4 – диск с образцами, 5 – теплообменник, 6 – холодильник

## 5. Результаты исследований скорости коррозии и интенсивности накопления отложений на исследуемых образцах из различных материалов

Результаты исследования интенсивности накопления отложений ( $J_o$ ) и коррозии ( $J_k$ ) приведены на рис. 4.

Из рис. 4, *a* видно, что установившийся режим накопления отложений на поверхностях образцов КМ наступает после 100...150 ч. После 600 ч работы скорость отложений уменьшается в 2...2,5 раза.

Начало уверенного контроля процесса кристаллизации и накопления отложений на поверхности образцов определялось выходом на температурный режим и установившийся режим динамического равновесия карбонатной системы в циркуляционной воде при заданных  $K_y=1,5...1,8$ . Установившийся режим в проведенных экспериментах наступал после 100...150 ч работы стенда. С этого времени пресыщение в циркуляционной воде превышает некоторую критическую величину, при которой происходит зарождение и рост кристаллов в объеме циркуляционной воды с последующими рыхлыми отложениями на поверхности контрольных образцов.

После 100...120 ч работы объемная концентрация кристаллов в потоке циркуляционной воды непрерывно растет и при отсутствии ингибирования происходят процессы образования на поверхности образцов КМ центров кристаллизации, которые, увеличиваясь в размерах, срываются в отдельные сплошные участки труднорастворимых отложений.

В процессе роста отложений точность измерений удельной массы отложений увеличивается, что характеризует установившийся процесс формирования отложений на теплообменной поверхности при заданном ВХР.

Представленные на графиках (рис. 4, *a, б*) экспериментальные зависимости процессов отложений  $J_o=f(\tau)$  можно разделить на три периода:

- установления динамического равновесия карбонатной системы в циркуляционной воде при её упаривании до выхода на исследуемое значение  $K_y$  за счет большой поверхности соприкосновения твердой фазы выделившихся карбонатов с циркуляционной водой (от 0 до 150 ч);
- нестационарных процессов образования кристаллов, их прикрепления-отрыва от поверхности образцов труб, в течение которого измерения массы отложений на контрольных образцах характеризуются непостоянством измеренных значений, имеющих случайный характер (от 150 до 600 ч);

– стабилизации интенсивности отложений на сформировавшихся центрах кристаллизации на поверхности и процессов коррозии. Измерение массы накопления отложений в этом периоде характеризуется значительным увеличением точности измерений (от 600 ч и более).

Следует отметить, что скорость накопления отложений на обогреваемых образцах до 600 ч в 3...4 раза меньше по сравнению с необогреваемыми в этот же период времени в независимости от материала образцов (рис. 4, *a*). Что касается результатов накопления отложений на необогреваемых образцах, то они характеризуются более высокими значениями накопления отложений на образцах из Ст.20 (рис. 4, *a*) и незначительными, в пределах точности измерений на образцах из ЛАМш77-2-0,05 и МНЖ5-1.

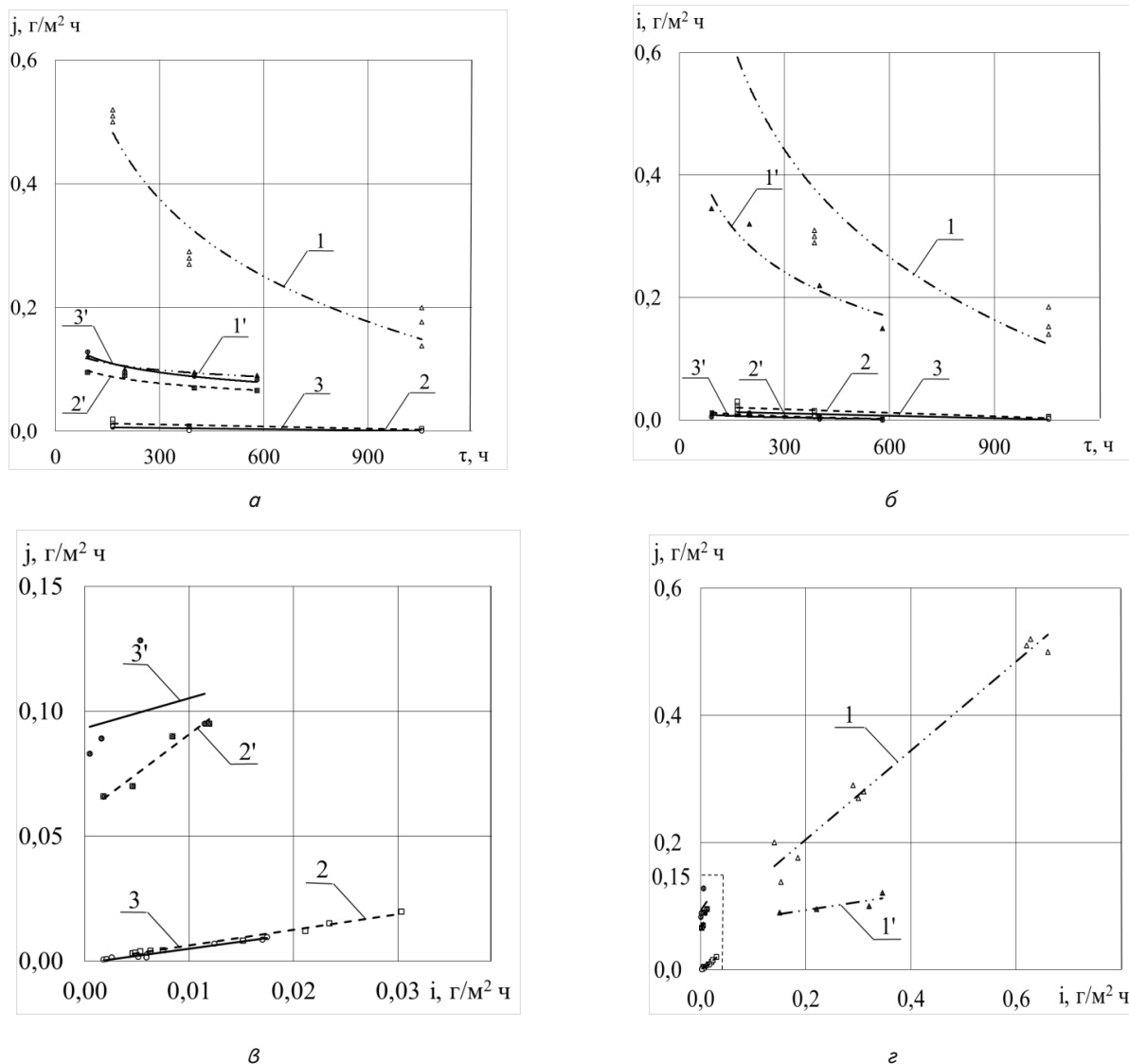


Рис. 4. Изменение интенсивности накопления отложений на исследуемых образцах и скорости коррозии материалов образцов: а – изменение интенсивности накопления отложений на исследуемых образцах ( $J_0$ ), б – изменение скорости коррозии материалов образцов ( $J_k$ ); в, г – соотношение интенсивности коррозии и интенсивности отложений на отдельных образцах: 1 – Ст.20, 2 – МНЖ5-1, 3 – ЛАМш77-2-0,05 при изотермических условиях; 1' – Ст.20, 2' – МНЖ5-1, 3' – ЛАМш77-2-0,05 с подогревом образцов

Разность между величинами накопления отложений на поверхностях обогреваемых и необогреваемых образцов металлов можно объяснить различным течением процессов накопления отложений труднорастворимых соединений  $CaCO_3$  в пограничных слоях за счет эффекта повышения температуры циркуляционной воды на обогреваемой поверхности. Изменение температуры влияет на уменьшение растворимости углекислоты и кислорода, а также на величину процесса термического разложения бикарбоната кальция, описывается уравнением:



Эта реакция сопровождается повышением pH в пограничном слое циркуляционной воды на поверхности образца, что в конечном итоге приводит к увеличению интенсивности отложений карбоната кальция и изменению интенсивности коррозии образцов МНЖ5-1, ЛАМш77-2-0,05.

Более высокие величины накоплений отложений на образцах из Ст.20 объясняется значительной скоростью коррозии металла и растворением его части в воде. Разность между величинами интенсивности коррозии, измеренной по потере массы образцов из Ст.20, и величиной накопления отложений на необогреваемых образцах из Ст.20 объясняется растворением металла в воде, что подтверждается увеличением его концентрации в циркуляционной воде. Интенсивность коррозии необогреваемых образцов из МНЖ5-1, ЛАМш77-2-0,05 незначительна.

Величины интенсивности накопления отложений ( $J_0$ ) на обогреваемых образцах Ст.20, МНЖ5-1 и ЛАМш77-2-0,05 (рис. 4, а) практически равны и характеризуются величиной  $0,10 \text{ г/м}^2\cdot\text{ч}$ . За тот же период на необогреваемых образцах МНЖ5-1 и ЛАМш77-2-0,05 накопления отложений не наблюдалось, что можно объяснить отсутствием коррозии этих материалов (рис. 4, б). Интенсивность коррозии для необогрева-

Состав отложений на образцах из Ст.20

Показатель	Длительность испытаний		
	100 часов	150 часов	600 часов
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	77,0	76,24	74,29
CaO, %	4,03	3,27	3,44
MgO, %	0,36	0,38	0,40

## 6. Выводы

1. При ингибировании добавочной воды в потоке циркуляционной воды происходит управляемый процесс образования инертного к отложениям шлама. В процессе упаривания циркуляционной воды одновременно происходят процессы кристаллизации и роста кристаллов в потоке циркуляционной воды и кристаллизация отложений на контрольных образцах.

2. В экспериментах с ингибированием добавочной воды фосфонатами процессы шламобразования в потоке преобладают над процессами отложений на теплообменной поверхности. При этом величина интенсивности накопления отложений в 2...3 раза меньше по сравнению с опытами без ингибирования. Из-за низкой воспроизводимости результатов исследований без ингибирования эти данные в статье не приводятся.

3. Сравнения полученных результатов физико-химического состава отложений на основе рентгено-фазового анализа, гравиметрического, химического контроля на исследуемых образцах и интенсивности коррозии образцов Ст.20 показывают сопоставимость полученных результатов после 100...150 часов испытаний. Однако, при более длительных испытаниях, например, 600 часов, общее количество отложений на образцах, полученное путем гравиметрического контроля, меньше убыли массы за счет коррозии, это объясняется растворением металла в циркуляционной воде и низким сцеплением продуктов коррозии с поверхностью образца.

емых и обогреваемых образцов из Ст.20 в конце испытаний практически одинакова и характеризуется величиной 0,10 г/м<sup>2</sup>·ч, однако процесс стабилизации интенсивности коррозии для необогреваемых образцов наступает при 350 ч и более (рис. 4, б).

При отсутствии коррозии на образцах из МНЖ5-1 и ЛАМЩ77-2-0,05 и значительной величины коррозии на образцах из Ст.20 величины  $J_0$  практически одинаковы, что подтверждает тезис, что основным фактором, влияющим на величину отложений, является величина пересыщения циркуляционной воды.

Влияние разности температур между образцами и циркуляционной водой на интенсивность отложений ярко выражена для образцов из Ст.20 на фоне высокой величины  $J_k$  для этих образцов.

Исходя из этого, следует отметить, что основными определяющими факторами, способствующим отложениям на исследуемых образцах, является величина пересыщения циркуляционной воды по солям-накипобразователям.

На основании рентгенофазового анализа показано, что основная масса отложений на образцах стали в контакте с циркуляционной водой оборотной системы охлаждения при дозировании ингибитора и без него состоит на первых этапах исследования из CaO, MgO, CaCO<sub>3</sub> и Fe<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. На более поздних этапах обработки формируются: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\gamma$  – FeOOH, и  $\alpha$  – FeOOH, что коррелируется с результатами, приведенными в [15].

В табл. 2 приведен химический состав отложений, снятых с образцов через 100, 150, 600 часов испытаний.

Результаты химического анализа отложений показывают, что основной вклад в их формирование вносится за счет коррозии стали, а труднорастворимые соли кальция и магния суммарно не превышают 4,0...4,5 % от общего количества отложений.

Низкое значение количества CaO и практически полное отсутствие MgO говорит об отсутствии труднорастворимых соединений в отложениях за счет эффективности процесса ингибирования и исследуемого водно-химического режима масштабной ОСО для данного класса воды.

## Литература

- Gallegos, A. A. Evaluation of Water Corrosivity Using a Corrosion Rate Model for a Cooling Water System [Text] / A. A. Gallegos, S. S. Martinez, L. J. Reyes Ramirez // J. New Mater. Electrochem. Syst. – 2005. – Vol. 8. – P. 133–142.
- Cervová, J. Corrosive protection of metal materials in cooling water [Text] / J. Cervová, M. Hagarová, P. Lacková // Am. J. Mater. Sci. Appl. – 2014. – Vol. 2, Issue 1. – P. 6–10. – Available at: <http://www.openscienceonline.com/journal/ajmsa>
- Safari, I. Utilization of municipal wastewater for cooling in thermoelectric power plants [Text] / I. Safari, M. E. Walker, M.-K. Hsieh, D. A. Dzombak, W. Liu, R. D. Vidic et. al. // Fuel. – 2013. – Vol. 111. – P. 103–113. doi: 10.1016/j.fuel.2013.03.062
- Li, Y.-D. Failure analysis of the condenser brass tube in 150MW thermal power units [Text] / Y.-D. Li, N. Xu, X.-F. Wu, W.-M. Guo, J.-B. Shi, Q.-S. Zang // Engineering Failure Analysis. – 2013. – Vol. 33. – P. 75–82. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.04.026
- Karabelas, A. J. Scale formation in tubular heat exchangers—research priorities [Text] / A. J. Karabelas // International Journal of Thermal Sciences. – 2002. – Vol. 41, Issue 7. – P. 682–692. doi: 10.1016/s1290-0729(02)01363-7
- Hui, Q. Mixing Corrosion of CaCO<sub>3</sub> in Natural Waters [Text] / Q. Hui, L. Peiyue // E-Journal of Chemistry. – 2011. – Vol. 8, Issue 3. – P. 1124–1131. doi: 10.1155/2011/891053
- Marín-Cruz, J. EIS characterization of the evolution of calcium carbonate scaling in cooling systems in presence of inhibitors [Text] / J. Marín-Cruz, R. Cabrera-Sierra, M. A. Pech-Canul, I. González // Journal of Solid State Electrochemistry. – 2007. – Vol. 11, Issue 9. – P. 1245–1252. doi: 10.1007/s10008-007-0279-3
- Little, B. An overview of microbiologically influenced corrosion [Text] / B. Little, P. Wagner, F. Mansfeld // Electrochimica Acta. – 1992. – Vol. 37, Issue 12. – P. 2185–2194. doi: 10.1016/0013-4686(92)85110-7
- Shen, C. Fouling of enhanced tubes for condensers used in cooling tower systems: A literature review [Text] / C. Shen, C. Cirone, A. M. Jacobi, X. Wang // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Vol. 79. – P. 74–87. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.014

10. Технический справочник по обработке воды: в 2 т. Т. 1; пер. с фр. [Текст]. – СПб.: Новый журнал, 2007.
11. Акользин, П. А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования [Текст] / П. А. Акользин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 303 с.
12. Кишневский, В. А. Исследование процессов карбонатных отложений на теплообменных поверхностях конденсаторов [Текст] / В. А. Кишневский, В. В. Чиченин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 3, № 8 (69). – С. 52–58. doi: 10.15587/1729-4061.2014.25191
13. Кишневский, В. А. Методика расчета водно-химического режима комплексной оборотной системы охлаждения с рециркуляцией [Текст] / В. А. Кишневский, В. В. Чиченин, И. Д. Шуляк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 6, № 8 (66). – С. 10–14. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/19428/17072>
14. Чиченін, В. В. Підвищення ефективності кондиціонування теплоносіїв в освітлювачах комплексних зворотних систем охолодження енергоустановок [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Чиченін. – Одеса, 2010. – 19 с.
15. Peev, T. Some Data on the Dynamics of Corrosion Processes in Water Circulation Cooling Systems [Text] / T. Peev, V. Taseva, I. Mitov, V. Kunev, D. Paneva, V. Bonev // Monatshefte fuer Chemie/Chemical Monthly. – 2001. – Vol. 132, Issue 10. – P. 1181–1188. doi: 10.1007/s007060170033

*Досліджено протизносні властивості палива для ПРД, двох видів біокомпонентів, отриманих з ріпакової олії та їх сумішей. Встановлено, що змащувальна здатність біокомпонентів є вищою у порівнянні з нафтовим паливом для ПРД. Додавання біокомпонентів призводить до зміцнення граничної плівки та поліпшує протизносні властивості паливних сумішей. Встановлено, що модифікування біокомпонентів підвищує їх змащувальну здатність у порівнянні зі стандартними біокомпонентами*

*Ключові слова: паливо для ПРД, альтернативне паливо, зношування, біокомпоненти, змащуюча здатність, навантаження до задирання, тертя*

*Исследованы противозносные свойства топлива для ВРД, двух видов биоконпонентов, полученных из рапсового масла и их смесей. Установлено, что смазывающая способность биоконпонентов выше по сравнению с нефтяным топливом для ВРД. Добавление биоконпонентов приводит к упрочнению граничного слоя и улучшает противозносные свойства топливных смесей. Установлено, что модифицирование биоконпонентов повышает их смазывающую способность по сравнению со стандартными биоконпонентами*

*Ключевые слова: топливо для ВРД, альтернативное топливо, износ, биоконпоненты, смазывающая способность, нагрузка задира, трение*

UDC 621.891(045)

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51682

## EXPERIMENTAL STUDY ON ANTIWEAR PROPERTIES FOR BLENDS OF JET FUEL WITH BIO-COMPONENTS DERIVED FROM RAPESEED OIL

A. Iakovlieva

Assistant\*

E-mail: [pinchuk\\_anya@ukr.net](mailto:pinchuk_anya@ukr.net)

H. Kuszewski

PhD, associate professor\*\*

E-mail: [hkuszews@prz.edu.pl](mailto:hkuszews@prz.edu.pl)

O. Vovk

Doctor of Sciences, associate professor\*

E-mail: [o.a.vovk@mail.ru](mailto:o.a.vovk@mail.ru)

S. Boichenko

Doctor of Technical Sciences, professor\*\*

E-mail: [chemmotology@ukr.net](mailto:chemmotology@ukr.net)

K. Lejda

Doctor of Sciences, professor\*\*

E-mail: [klejda@prz.edu.pl](mailto:klejda@prz.edu.pl)

M. Jakubowski

PhD, associate professor\*\*

E-mail: [mjakubow@prz.edu.pl](mailto:mjakubow@prz.edu.pl)

\*Ecology department

National aviation university

Kosmonavta Komarova, 1, Kyiv, Ukraine, 03058

\*\*Department of internal combustion engines and transport

Rzeszow university of technology

8 Povstancov Warszawy ave., Rzeszow, Poland, 35-959

### 1. Introduction

Over the last years, increasing attention is paid to the question of traditional energy sources replacement with

their alternative analogues [1, 2]. The question is particularly acute for transport sector [3–5]. During last decade alternative fuels have been used not only motor transport, but for aviation as well. Today numbers of international