

# Переработка сырья и ресурсосбережение

УДК 620.197

**Белоусова Н.А.**, канд. техн. наук,  
**Герасименко Ю.С.**, докт. техн. наук, проф., **Редько Р.М.**, **Вичкань И.Ю.**  
**Национальный технический университет Украины «КПИ»**, Киев  
просп. Победы, 37, корп. 4, 03056 Киев, Украина, e-mail: bilousova@xtf.kpi.ua

## Моделирование роста и оценка противокоррозионных свойств накипи

Изучены особенности накипеобразования в режиме водогрейного котла в воде с высокой жесткостью. Определены эффективность антинакипного и противокоррозионного действия антискалантов. Разработаны экспериментальная установка и методика определения удельной скорости накипеобразования и скорости коррозии стали (методом поляризационного сопротивления) в условиях регулируемой подпитки водой, которая обеспечивает постоянство концентрации солей жесткости и максимальную скорость осаждения накипи, а также постоянство концентрации антискаланта. Функциональные зависимости нарастания удельной массы накипи во времени для исследованных антискалантов ОЭДФ, ЛВХ-1.1 (на основе органических фосфонатов) и SeaQuest (на основе полифосфата) имеют линейный характер. Структура и антикоррозионные свойства образованных слоев накипи существенно зависят не только от природы и концентрации антискаланта, но и от скорости подпитки свежей водой. При сравнительных испытаниях реагентов с одинаковыми концентрациями установлено, что наилучшими ингибиторными и антинакипными свойствами в воде с жесткостью 20,2 мг-экв/дм<sup>3</sup> обладает ОЭДФ. Разработанная методика и полученные зависимости позволяют прогнозировать антинакипное и противокоррозионное действие реагентов для котельных установок малой мощности, которые работают без водоподготовки в течение отопительного сезона. *Библ. 11, рис. 4.*

**Ключевые слова:** накипь, скорость накипеобразования, антискалант, скорость коррозии.

Коррозия и накипеобразование, организация рационального водно-химического режима являются одними из основных и актуальных проблем систем теплоснабжения. Показатели качества воды по накипеобразующей способности регламентируются правилами безопасной эксплуатации водогрейного оборудования [1]. Для изучения и прогнозирования процессов накипеобразования, оценки эффективности антискалантов и ингибиторов коррозии, применяемых в системах теплоснабжения, необходимо иметь надежную экспериментальную методику,

которая моделирует образование накипи близко к реальным условиям. Осадки накипи формируются в течение длительного времени. Их состав и структура зависят от состава воды, типа оборудования, температуры, показателя рН, гидродинамических условий. Моделирование процессов накипеобразования и коррозии на поверхности металла водогрейного котла должно учитывать вышеуказанные факторы.

Исследователями были предложены различные методики эксперимента для оценки накипеобразования и антикоррозионного действия

реагентов [2–5]. В частности, методики Всероссийского теплотехнического института (ВТИ), рекомендованные для определения дозирования антинакипина с применением автоклавов, используют повышенное давление и инертную атмосферу азота. Эффективность накипеобразования рассчитывают по изменению общей жесткости воды после ее выдержки при определенной температуре в течение 2–3 ч [2, 3]. Такой подход и продолжительность накипеобразования явно недостаточны для сравнения с реальными условиями. Применение методов контроля состояния границы раздела «поверхность металла — вода» позволяет изучать динамику накипеобразования и коррозионных процессов, изменение свойств и структуры накипи. Так, в методиках [4, 5] на основе электрохимического метода поляризационного сопротивления (метода  $R_p$ ), которые использовались для оценки противокоррозионного действия эффективных антинакипных реагентов, приведены коэффициенты торможения коррозии, но не учтены изменения показателей во времени, температура экспериментов 20 °С слишком низкая для накипеобразования [4], поэтому результаты нельзя сравнивать с реальными условиями.

Цель работы — разработать методику формирования накипи с высокой скоростью накипеобразования на поверхности стали, исследовать антикоррозионные свойства накипи в воде повышенной жесткости и влияние ингибиторов-антискалантов на процессы накипеобразования и коррозии.

### Методика эксперимента

Разработаны экспериментальная установка и методика осаждения накипи в условиях кипения, приближенных к условиям водогрейного котла при атмосферном давлении и температуре около 95 °С. Ранее установлено [6], что в воде со средней жесткостью 4,2–4,4 мг-экв/дм<sup>3</sup> активный процесс накипеобразования происходит после нагрева воды в замкнутом объеме 1 дм<sup>3</sup> до 90 °С и продолжается в течение 2 ч. В дальнейшем скорость накипеобразования постепенно снижается в результате уменьшения концентрации катионов Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>. За 2,5 ч кипения жесткость снизилась до 1,8 мг-экв/дм<sup>3</sup> и в последующие 6 ч почти не менялась. В работе [6] экспериментальной моделью был процесс накипеобразования на внешней поверхности цилиндрических образцов, в середине которых находился источник нагрева.

В данной работе для повышения скорости накипеобразования применили постоянную подпитку свежей водой. Используются два варианта подпитки (за 8-часовой рабочий день): пол-

ная замена воды после 5 ч кипения; постоянная подпитка водой с небольшой скоростью, которая позволила поддерживать показатель жесткости на стабильном уровне.

Экспериментальная установка включала в себя проточную стеклянную ячейку емкостью 0,65 дм<sup>3</sup>. Вода в ячейке нагревалась на кипящей водяной бане. В качестве образцов для формирования накипи использовали металлическую ленту стали 08кп (размерами 5 × 80 мм, толщиной 0,2 мм); их погружали в воду при температуре 90 °С. Формирование слоев накипи проводили при 95 ± 2 °С в течение 5–6 ч рабочего дня. Для удаления растворенного кислорода из воды до его нормативного содержания при эксплуатации водогрейных котлов (50 мкг/дм<sup>3</sup>) применяли барботирование аргоном. Перемешивание воды в емкости происходило за счет конвекции. Подпитку свежей водой выполняли с помощью капельницы со скоростью капания 0,1 дм<sup>3</sup>/ч. Кратность водообмена составляла 0,15.

В опытах использовали артезианскую воду с основными показателями: общая жесткость — 20,2 мг-экв/дм<sup>3</sup>, кальциевая жесткость — 9,4 мг-экв/дм<sup>3</sup>, щелочность — 2,3 мг/дм<sup>3</sup>, общее солесодержание — 1130 мг/дм<sup>3</sup>, сульфаты — 30,7 мг/дм<sup>3</sup>, хлориды — 140,9 мг/дм<sup>3</sup>. Карбонатный индекс ИК, характеризующий накипеобразующую способность воды, равен 21,62 (мг-экв/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>.

В качестве антискалантов использовали известные реагенты на основе органофосфонатов: оксиэтилендифосфоновая кислота (ОЭДФ), ЛВХ-1.1, а также SeaQuest (реагент на основе полифосфата). Рабочие концентрации — 20–50 мг/дм<sup>3</sup>.

Измерения скорости коррозии выполняли на шести образцах, укрепленных на крышке попарно. Антикоррозионные свойства слоев накипи определяли периодически через каждые 5 ч осаждения методом поляризационного сопротивления ( $R_p$ ) при температуре 70 °С без аргона. Для достоверности получали последовательно три значения  $R_p$ , которые усредняли. По изменению показателей  $R_p$  во времени устанавливали антикоррозионные свойства антискаланта [7]. Значение  $R_p$  и скорости коррозии измеряли прибором Р5126, учитывая коэффициент пересчета К. Зависимость между  $R_p$  и скоростью коррозии  $I_p$  обратно пропорциональна:  $I_p = K/R_p$ . Если  $R_p$  определено в Ом, а  $I_p$  необходимо выразить в мм/год, то коэффициент К должен быть в (Ом·мм)/год. В данных исследованиях принимали К = 100 (Ом·мм)/год [8], которое было установлено эксперименталь-

но на различных модельных водах с учетом площади и материала электродов (малоуглеродистая сталь).

После измерений образцы вынимали из воды, высушивали и хранили в эксикаторе до следующего эксперимента. Перед этим образцы взвешивали на аналитических весах ВЛР-200 с точностью  $\pm 10^{-5}$  г, оценивая прирост массы накипи, и микрометром измеряли его толщину. Продолжительность экспериментов составляла от 50 до 120 ч. Микроскопическое обследование поверхности образцов проводили с помощью оптического микроскопа МБС-9 и электронной SEM-спектроскопии с элементным анализом отдельных участков поверхности.

### Результаты и их обсуждение

В воде с высоким содержанием солей жесткости проведены исследования изменения массы, толщины, структуры и антикоррозионных свойств накипи, а также исследование влияния антискалантов на эти показатели. Процессы накипеобразования и коррозии приводят к формированию слоев осадков, которые могут иметь различные антикоррозионные свойства в зависимости от состава воды [9, 10]. В основном это нерастворимые карбонаты кальция, магния и продукты коррозии железа.

Анализ интегральных показателей роста удельной массы накипи от времени в процессе кипения по разработанным методикам подпитки [11] показал, что зависимости имеют линейный характер. Наклон кривых характеризует скорость накипеобразования и достигает максимального значения  $0,3 \text{ мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$  при постоянной подпитке водой. Установлено, что постоянная подпитка свежими порциями воды при накипеобразовании поддерживает пересыщение воды по концентрации катионов кальция и магния. Об этом свидетельствуют результаты анализа воды: после 5 ч кипячения с постоянной скоростью подпитки  $0,1 \text{ дм}^3/\text{ч}$  общая жесткость воды не изменилась и составила  $20,2 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3$  (щелочность уменьшилась от  $2,3$  до  $1,3 \text{ мг}/\text{дм}^3$ ). Показатель рН воды находился в пределах  $7,5-8,5$ .

На примере результатов прироста удельной массы накипи, образованной на стальных образцах в жесткой воде (рис.1), показано, что в условиях постоянной подпитки водой без антискаланта накипеобразование возрастает в 4 раза (кривая 1) по сравнению с кипением с полной заменой воды после каждых 5 ч (кривая 2). Без притока свежих порций воды наличие реагента ЛВХ-1.1 не изменяет скорости накипеобразования за первые 30 ч (кривая 3). Постоян-

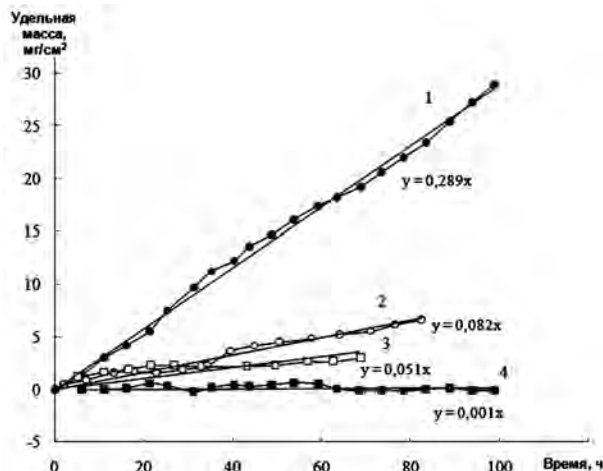


Рис.1. Графики изменения удельной массы накипи в жесткой воде без антискаланта (1, 2) и с  $50 \text{ мг}/\text{дм}^3$  ЛВХ-1.1 (3, 4) в зависимости от условий подпитки: 1, 4 — с постоянной подпиткой со скоростью  $0,1 \text{ дм}^3/\text{ч}$ ; 2, 3 — через каждые 5 ч кипения без подпитки.

ная подпитка водой с ЛВХ-1.1 снижает удельную скорость осаждения накипи от  $+0,1$  до  $-0,1 \text{ мг}/\text{см}^2$  в течение 100 ч кипения (кривая 4), то есть со временем скорость растворения кристаллов накипи превышает скорость их образования.

Таким образом, с помощью разработанной методики с постоянной подпиткой свежими порциями воды с небольшой скоростью установлено, что при обеспечении постоянного состава воды достигается максимальная скорость накипеобразования. При наличии антискаланта скорость накипеобразования существенно уменьшается.

Сравнительные характеристики удельного накипеобразования для исследованных антискалантов с концентрациями  $20-25 \text{ мг}/\text{дм}^3$  в одинаковых условиях подпитки приведены на

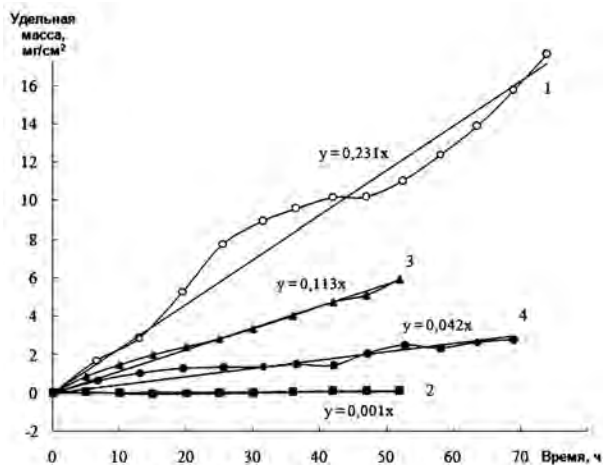


Рис.2. Прирост удельной массы накипи в жесткой воде с антискалантами,  $\text{мг}/\text{дм}^3$ : 1 — без реагентов; 2 — с  $20 \text{ мг}/\text{дм}^3$  ОЭДФ; 3 — с  $20 \text{ мг}/\text{дм}^3$  SeaQuest; 4 — с  $25 \text{ мг}/\text{дм}^3$  ЛВХ-1.1.

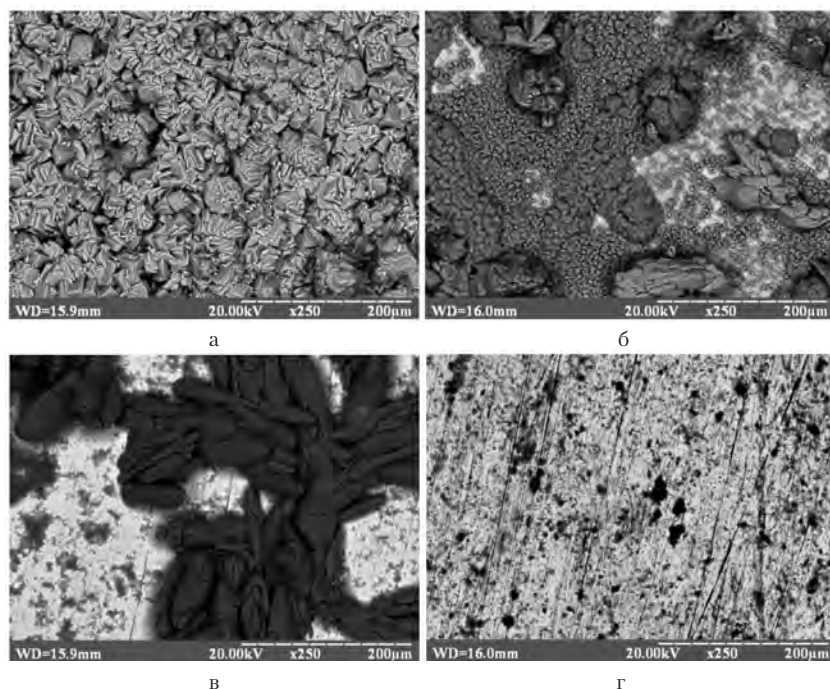


Рис.3. Фото поверхностных слоев (SEM микроскопия, увеличение  $\times 250$ ): а — без реагентов; б — с  $50 \text{ мг/дм}^3$  ЛВХ 1.1; в — с  $20 \text{ мг/дм}^3$  SeaQuest; г — с  $20 \text{ мг/дм}^3$  ОЭДФ.

рис.2. Из графиков видно, что лучшие антинакипные свойства в воде повышенной жесткости показала ОЭДФ (кривая 2). Комбинированный реагент ЛВХ-1.1 уменьшает скорость накипеобразования почти в 5 раз, реагент SeaQuest на основе полифосфата (кривая 3) — в 2 раза.

По результатам микроскопических исследований поверхности установлено, что структура и состав накипи при использовании антинакипных неоднородны по поверхностному распределению.

Накипь, образованная без антинакипных при 5-часовой замене воды и в условиях постоянной подпитки, имела одинаковую структуру, однако ее плотность была разной:  $1,67 \text{ г/см}^3$  (без протока) и  $2,31 \text{ г/см}^3$  (с подпиткой). Размеры кристаллов кальцита в агломератах накипи за 120 ч достигали 40–50 мкм и имели тригонально-пирамидальную структуру (рис.3, а). Структура осадков при использовании антинакипных существенно зависела от их природы и концентрации. Так, при максимальной концентрации ЛВХ-1.1  $50 \text{ мг/дм}^3$  за 100 ч кипения (рис.3, б) на значительной части поверхности образовывались кристаллы кальцита звездчатой формы. Поверхность образцов имела свободные от накипи участки и разветвленные участки с мелкозернистой структурой, содержащие преимущественно фосфат и карбонат. Плотность осадка составляла  $0,825 \text{ г/см}^3$ .

В присутствии полифосфатного реагента SeaQuest сформировались разветвленные по поверхности кристаллы кальцита игольчатой формы (рис.3, в), средняя плотность осадка —  $0,605 \text{ г/см}^3$ . На поверхности образцов при кипении с ОЭДФ образовалась радужная пленка с микроразростами кристаллов карбоната (рис.3, г).

Для рассмотренных ингибиторов-антинакипных установлены зависимости изменения скорости коррозии в процессе наращивания накипи (рис.4). Значения показателей  $I_p$  сначала быстро снижаются. Так, без антинакипной скорости коррозии стали после 20 ч кипения снизилась до  $0,01 \text{ мм/год}$  (кривая 1). Однако это сопровождается ростом толщины накипи, которая ухудшает теплообмен. Наличие антинакипных несколько

увеличивает скорость коррозии, показатели  $I_p$  колеблются во времени, поскольку с добавкой свежих порций воды с антинакипными кристаллы накипи частично растворяются, а в дальнейшем процессе кипения снова могут нарастать. Однако в целом для всех исследованных антинакипных скорость коррозии стабилизируется на уровне  $0,02\text{--}0,03 \text{ мм/год}$ , что не превышает нормативного значения  $0,05 \text{ мм/год}$  [1]. Наиболее эффективной в данных условиях оказалась ОЭДФ и по антинакипным, и по противо-

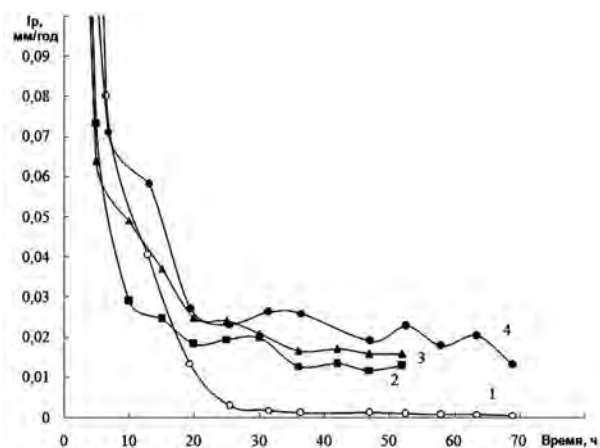


Рис.4. Изменение скорости коррозии стали во времени в жесткой воде при  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  с антинакипными,  $\text{мг/дм}^3$ : 1 — без реагентов; 2 — с  $20 \text{ мг/дм}^3$  ОЭДФ; 3 — с  $20 \text{ мг/дм}^3$  SeaQuest; 4 — с  $25 \text{ мг/дм}^3$  ЛВХ-1.1.

коррозионным свойствам. Анतिकоррозионные свойства накипи, осажденной в воде с антискалантами, относительно накипи без антискаланта, несколько снижаются за счет меньшей толщины и более пористой структуры.

### Выводы

Предложена методика формирования накипи для определения антикоррозионных свойств и оценки эффективности действия ингибиторов-антискаланта, которая отличается от известных тем, что обеспечивает постоянную подпитку свежей водой, получение высокой скорости образования накипи, контроль скорости накипеобразования и коррозии во времени.

Оценены антикоррозионные свойства ингибиторов-антискаланта ОЭДФ, ЛВХ-1.1 и SeaQuest и установлено, что за 50 ч эксперимента скорость коррозии стали снижается до 0,02–0,03 мм/год, что не превышает нормативный показатель 0,05 мм/год.

Установлено, что лучшие антикоррозионные свойства имеет ингибитор-антискаланта ОЭДФ концентрацией 20 мг/дм<sup>3</sup>, при которой на поверхности образцов отсутствует слой накипи.

Полученные функциональные зависимости нарастания удельной массы накипи и скорости коррозии для исследованных ингибиторов-антискаланта в жесткой воде позволяют прогнозировать антинакипное и противокоррозионное действие реагентов в течение отопительного сезона при работе котельных установок малой мощности, работающих без водоподготовки.

### Список литературы

1. ДНАОП 0.00.-1.26-96 Державний нормативний акт про охорону праці. Правила будови і безпечної експлуатації парових котлів з тиском пари не більше 0,07 МПа (0,7 кгс/см<sup>2</sup>), водогрійних котлів і водопідігрівачів з температурою нагріву води не вище 115 °С. — Київ : Держнаглядохоронпраці, 1996. — 128 с.
2. Балабан-Ирменин Ю.В., Суслов П.С. Особенности применения антинакипинов в системах теплоснабжения // Материалы IV конференции «Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии и накипеобразования», Москва, 25–26 окт. 2011 г. — [Электронный ресурс]: — <http://www.traversers.su/upload/iblock/b14/b14caa976c3907580eb8aa6a5b179ddf.pdf>
3. Рудакова Г.Я., Самсонова Н.К., Ларченко В.Е. Некоторые аспекты и практика применения комплексов для обработки воды // Энергосбережение и водоподготовка. — 2007. — № 2. — С. 32–33.
4. Дрикер Б.Н., Сикорский И.П., Цирульников Н.В. Изучение возможности использования цинковых комплексонов ИОМС для ингибирования коррозии конструкционных сталей // Энергосбережение и водоподготовка. — 2006. — № 2. — С. 7–9.
5. Нестеренко С.В. Технология обработки подпиточной воды для предотвращения процессов коррозии и накипеобразования на теплообменных поверхностях // Коммунальное хозяйство городов. — 2008. — Вып. 84. — С. 190–194.
6. Пагер С., Герасименко Ю. Інгібіторна дія накипу, що формується в ультразвуковому полі на теплообмінній поверхні // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів. — 2012. — Т. 1, № 9. — С. 272–278.
7. ДСТУ 3895–99 (ГОСТ 9.514-99). Інгібітори корозії металів для водних систем. Електрохімічний метод визначення захисної здатності. — Введ. 01.01.2001.
8. Герасименко Ю.С., Нечай М.В., Белоусова Н.А., Шлокова Е.А. Оценка точности измерения скорости коррозии методом поляризационного сопротивления // Физ.-хим. механика материалов. — 1995. — Т. 31, № 3. — С. 22–27.
9. Энциклопедия теплоснабжения. Отложения и абразивный износ. — [Электронный ресурс]: <http://www.rosteplo.ru/w/>
10. Потапов С.А. Комплексный водно-химический режим систем теплоснабжения. Проблемы и решения // Материалы конференции «Современные технологии водоподготовки и защиты оборудования от коррозии», Москва, июнь 2003 г. — М. : ИРЕА, 2003. — С. 20–28.
11. Герасименко Ю., Белоусова Н., Редько Р. Накип, його протикорозійні властивості та регулювання утворення // XIII Міжнародна конференція «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» «Корозія-2016», Львів, Україна, 14–15 черв. 2016 р. — Львів, 2016.

Поступила в редакцию 19.05.16

**Білоусова Н.А.**, канд. техн. наук,  
**Герасименко Ю.С.**, докт. техн. наук., проф., **Редько Р.М.**, **Вічкань І.Ю.**  
**Національний технічний університет України «КПІ», Київ**  
пр. Перемоги, 37, корп. 4, 03056 Київ, Україна, e-mail: bilousova@xtf.kpi.ua

## Моделювання росту та оцінка протикорозійних властивостей накипу

Вивчено особливості накипоутворення у режимі водогрійного котла у воді з високою жорсткістю. Визначено ефективність антинакипної та протикорозійної дії антискалантів. Розроблено експериментальну установку та методику визначення питомої швидкості накипоутворення та швидкості корозії сталі (методом поляризаційного опору) в умовах регульованого підживлення водою, яка забезпечує сталість концентрації солей жорсткості та максимальну швидкість осадження накипу, а також сталість концентрації антискаланту. Функціональні залежності наростання питомої маси накипу в часі для досліджених реагентів-антискалантів ОЕДФ, ЛВХ-1.1 (на основі органофосфонатів) та SeaQuest (на основі поліфосфату) мають лінійний характер. Структура та антикорозійні властивості утворених шарів накипу суттєво залежать не тільки від природи та концентрації антискаланта, але й від швидкості підживлення свіжою водою. При порівняльних випробуваннях реагентів з однаковими концентраціями встановлено, що найкращі інгібіторні та антинакипні властивості в воді з жорсткістю 20,2 мг-екв/дм<sup>3</sup> має ОЕДФ. Розроблена методика та отримані залежності дають змогу прогнозувати антинакипну та протикорозійну дію реагентів для котельних установок малої потужності, які працюють без водопідготовки протягом опаловального сезону. *Бібл. 11, рис. 4.*

**Ключові слова:** накип, швидкість накипоутворення, антискалант, швидкість корозії.

**Bilousova N.A.**, Candidate of Technical Sciences,  
**Herasymenko Yu.S.**, Doctor of Technical Sciences, Professor,  
**Red'ko R.M.**, **Vichkan I.Yu.**

**National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev**  
37, Peremohy Ave, build. 4, 03056 Kiev, Ukraine, e-mail: bilousova@xtf.kpi.ua

## Modeling of Growth and Evaluation Anticorrosive Properties of Scale

The work concerns investigation of scale formation in the mode of boiler water with high hardness and definition of efficiency anticorrosive antiscalant action. The experimental setup and method of determining the specific rate of scale formation and steel corrosion rates under controlled water supply, which provides a constant concentration of hardness salts, and a maximum rate of scale deposition, as well as the constancy of the concentration of antiscalant were developed. The functional dependencies of the specific scale mass gains in time for the investigated antiscalant HEDP, LWCh-1.1 (based on organophosphonates) and SeaQuest (based on polyphosphate) are linear. The structure and anticorrosive properties of the formed scale depend not only on the nature and concentration of antiscalant, but also from the fresh water replenishment rate. In comparative tests with the same concentrations of reactants it found that the best inhibitory and anti-scale properties have HEDP in the water with hardness of 20.2 mM/dm<sup>3</sup>. The developed technique and produced dependencies allow predicting antiscale and anticorrosive action of reagents for boiler of small power plants that operate without water treatment during the heating season. *Bibl. 11, Fig. 4.*

**Key words:** scale, scale growth rate, antiscalant, corrosion rate.

## References

1. DNAOP 0.00.-1.26-96, [Terms of design and safe operation of steam boilers with steam pressure not exceeding 0.07 MPa (0.7 kgf/cm<sup>2</sup>), boilers and water heaters heat water with a temperature no higher than 115 °C], Kiev : State regulation of labor protection, 1996, 128 p. (Ukr.)
2. Balaban-Irmenin Ju.V., Suslov P.S. [Features of antiscaling in heating systems], *Proceedings of the IV Conference «Modern water treatment technology and corrosion protection of equipment and scale formation»*. — [Electron resource]. — <http://www.travers.su/upload/iblock/b14/b14caa976c3907580eb8aa6a5b179ddf.pdf> (Rus.)
3. Rudakova G.Ja., Samsonova N.K., Larchenko V.E. [Some aspects of the practice and use of complexons for water treatment], *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka*, 2007, (2), pp. 32–33. (Rus.)
4. Driker B.N., Sikorskiy I.P., Cirul'nikova N.V. [Explore the use of zinc complexonates IOMC for the inhibition of structural steels corrosion], *Jenergosberezhenie i vodopodgotovka*, 2006 (2), pp. 7–9. (Rus.)
5. Nesterenko S.V. [Feed water treatment technology to prevent corrosion and scaling processes on heat transfer surfaces], *Kommunal'noe hozjajstvo gorodov*, 2008, Iss. 84, pp.190–194. (Rus.)
6. Pager S., Gerasimenko Ju. [Inhibiting effect of scale formed in the ultrasonic field on heat transfer surfaces], *Fiziko-himichna mehanika materialiv. Problemi korozii i protikorozijnogo zahistu materialiv*, L'viv, 2012, 1 (9), pp. 272–278. (Ukr.)
7. DSTU 3895–99. (GOST 9.514-99). [Corrosion inhibitors of metals for water systems. Electrochemical method for determining the protective ability]. (Ukr.)
8. Gerasimenko Ju.S., Nechaj M.V., Belousova N.A., Shlokova E.A. [Estimation of the accuracy of measurements of corrosion rate by the method of polarization resistance], *Fiz.-him. mehanika materialov*, 1996, 31 (3), pp. 302–306. (Rus.)
9. [Encyclopedia of heating. Deposits and abrasion]. — [Electron resource]. — <http://www.rosteplo.ru/w/> (Rus.)
10. Potapov S.A. [Complexions water-chemical mode of heat supply system. Problems and solutions], *Materials of the conference «Modern technologies of water treatment and protect equipment from corrosion»*, Moscow, June 2003, IREA, pp. 20–28. (Rus.)
11. Gerasimenko Ju., Bilousova N., Red'ko R. [Scale, its anticorrosive properties and regulation], *13th International Conference «Corrosion 2016»*, Lvov, Ukraine, 14–15 June 2016, Lvov, 2016. (Ukr.)

Received May 19, 2016

УДК 662.743

**Скляренко Е.В., Билека Б.Д., докт. техн. наук****Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев**  
ул. Желябова, 2а, 03057 Киев, Украина, e-mail: bilbo1@i.com.ua

## Исследование процесса термохимической конверсии растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод на установке шнекового типа

Представлены результаты исследования процесса термохимической конверсии мелкофракционной растительной биомассы в горючий газ и биоуглерод на установке шнекового типа. В процессе применяется скоростной пиролиз биомассы с комбинированным обогревом и фильтрацией высокотемпературных продуктов неполного сгорания углеводородного газа через уплотненный подвижный слой. Исследовано распределение температур продуктов конверсии и их выход по длине реактора в зависимости от температуры процесса, времени пребывания, параметров теплоносителя и исходной растительной биомассы. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований основных режимных параметров процесса. *Библ. 11, рис. 4.*

**Ключевые слова:** биомасса, термохимическая конверсия, пиролиз, фильтрация газового теплоносителя, шнековый реактор.