

Аналитическое приборостроение и технологии  
Analytical instrument engineering and technology

УДК 620.193  
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Современные подходы  
к снижению накипеобразования  
в теплообменном оборудовании

В.А. Головин<sup>1</sup>,  
С.А. Тюрина<sup>2, @</sup>,  
В.А. Щелков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук,  
Москва, 119071 Россия

<sup>2</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: mgupi.tyurina@mail.ru

**Резюме**

**Цели.** Процессы накипеобразования и коррозии являются серьезной проблемой для оборудования теплоэнергетического комплекса. Их активное развитие может полностью заблокировать работу системы, ускорить коррозию и привести к закупориванию, местным перегревам, прогарам и разрывам котлов и труб. Это, в свою очередь, может привести к катастрофическим последствиям и масштабным экологическим проблемам. Важной задачей является защита поверхностей от накипеобразования и коррозии. Перспективными методами предотвращения развития нежелательных последствий являются модификация состава полимерных покрытий за счет введения микрокапсулированных ингибиторов коррозии, а также поверхностная модификация, а именно, гидрофобизация поверхности полимерного покрытия. Целью работы являлся анализ методов снижения накипеобразования и скорости коррозионных процессов, а также исследование эффективности модификации лакокрасочных покрытий (ЛКП) посредством введения в их состав микрокапсулированных ингибиторов коррозии.

**Методы.** В работе использовались методы ускоренных коррозионных испытаний.

**Результаты.** Проанализированы существующие методы снижения накипеобразования и скорости коррозии на поверхностях теплоэнергетического оборудования. Исследована эффективность модификации защитных полимерных материалов за счет введения в их состав микрокапсул, содержащих активную фосфонатную добавку, а также их поверхностное модифицирование.

**Выводы.** Установлено, что модификация ЛКП за счет применения микрокапсулированных активных добавок позволяет существенно снизить скорость как накипеобразования, так и развития коррозионных процессов. Внедрение современных методов модификации полимерных покрытий позволяет получать составы нового поколения, эффективным образом препятствующие накипеобразованию, развитию коррозионных процессов, и дает возможность сохранять высокую производительность теплообменного оборудования.

**Ключевые слова:** накипеобразование, коррозия, ингибирование, полимерные покрытия

• Поступила: 10.03.2022 • Доработана: 25.03.2022 • Принята к опубликованию: 28.04.2022

**Для цитирования:** Головин В.А., Тюрина С.А., Щелков В.А. Современные подходы к снижению накипеобразования в теплообменном оборудовании. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):93–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Contemporary approaches to reducing scale formation in heat-exchange equipment

Vladimir A. Golovin<sup>1</sup>,  
Svetlana A. Tyurina<sup>2, @</sup>,  
Vyacheslav A. Shchelkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119071 Russia

<sup>2</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

@ Corresponding author, e-mail: mgupi.tyurina@mail.ru

### Abstract

**Objectives.** Scale formation and corrosion are serious problems for heat and power equipment. These processes, when intense, can completely block the operation of the system, accelerating corrosion and leading to clogging, local overheating, and burnouts and ruptures of boilers and pipes, which in turn can lead to major environmental problems. Therefore, protecting surfaces from scale formation and corrosion is an important task. Promising methods for preventing the development of undesirable consequences include changing the composition of polymer coatings, e.g., by introducing microencapsulated corrosion inhibitors, as well as surface modification approaches, such as hydrophobization of the polymer coating surface. The purpose of the present work is to analyze methods for reducing scale formation and the rate of corrosion processes, as well as to study the efficiency of modification of paints and coatings by introducing microencapsulated corrosion inhibitors.

**Methods.** The study was based on the use of accelerated corrosion tests.

**Results.** Existing methods for reducing scale formation and corrosion rate on the surfaces of heat and power equipment were analyzed. The efficiency of modifying protective polymer materials by introducing microcapsules containing an active phosphonate additive was compared with approaches involving the surface modification of such protective materials.

**Conclusions.** It was determined that the modification of paints and coatings by introducing microencapsulated active additives can significantly reduce the rates of both scale formation and corrosion. By implementing state-of-the-art methods for modifying polymer coatings, a new generation of agents for efficiently preventing scale formation and corrosion processes can be developed for maintaining the high performance of heat-exchange equipment.

**Keywords:** scale formation, corrosion, inhibition, polymer coatings

• Submitted: 10.03.2022 • Revised: 25.03.2022 • Accepted: 28.04.2022

**For citation:** Golovin V.A., Tyurina S.A., Shchelkov V.A. Contemporary approaches to reducing scale formation in heat-exchange equipment. *Russ. Technol. J.* 2022;10(3):93–102. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-93-102>

**Financial disclosure:** The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Образование отложений на внутренней стороне теплопередающих поверхностей и их коррозия представляют собой серьезную проблему для теплоэнергетического производства. Типичной ситуацией является образование слоя отложений, включающих продукты коррозии металлов тракта водоохлаждения (циркводоводов, водяных камер и теплообменных трубок) и накипных отложений из воды (как находящихся в виде взвесей, так и растворенных солей). На начальной стадии происходит рост потребления топлива, снижение надежности, эффективности и работоспособности теплообменного оборудования и трубопроводов. В запущенной ситуации образование отложений может полностью заблокировать работу системы, ускорить коррозию и привести к закупориванию, локальным перегревам, прогарам и разрывам котлов и труб. Это в конечном итоге может привести к катастрофическим последствиям и экологическим проблемам [1, 2].

## ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ НАКИПЕОБРАЗОВАНИЯ И СКОРОСТИ КОРРОЗИИ

В теплообменном аппарате, например, в главном конденсаторе пара турбины атомной электростанции (АЭС), число трубок может быть очень большим и достигать 100 000 шт. и более. Ремонт и восстановление подобных аппаратов представляет собой сложную техническую проблему. На сегодняшний день от 2 до 5% теплообменных трубок в конденсаторах пара непригодны к эксплуатации из-за коррозионного и эрозионного разрушения. В ходе проведенного на нескольких теплоэлектростанциях (ТЭС) и АЭС анализа коррозионного состояния [3] установлено, что еще на 30% трубок в ближайшее время велика вероятность образования сквозных коррозионных язв. Эти трубы придется заглушить, что приведет к недопустимому снижению коэффициента полезного действия (КПД) теплообменного оборудования.

Успешное решение проблемы накипеобразования обеспечит чистоту поверхностей систем водопользования, что позволит экономнее расходовать топливные и энергетические ресурсы, а также предотвратить возможные катастрофические последствия, связанные с ущербом для жизни и здоровья людей [4].

Для изготовления теплообменного оборудования энергетических систем в настоящее время широко используются медно-никелевые сплавы (МНЖ 5-1, ГОСТ 492-2006<sup>1</sup>), латунь Л68 (ГОСТ 15527-2004<sup>2</sup>), нержавеющая сталь, титановые сплавы.

Условия развития коррозионных процессов в теплообменных аппаратах электростанций существенно различаются. Это определяется составом и температурой охлаждающей воды. На АЭС, как правило, используется природная пресная вода из прудов охладителей, рек или морская вода, а на ТЭС в основном используется обратное водоснабжение с охлаждением в градирнях, что позволяет использовать специальные, например, антинакипные добавки. Содержание может существенно меняться в зависимости от сезона и условий подпитки прудов-охладителей и при этом в охлаждающей воде закрытых водоемов может составлять 100–3000 мг/л.

Исходя из опыта ремонта и обследования теплообменных трубок конденсаторов электростанций, можно сделать вывод, что основной причиной нарушения герметичности является именно развитие локальной коррозии. Отметим, что доля локальных коррозионных поражений составляет не менее 70% от общего объема дефектов. Несмотря на различие условий эксплуатации и использованных материалов теплообменников, коррозионные поражения являются, как правило, типовыми:

- разрушения трубок и трубных досок в зоне вальцовки вследствие коррозионно-эрзационного износа и биметаллической коррозии;
- развитие единичных коррозионных язв или кластеров язв, расположенных по всей длине внутренней поверхности трубок (со стороны охлаждающей жидкости). При этом язвы могут быть

<sup>1</sup> ГОСТ 492-2006. Межгосударственный стандарт. Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением. Марки. М.: Стандартинформ; 2011 [GOST 492-2006. Interstate Standard. Nickel, nickel and copper-nickel alloys treated by pressure. Grades. Moscow: Standartinform; 2011 (in Russ.)]

<sup>2</sup> ГОСТ 15527-2004. Межгосударственный стандарт. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки. М.: ИПК Издательство стандартов; 2004 [GOST 15527-2004. Interstate Standard. Pressure treated copper zinc alloys (brasses). Grades. Moscow: IPK Izd. Standartov; 2004 (in Russ.)]

очень различны по размерам и глубине, вплоть до сквозных. Данный вид коррозионных поражений для трубок из медно-никелевых сплавов, латуней и нержавеющих сталей отмечен как в пресной, так и морской воде [5];

К основным видам коррозионных повреждений теплообменных труб можно отнести следующие:

- коррозионная язва с дальнейшим развитием в виде трещины по механизму коррозионного растрескивания под напряжением;
- скопления язв (питтингов), имеющих незначительные размеры и располагающиеся преимущественно в нижней части теплообменных труб;
- трещинообразование по межкристаллитному, транскристаллитному и смешанному характеру;
- коррозия пятнами большой площади с незначительной глубиной.

В первую очередь, именно хлориды и сульфаты, являющиеся коррозионно-активными примесями в кипящей воде парогенераторов, приводят к коррозионному растрескиванию металла теплообменных труб [6].

Необходимо отметить, что при циркуляции в системе часть воды испаряется в градирнях, с поверхности открытых прудов и очистных сооружений, в результате чего в ней увеличивается концентрация солей и накипеобразующих соединений. Значительное количество коррозионно-активных соединений, механические взвеси, а также микробиогруппы накапливаются в воде при многократном использовании. Все это вызывает интенсивное отложение накипи, приводящее к местному перегреву, коррозию конденсационно-холодильного оборудования, ухудшает теплопередачу, приводит к ослаблению механической прочности металла труб змеевиков и корпуса аппаратов.

Для снижения накипеобразования в водоопреснительных установках используется ряд методов, в частности:

- подкисление воды и применение антинакипинов;
- добавление зернистых присадок (затравок);
- контактная стабилизация;
- применение специальных конструкций испарителей с подвижными и самоочищающимися поверхностями теплообмена;
- магнитная, ультразвуковая и радиационная обработка питательной воды.

Выбор того или иного метода очистки внутренних поверхностей также определяется во многом видом отложений. Эти методы можно разделить на химические, механические и физические.

Химические способы удаления накипи при возможном одновременном ингибиции в различных технологических потоках осуществляются, как правило, посредством смешения химического

реагента с технологическим потоком. При этом обеспечивается обработка труднодоступных поверхностей.

Методы химической очистки, включающие в себя использование комплексообразователей и ингибиторов коррозии, обладают рядом существенных преимуществ перед перечисленными выше способами очистки и активно применяются. В источниках [7–9] подробно описано, как при использовании комплексообразователей нерастворимые отложения полностью или частично превращаются в соли или соединения, хорошо растворимые в воде.

Способы, при которых отложения переводят в вещество, которое не растворяется в воде, но способно растворяться в других химических реагентах, описаны в [10–12].

Согласно [13], в качестве водорастворимого ингибитора, позволяющего повысить эффективность противокоррозионной защиты и снизить интенсивность отложения солей, а также обеспечить защиту теплообменного оборудования из черных металлов от коррозионно-механического разрушения, рекомендуется применять композицию на основе триполифосфата натрия и азотсодержащего соединения (борат этианоламина). Установлено, что сочетание бората этианоламина и триполифосфата натрия (ТПФН) в определенном соотношении (ТПФН 10.0–20.0 мас. % / борат этианоламина 80.0–90.0 мас. %) приводит к возникновению синергетического эффекта усиления моющих, защитных и водовытесняющих свойств ингибитора.

Способ очистки, режимы очистки и применяемые реагенты выбираются на основе химического анализа отложений [14, 15]. Гидрофобизация является одним из основных методов управления поверхностными свойствами материалов [16–19].

Водоотталкивающая способность покрытий имеет большое значение во многих областях, таких как антикоррозионная защита, самоочищение, защита от обрастания, отделение масла от воды, антиобледенение, преобразование энергии, высвобождение лекарств, снижение сопротивления текучих жидкостей, антибактериальная адгезия, производство противообрастающих красок для лодок, ветровых стекол, архитектурных покрытий и т.д. [20, 21].

Кроме непосредственно гидрофобных выделяют также особую группу супергидрофобных покрытий. Бионические супергидрофобные (англ. superhydrophobic coating, SHPC) поверхности привлекают внимание благодаря своим характеристикам и возможностям применения. В природе супергидрофобными свойствами обладают поверхности некоторых растений и животных. Это листья лотоса и риса, шкура акулы, лапка геккона, крыло бабочки, перья пингвинов и т.д. [22, 23].

Уменьшенное межфазное натяжение или повышенная гидроизоляция металлов, обеспечиваемые супергидрофобными поверхностями, являются действенным средством решения задачи снижения скорости коррозии металлов. При этом следует отметить, что сохранение слоя воздуха в качестве барьера между супергидрофобной металлической подложкой и жидкостью ограничивает площадь контакта между жидкостями и поверхностью [24, 25], что значительно снизит теплопередачу. Гидрофобные поверхности могут быть получены путем создания специфической иерархической шероховатости поверхности либо путем нанесения на подложку материалов с низкой поверхностной энергией. Эти подходы могут быть использованы как по отдельности, так и вместе [26, 27].

Супергидрофобные покрытия, получаемые с использованием физической адсорбции, не обладают долговечностью из-за слабого физического взаимодействия [28]. Высокие значения энергии взаимодействия с материалом характерны для покрытий, получаемых с химической адсорбцией гидрофобных агентов.

Также следует отметить, что кривизна поверхности является одним из управляющих факторов. Установлено, что угол смачивания на цилиндрических и сферических поверхностях больше, чем на гладкой поверхности, а вот на вогнутых поверхностях (нанопоры, сферические полости) угол смачивания имеет меньшее значение, чем на плоской поверхности, имеющей тот же химический состав [29].

В Массачусетском технологическом институте (США) разработан способ покрытия поверхностей конденсирующего устройства слоем графена толщиной в один атом. Испытания в среде водяного пара при 100 °C показали, что данное покрытие обеспечило переход от пленочной к капельной конденсации и повысило теплопередачу в 4 раза по сравнению с металлическими поверхностями, где конденсат формировал слой воды.

Недолговечность большинства искусственных супергидрофобных поверхностей не дает возможности их широкого использования в промышленности. Эти поверхности склонны утрачивать супергидрофобность под действием агрессивной среды или механического воздействия. Поэтому для расширения области применения супергидрофобных поверхностей решение этих проблем представляется крайне важным.

Говоря о создании противонакипных покрытий, следует отметить сложность обеспечения следующих свойств: термодинамически устойчивого гетерогенного режима смачивания поверхности, химической стойкости, высокой адгезии к подложке, устойчивости к истиранию. Именно эти свойства обеспечивают долговечность покрытия в процессе эксплуатации.

Несмотря на отмеченные недостатки и сложности получения супергидрофобных поверхностей, использование отработанных методов и супергидрофобных добавок может быть крайне полезным для защиты теплообменного оборудования от накипеобразования и коррозии.

Эффективным методом защиты и восстановления трубок теплообменного оборудования является нанесение защитного полимерного покрытия на внутреннюю поверхность теплообменной трубы. В настоящее время этот метод активно используется. Это связано как с успешной разработкой полимерных материалов с высоким коэффициентом теплопроводности, так и с развитием технологии окраски, позволяющей за один проход наносить сверхтонкое покрытие на неповрежденную поверхность трубы, одновременно устанавливая надежные полимерные пломбы в местах образования как сквозных, так и несквозных коррозионных язв [30].

Переход от металлических теплопередающих поверхностей к металлополимерным происходит путем нанесения композиционного полимерного покрытия на внутреннюю поверхность металлической трубы. Эффективность этого перехода определяется:

- существенным повышением долговечности трубной системы с покрытием за счет высокой химической и абразивной стойкости полимерных покрытий;
- блокированием центров коррозии, которые могут являться центрами накипеобразования;
- существенно более низким значением адгезии накипных отложений к поверхности полимера, нежели к металлу самой трубы. Это обуславливается большей гладкостью поверхности покрытия (особенно в сравнении с поверхностью трубы с коррозионными язвами), а также меньшей полярностью инертной поверхности полимера (по сравнению с поверхностью окисленного металла) и, следовательно, отсутствием условий для химической привязки накипных отложений;
- возможностью направленной модификации поверхностного слоя для придания поверхности дополнительных антинакипных свойств.

К полимерным материалам для покрытия теплообменных поверхностей конденсаторов турбин предъявляются следующие требования:

- рабочая температура при нормальной эксплуатации от 0 °C до +40 °C с возможностью кратковременного прогрева до +240 °C;
- толщина покрытия не более 50–60 мкм, исходя из требований минимального воздействия на теплопередачу при коэффициенте теплопроводности материала покрытия в диапазоне 1–2 Вт/(м · К);
- коэффициент линейного термического расширения (КЛТР) должен быть близким к КЛТР металла;

- материал должен обладать адгезионной прочностью к стали от 50–60 МПа (метод нормального отрыва) и сохранять ее в условиях эксплуатации;
- проявлять стойкость к абразивному износу с концентрацией абразива 3–5% в потоке воды, чтобы противостоять истиранию дисперсными частицами;
- покрытие должно быть ровным, глянцевым, без подтеков и наплывов;
- материал должен быть технологичным и недорогостоящим.

Большинство выпускаемых полимерных материалов обладают отдельными необходимыми характеристиками. Часть полимеров имеют ограничение по температуре эксплуатации, другие полимеры имеют высокую вязкость, обуславливающую невозможность нанесения полимерного материала тонким слоем на металлическую подложку. Если покрытие имеет чрезмерную толщину, то это неизбежно приводит к росту термического сопротивления. Полимерные материалы существенно отличаются также термической и химической стойкостью, уровнем адгезии к различным металлам.

Несмотря на все сложности, в настоящее время для защиты поверхности теплообменного оборудования используется широкий ассортимент полимерных материалов. Однако важно отметить, что большинство из них нуждается в модификации, которая может заключаться в гидрофобизации поверхности, а также в повышении теплопроводности и уровня адгезионной прочности, улучшении термической и химической стойкости, стойкости к истиранию и т.д.

Научным коллективом лаборатории защиты металлов и сплавов от коррозии в сильно агрессивных средах Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина получен успешный опыт снижения накипеобразования посредством введения модифицирующих (антинакипных) добавок как в состав полимерного противокоррозионного покрытия в форме микрокапсул, так и на его поверхность.

Микрокапсулы имеют форму сферы с фосфонатной модифицирующей добавкой внутри. Стенки выполнены из эпоксидного полимерного материала. В процессе проникновения среды в стенки микрокапсул происходит постепенное вымывание модифицирующих добавок. Микрокапсулы значительно повышают как коррозионную стойкость, так и способствуют пролонгированному антинакипному действию модифицирующих добавок [31–34].

Результаты испытаний показали, что адгезия слоя накипи к модифицированным полимерным покрытиям сохраняется очень низкой. Данный факт приводит к самопроизвольному отслоению и растрескиванию накипи при незначительных внешних

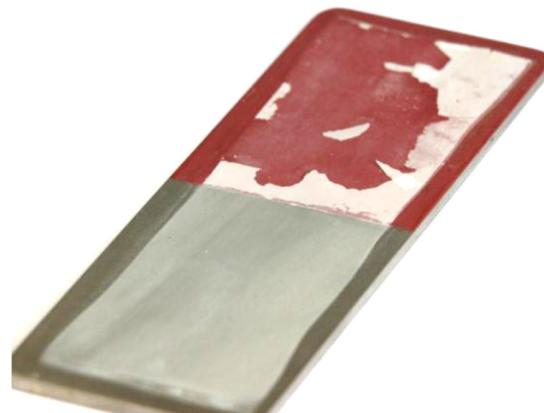


Рис. 1. Фотография образца после испытаний на накипеобразование. Верхняя часть образца защищена полимерным покрытием

воздействиях или изменениях технологических параметров (рис. 1).

Как показал опыт промышленных испытаний, указанный тип покрытий обеспечивает минимальные отложения на трубных досках и входных участках теплообменных трубок конденсаторов пара ТЭЦ и АЭС при длительной эксплуатации.

Важно отметить, что модифицированные покрытия обладают высокой абразивостойкостью (концентрация песка в пульпе 5%, скорость потока 3 м/с), что позволяет использовать их для работы с системами шарикоочистки. Скорость износа составила менее 0.5 мкм за 1000 часов. Это позволяет обеспечить срок службы покрытия толщиной 50 мкм более 10 лет.

На Балаковской АЭС при нанесении покрытий предотвращено образование накипи и отложений в теплообменных трубках в течение 4 лет. Важно отметить, что в покрытии не наблюдается никаких внешних повреждений, отслоений и трещин. При этом цвет и блеск поверхности покрытия сохранен, и антинакипные свойства покрытия позволили перейти к периодической работе системы шарикоочистки [35].

Положительные результаты получены при нанесении модифицированных покрытий сетевого водонагревателя на Хабаровской ТЭЦ. До нанесения покрытий на трубных досках и внутренней поверхности трубок горизонтального водонагревателя сетевой воды (подогреватель сетевой горизонтальный, ПСГ) фиксировалось интенсивное образование слоя отложений продуктов коррозии питающего водовода. После нанесения полимерного покрытия на участки трубных досок и внутреннюю поверхность пучков теплообменных трубок защищенные теплообменные поверхности спустя 7 месяцев эксплуатации при температуре до 140 °C сохранили исходное состояние без видимых отложений (рис. 2).



**Рис. 2.** Внешний вид защитного покрытия участка трубной доски и пучка окрашенных трубок ПСГ Хабаровской ТЭЦ спустя 7 месяцев эксплуатации

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение современных методов модифицирования полимерных покрытий за счет применения фосфонатных микрокапсулированных активных добавок позволяет получать составы нового поколения, эффективно препятствующие накипеобразованию, развитию коррозионных процессов. При

этом обеспечивается возможность сохранения высокой производительности теплообменного оборудования. Помимо высокой функциональности защитных покрытий, следует отметить доступность сырья и экономическую целесообразность внедрения представленного подхода с целью снижения накипеобразования в теплообменном оборудовании. Минимальный срок безотказной службы в разработанных защитных полимерных покрытиях оценивается в 10 лет.

### Вклад авторов

**В.А. Головин** – концептуализация, разработка методологии, проведение исследования, сбор данных, научное редактирование.

**С.А. Тюрина** – сбор данных, проведение исследования, написание и редактирование текста статьи.

**В.А. Щелков** – сбор данных, проведение исследования.

### Authors' contributions

**V.A. Golovin** – concept and methodology development, conducting research, collecting data, and scientific editing.

**S.A. Tyurina** – collecting data, conducting research, writing and editing the text of the article.

**V.A. Shchelkov** – methodology development, collecting data, and conducting research.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saremi M., Dehghanian C., Sabet M. The effect of molybdate concentration and hydrodynamic effect on mild steel corrosion inhibition in simulated cooling water. *Corros. Sci.* 2006;48(6):1404–1412. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.009>
2. *Betz Handbook of Industrial Water Conditioning*: 8th ed. BETZ Laboratories Inc., USA; 1980. 440 p.
3. Материалы конференции начальников турбинных цехов российских и зарубежных АЭС по повышению надежности и эффективности турбинного оборудования НТЦ-2013. Москва; 2013.
4. Mwaba M.G., Golriz M.R., Gu. J. A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces. *Appl. Therm. Eng.* 2006;26(4):440–447. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.05.021>
5. Головин В.А., Печников Н.В., Щелков В.А., Цивадзе А.Ю. Оценка срока эксплуатации теплообменных трубок конденсаторов пара на основе статистического анализа локальной язвенной коррозии по данным вихревого контроля. *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2018;54(45):14–26. <https://doi.org/10.1134/S004418561806013X>
6. Zhang H.H., Pang X., Meng Z., Chao L., Liang W., Gao K. The behavior of pre-corrosion effect on the performance of imidazoline-based inhibitor in 3 wt % NaCl solution saturated with CO<sub>2</sub>. *Appl. Surf. Sci.* 2015;356:63–72. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.003>

## REFERENCES

1. Saremi M., Dehghanian C., Sabet M. The effect of molybdate concentration and hydrodynamic effect on mild steel corrosion inhibition in simulated cooling water. *Corros. Sci.* 2006;48(6):1404–1412. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2005.06.009>
2. *Betz Handbook of Industrial Water Conditioning*: 8th ed. BETZ Laboratories Inc., USA; 1980. 440 p.
3. *Materialy konferentsii nachal'nikov turbinnykh tsekhov rossiiskikh i zarubezhnykh AES po povysheniyu nadezhnosti i effektivnosti turbinnogo oborudovaniya NTTs 2013 (Materials of the conference of heads of turbine shops of Russian and foreign NPPs on improving the reliability and efficiency of turbine equipment STC 2013)*. Moscow; 2013 (in Russ.).
4. Mwaba M.G., Golriz M.R., Gu. J. A semi-empirical correlation for crystallization fouling on heat exchange surfaces. *Appl. Therm. Eng.* 2006;26(4):440–447. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.05.021>
5. Golovin V.A., Pechnikov N.V., Shchelkov V.A., Tsivadze A.Yu. Evaluation of the service life of heat exchange tubes of steam condensers based on statistical analysis of local ulcerative corrosion according to eddy current control data. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Physical chemistry of the surface and protection of materials*. 2018. Vol. 54. P. 14–26 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S004418561806013X>

7. Avdeev Y.G., Kuznetsov Y.I. Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 2020;9(2): 394–426. <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-2-2>
8. Бовт В.В., Миков А.И. *Композиция на основе нитрата карбамида и способ получения композиции на основе нитрата карбамида*: Пат. 2497941 РФ. Заявка № 201204930/04; заявл. 13.02.2012; опубл. 10.11.2013. Бюл. 31.
9. Аптекман А.Г., Беклемышев В.И., Болгов В.Ю., Махонин И.И. *Промывочный состав для удаления накипи*: Пат. 2172301 РФ. Заявка № 2000110279/12; заявл. 25.04.2000; опубл. 20.08.2001. Бюл. 23.
10. Алиев З.М., Магомедова Д.Ш., Супьянова Э.А., Ялдаров Э.М. Исследование электрохимически синтезированного анолита для очистки внутренних трубопроводов от накипи. *Вестник Дагестанского государственного университета*. 2014;6:148–150.
11. Линников О.Д., Родина И.В., Анохина Е.А. и др. *Способ очистки оборудования от отложений с высоким содержанием меди*: Пат. 2359196 РФ. Заявка № 2007134131/02; заявл. 12.09.2007; опубл. 20.06.2009. Бюл. № 17.
12. Ахмедов Г.Я. *Способ очистки теплообменника от карбонатных отложений*: Пат. 2528776 РФ. Заявка № 2013109835/06; заявл. 05.03.2013; опубл. 20.09.2014. Бюл. 26.
13. Гайдар С.М. *Водорасторимый ингибитор коррозии металлов*: Пат. 2355820 РФ. Заявка № 2008113753/02; заявл. 11.04.2008; опубл. 20.05.2009. Бюл. 14.
14. Артамонова И.В., Горичев И.Г. Экологические особенности удаления карбонатных отложений с поверхности теплотехнического оборудования. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2009;8(2):220–227.
15. Шагиев Н.Г., Чичирова Н.Д., Абасев Ю.В., Ляпин А.И. Термодинамический анализ процессов в водных контурах электростанций при химических очистках с использованием композиций на основе комплексонов. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2003;(11–12):82–88.
16. Zhang P., Lv F.Y. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. *Energy*. 2015;82:1068–1087. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.061>
17. Barati D.G., Aliofkhaizraei M., Khorsand S., Sokhanvar S., Kaboli A. Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability. *Arab. J. Chem.* 2020;13(1):1763–1802. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.013>
18. Latthe S.S., Sutar R.S., Kodag V.S., Bhosale A.K., Kumar A.M., Kumar Sadashivuni K., Xing R., Liu S. Self-cleaning superhydrophobic coatings: potential industrial applications. *Prog. Org. Coat.* 2019;128:52–58. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.008>
19. Cao L., Jones A.K., Sikka V.K., Wu J., Gao D. Anti-Icing superhydrophobic coatings. *Langmuir*. 2009;25(21): 12444–12448. <https://doi.org/10.1021/la902882b>
20. Mehmood U., Al-Sulaiman F.A., Yilbas B.S., Salhi B., Ahmed S.H.A., Hossain M.K. Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: a critical review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2016;157:604–623. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.07.038>
6. Zhang H.H., Pang X., Meng Z., Chao L., Liang W., Gao K. The behavior of pre-corrosion effect on the performance of imidazoline-based inhibitor in 3 wt % NaCl solution saturated with CO<sub>2</sub>. *Appl. Surf. Sci.* 2015;356:63–72. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.08.003>
7. Avdeev Y.G., Kuznetsov Y.I. Inhibitory protection of steels from high-temperature corrosion in acid solutions. A review. Part 1. *Int. J. Corros. Scale Inhib.* 2020;9(2): 394–426. <http://dx.doi.org/10.17675/2305-6894-2020-9-2-2>
8. Bovt V.V., Mikov A.I. *Kompozitsiya na osnove nitrata karbamida i sposob polucheniya kompozitsii na osnove nitrata karbamida (Composition based on carbamide nitrate and method for producing a composition based on carbamide nitrate)*: RF Pat. 2497941. Publ. 10.11.2013 (in Russ.).
9. Aptekman A.G., Beklemysh V.I., Bolgov V.Yu., Makhonin I.I. *Promyvochnyi sostav dlya udaleniya nakipi (Flushing composition for descaling)*: RF Pat. 2172301. Publ. 20.08.2001 (in Russ.).
10. Aliev Z.M., Magomedova D.Sh., Sup'yanova E.A., Yaldarov E.M. Using electrochemically synthesized anolyte for cleaning internal surfaces of pipelines from scale. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta = Herald of Dagestan State University*. 2014;6:148–150 (in Russ.).
11. Linnikov O.D., Rodina I.V., Anokhina E.A., et al. *Sposob ochistki oborudovaniya ot otlozhennii s vysokim soderzhaniem medi (Method for cleaning equipment from deposits with a high copper content)*: RF Pat. 2359196. Publ. 20.06.2009 (in Russ.).
12. Akhmedov G.Ya. *Sposob ochistki teploobmennika ot karbonatnykh otlozhennii (Method for cleaning the heat exchanger from carbonate deposits)* RF Pat. 2528776. Publ. 20.09.2014 (in Russ.).
13. Gaidar S.M. *Vodorastvorimyi ingibitor korrozii metallov (Water-soluble metals corrosion inhibitor)*: RF Pat. 2355820. Publ. 20.05.2009 (in Russ.).
14. Artamonova I.V., Gorichev I.G. Ecological features of carbonate deposit removal from the surface of manufacturing equipment. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2009;8(2):220–227 (in Russ.).
15. Shagiev N.G., Chichirova N.D., Abasev Yu.V., Lyapin A.I. Thermodynamic analysis of processes in water contours of power stations at chemical clearing with use of compositions based on a complexons. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy Energetiki=Power engineering: research, equipment, technology*. 2003;(11–12):82–88 (in Russ.).
16. Zhang P., Lv F.Y. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. *Energy*. 2015;82:1068–1087. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.061>
17. Barati D.G., Aliofkhaizraei M., Khorsand S., Sokhanvar S., Kaboli A. Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability. *Arab. J. Chem.* 2020;13(1): 1763–1802. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.01.013>
18. Latthe S.S., Sutar R.S., Kodag V.S., Bhosale A.K., Kumar A.M., Kumar Sadashivuni K., Xing R., Liu S. Self-cleaning superhydrophobic coatings: potential industrial applications. *Prog. Org. Coat.* 2019;128:52–58. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.008>

21. Gwon H.J., Park Y., Moon C.W., Nahm S., Yoon S.J., Kim S.Y., Jang H.W. Superhydrophobic and antireflective nanograss-coated glass for high performance solar cells. *Nano Res.* 2014;7(5):670–678. <https://doi.org/10.1007/s12274-014-0427-x>
22. Gao X.F., Jiang L. Biophysics: water-repellent legs of water striders. *Nature*. 2004;432(7013):36. <https://doi.org/10.1038/432036a>
23. Gao X., Yan X., Yao X., Xu L., Zhang J., Zhang K., Yang B., Jiang L. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. *Adv. Mater.* 2007;19(17):2213–2217. <https://doi.org/10.1002/adma.200601946>
24. Liu T., Chen S.G., Cheng S., Tian J.T., Chang X.T., Yin Y.S. Corrosion behavior of super-hydrophobic surface on copper in seawater. *Electrochim. Acta*. 2007;52(28):8003–8007. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.06.072>
25. Yin Y.S., Liu T., Chen S.G., Liu T., Cheng S. Structure stability and corrosion inhibition of super-hydrophobic film on aluminum in seawater. *Appl. Surf. Sci.* 2008;255(5):2978–2984. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.08.088>
26. Hooda A., Goyat M.S., Pandey J.K., Kumar A., Gupta R. A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of super-hydrophobic coatings. *Prog. Org. Coat.* 2020;142:105557. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105557>
27. Wang G., Zhang T.Y. Easy route to the wettability cycling of copper surface between superhydrophobicity and superhydrophilicity. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2012;4(1):273–279. <https://doi.org/10.1021/am2013129>
28. Mortazavi V., Khonsari M. On the degradation of superhydrophobic surfaces: a review. *Wear*. 2017;372–373:145–157. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.009>
29. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. The prediction of wettability of curved surfaces on the basis of the isotherms of the disjoining pressure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011;383(1–3):10–16. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.12.020>
30. Golovin V.A., Kaz'min A.N., Nemytova A.M. Experience gained from using protective coating of cooling tubes in the condensers at the Leningrad and the Smolensk nuclear power plants. *Term. Eng.* 2012;59(2):119–124. <https://doi.org/10.1134/S0040601512020048>
31. Ильин А.Б., Щелков В.А., Добриян С.А., Лукин В.Б., Головин В.А. Полимерные покрытия для защиты теплообменных трубок конденсаторов пара от коррозии и солеотложений. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018;5(71):69–75. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.71.037>
32. Головин В.А. Предотвращение накипеобразования и коррозии теплопередающих поверхностей конденсаторов АЭС. *Труды конференции начальников турбинных цехов российских и зарубежных АЭС по повышению надежности и эффективности турбинного оборудования*. АО «Концерн Росэнергоатом», 13–15 февраля 2018.
19. Cao L., Jones A.K., Sikka V.K., Wu J., Gao D. Anti-Icing superhydrophobic coatings. *Langmuir*. 2009;25(21):12444–12448. <https://doi.org/10.1021/la902882b>
20. Mehmood U., Al-Sulaiman F.A., Yilbas B.S., Salhi B., Ahmed S.H.A., Hossain M.K. Superhydrophobic surfaces with antireflection properties for solar applications: a critical review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2016;157:604–623. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.07.038>
21. Gwon H.J., Park Y., Moon C.W., Nahm S., Yoon S.J., Kim S.Y., Jang H.W. Superhydrophobic and antireflective nanograss-coated glass for high performance solar cells. *Nano Res.* 2014;7(5):670–678. <https://doi.org/10.1007/s12274-014-0427-x>
22. Gao X.F., Jiang L. Biophysics: water-repellent legs of water striders. *Nature*. 2004;432(7013):36. <https://doi.org/10.1038/432036a>
23. Gao X., Yan X., Yao X., Xu L., Zhang J., Zhang K., Yang B., Jiang L. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. *Adv. Mater.* 2007;19(17):2213–2217. <https://doi.org/10.1002/adma.200601946>
24. Liu T., Chen S.G., Cheng S., Tian J.T., Chang X.T., Yin Y.S. Corrosion behavior of super-hydrophobic surface on copper in seawater. *Electrochim. Acta*. 2007;52(28):8003–8007. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2007.06.072>
25. Yin Y.S., Liu T., Chen S.G., Liu T., Cheng S. Structure stability and corrosion inhibition of super-hydrophobic film on aluminum in seawater. *Appl. Surf. Sci.* 2008;255(5):2978–2984. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.08.088>
26. Hooda A., Goyat M.S., Pandey J.K., Kumar A., Gupta R. A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of super-hydrophobic coatings. *Prog. Org. Coat.* 2020;142:105557. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105557>
27. Wang G., Zhang T.Y. Easy route to the wettability cycling of copper surface between superhydrophobicity and superhydrophilicity. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2012;4(1):273–279. <https://doi.org/10.1021/am2013129>
28. Mortazavi V., Khonsari M. On the degradation of superhydrophobic surfaces: a review. *Wear*. 2017;372–373:145–157. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.009>
29. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. The prediction of wettability of curved surfaces on the basis of the isotherms of the disjoining pressure. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011;383(1–3):10–16. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2010.12.020>
30. Golovin V.A., Kaz'min A.N., Nemytova A.M. Experience gained from using protective coating of cooling tubes in the condensers at the Leningrad and the Smolensk nuclear power plants. *Term. Eng.* 2012;59(2):119–124. <https://doi.org/10.1134/S0040601512020048>
31. Ilyin A.B., Shchelkov V.A., Dobriyan S.A., Lukin V.B., Golovin V.A. Polymer coatings for protection of heat-exchange tubes of vapor condenser against corrosion and saltation. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*. 2018;5(71):69–75 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.71.037>
32. Golovin V.A. Prevention of scale formation and corrosion of heat transfer surfaces of NPP condensers. In: *Proceeding of Conference of Heads of Turbine Shops of Russian and Foreign NPPs on Improving the Reliability and Efficiency of Turbine Equipment*. Rosenergoatom Concern JSC, February 13–15, 2018 (in Russ.)

33. Головин В.А., Ильин А.Б., Кузнец В.Т., Вартапетян А.Р. Способ защиты от коррозии металлических поверхностей ингибиованными полимерными композициями и микрокапсулами с ингибитором коррозии: Пат. 2358036 РФ. Заявка № 2007148024/02; заявл. 25.12.2007; опубл. 10.06.2009.
34. Golovin V.A., Kuznets V.T., Kublitsky K.V., Ilin A.B. Method for protection against corrosion and scale deposit and for restoring tubes of heat-exchanging equipment and device for carrying out said method: US Pat. 7836844. Publ. 23.11.2010.
35. Головин В.А., Ильин А.Б., Алиев А.Д. Диффузия фосфоновых ингибиторов накипеобразования в эпоксидных матрицах. Международный научно-исследовательский журнал. 2018;70(4):92–96. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.70.033>
33. Golovin V.A., Il'in A.B., Kuznec V.T., Vartapetjan A.R. Sposob zashchity ot korrozii metallicheskikh poverhnostej ingibirovannymi polimernymi kompozicijami i mikrokapsuly s ingibitorom korrozii (Method of protecting metal surfaces inhibited with polymer compositions from corrosion and micro-capsules with a corrosion inhibitor (versions)): RF Pat. 2358036. Publ. 10.06.2009 (in Russ.).
34. Golovin V.A., Kuznets V.T., Kublitsky K.V., Ilin A.B. Method for protection against corrosion and scale deposit and for restoring tubes of heat-exchanging equipment and device for carrying out said method: US Pat. 7836844. Publ. 23.11.2010.
35. Golovin V.A., Ilyin A.B., Aliev A.D. Diffusion of phosphonic scale inhibitors for scale in epoxy matrices. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal. 2018;70(4):92–96 (in Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.70.033>

## Об авторах

**Головин Владимир Анатольевич**, д.т.н., заведующий лабораторией защиты от коррозии металлов и сплавов в сильноагрессивных средах, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (119071, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корп. 4). E-mail: golovin@rocor.ru. Scopus Author ID 7006124188, ResearcherID S-1645-2018, <https://orcid.org/0000-0001-9144-507X>

**Тюрина Светлана Александровна**, к.т.н., доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий Института перспективных технологий и индустриального программирования ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: mgupi.tyurina@mail.ru. Scopus Author ID 57209980191, ResearcherID AGI-3957-2022, <https://orcid.org/0000-0002-6671-1337>

**Шелков Вячеслав Анатольевич**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории защиты от коррозии металлов и сплавов в сильноагрессивных средах, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (119071, Россия, Москва, Ленинский пр-т, д. 31, корп. 4). E-mail: tehnolog@rocor.ru. Scopus Author ID 6506074251, <https://orcid.org/0000-0001-7437-5305>

## About the authors

**Vladimir A. Golovin**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Metal and Alloy Protection from Corrosion in Highly Aggressive Media, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences (31-4, Leninskii pr., Moscow, 119071 Russia). E-mail: golovin@corrosion.ru. Scopus Author ID 7006124188, ResearcherID S-1645-2018, <https://orcid.org/0000-0001-9144-507X>

**Svetlana A. Tyurina**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Digital and Additive Technologies, Institute for Advanced Technologies and Industrial Programming, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: mgupi.tyurina@mail.ru. Scopus Author ID 57209980191, ResearcherID AGI-3957-2022, <https://orcid.org/0000-0002-6671-1337>

**Vyacheslav A. Shchelkov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Metal and Alloy Protection from Corrosion in Highly Aggressive Media, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences (31-4, Leninskii pr., Moscow, 119071 Russia). E-mail: tehnolog@rocor.ru. Scopus Author ID 6506074251, <https://orcid.org/0000-0001-7437-5305>