



ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНТИНАКИПНОГО УСТРОЙСТВА НА ПАРОВОМ КОТЛЕ ДЕ-25-24

Павлов Г.И., Ситников О.Р., Накоряков П.В.

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, Россия
Halmer169990@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в разработке опытно-промышленного образца антинакипного устройства, использующего принцип ультразвуковой технологии предотвращения образования накипи, основанном на комплексном физическом воздействии механических колебаний на жидкость и поверхность труб, путем наложения на колебания ультразвуковой частоты звуковых колебаний высокой интенсивности. ЦЕЛЬ. Экспериментально оценить эффективность комплексного способа ультразвукового удаления отложений накипи с внутренних стенок теплообменных труб. Рассмотреть возможность увеличения срока службы теплообменных котлов за счёт повышения качества удаления отложений накипи с поверхностей теплообменных труб с помощью ультразвуковых и звуковых колебаний. МЕТОДЫ. Практические эксперименты и оценка эффективности комплексного способа ультразвукового удаления отложений накипи проводились на опытно-промышленном образце антинакипного устройства, смонтированном на паровом котле котельной. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности разработанного антинакипного устройства и особенности его монтажа на элементах теплообменника котла. Рассмотрена экспериментальная оценка эффективности способа ультразвукового удаления отложений накипи с внутренних стенок теплообменных труб. Сделаны выводы об эффективности заявляемого способа. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанное опытно-промышленное антинакипное устройство использует комплексное воздействие механических колебаний на жидкость и поверхность труб, что повышает эффективность воздействия по предотвращению и удалению твердых отложений теплообменника. Положительный эффект очистки внутренних поверхностей теплообменника установлен экспериментально. Полученные результаты позволяют прогнозировать возможность увеличения срока службы теплообменных котлов.

Ключевые слова: антинакипное устройство; комплексное воздействие механических колебаний; удаление отложений накипи в теплообменных аппаратах.

Для цитирования: Павлов Г.И., Ситников О.Р., Накоряков П.В. Об эффективности использования антинакипного устройства на паровом котле ДЕ-25-24 // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 123-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-123-134.

ON THE EFFICIENCY OF USING ANTI-SCALE DEVICE ON STEAM BOILER DE-25-24

Pavlov G.I., Sitnikov O.R., Nakoryakov P.V.

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan,
Russia
Halmer169990@mail.ru

Abstract: THE RELEVANCE of the study is to develop a pilot industrial model of an anti-scale device using the principle of ultrasonic technology to prevent scale formation, based on the complex physical impact of mechanical vibrations on the liquid and the surface of pipes, by superimposing high-intensity sound vibrations on the vibrations of the ultrasonic frequency.

THE PURPOSE. To experimentally evaluate the efficiency of a complex method of ultrasonic removal of scale deposits from the inner walls of heat exchange pipes. To consider the possibility of increasing the service life of heat exchange boilers by improving the quality of scale deposit removal from the surfaces of heat exchange pipes using ultrasonic and sound vibrations. **METHODS.** Practical experiments and evaluation of the effectiveness of the integrated method of ultrasonic removal of scale deposits were carried out on a pilot-industrial model of an anti-scale device mounted on a steam boiler of a boiler house. **RESULTS.** The article describes the relevance of the topic, considers the features of the developed anti-scale device and the features of its installation on the elements of the boiler heat exchanger. An experimental assessment of the effectiveness of the method of ultrasonic removal of scale deposits from the inner walls of heat exchange pipes is considered. Conclusions are made about the effectiveness of the claimed method. **CONCLUSION.** The developed pilot-industrial anti-scale device uses the complex effect of mechanical vibrations on the liquid and the surface of pipes, which increases the effectiveness of the action to prevent and remove solid deposits from the heat exchanger. The positive effect of cleaning the internal surfaces of the heat exchanger has been established experimentally. The results obtained allow us to predict the possibility of increasing the service life of heat exchange boilers.

Keywords: anti-scale device; complex effect of mechanical vibrations; removal of scale deposits in heat exchangers.

For citation: Pavlov G.I., Sitnikov O.R., Nakoryakov P.V. On the efficiency of using anti-scale device on steam boiler DE-25-24. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 123-134. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-123-134.

Введение (Introduction)

Современная котельная установка является сложным сооружением, включающим в себя различное оборудование, связанное в единое целое общей технологической схемой, основным элементом которой является котельный агрегат [1].

Одной из основных проблем промышленной энергетики является снижение эффективности работы промышленных котлов, обусловленной образованием отложений солей жесткости и продуктов коррозии на теплообменных поверхностях котлов [2]. В условиях неправильной работы поверхностей нагрева возможно образование больших объемов сорванной пленки пограничного слоя, что приводит к разрушению («пережогу») стенки трубы и образованию накипи [3]. Предотвращение накипеобразования и защита от коррозии являются одной из актуальных проблем, связанных с эксплуатацией котельных агрегатов.

Надежность работы поверхностей нагрева котлов зависит от качества питательной и подпиточной воды [4]. Вода является универсальным растворителем и вместе с ней в котел поступают различные минеральные примеси. Данные примеси делятся на трудно- и легкорастворимые. К числу труднорастворимых примесей относят соли гидроксида Ca и Mg. Основные накипеобразователи характеризуются тем, что при повышении температуры их растворимость падает. Таким образом, накапливаясь в котле, по мере испарения воды, эти примеси после прохождения точки насыщения выпадают в воде. Прежде всего, это соли жесткости – $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, CaCO_2 , MgCO_2 – взвешенные и коллоидные частицы, находящиеся в воде котла [5].

Одним из самых отрицательных свойств накипи является ее весьма низкая теплопроводность (0,1-0,2 Вт/м*К). Поэтому даже малый слой накипи приводит к резкому ухудшению теплопередачи и, вследствие этого, к повышению его температуры, что может привести к потере прочности стенки котла и его разрушению [6]. Обладая низкой теплопроводностью, слой накипи снижает коэффициент полезного действия котла в целом [7]. Низкая теплопередача накипи приводит к сильному перегреву металла поверхностей нагрева, из-за чего на трубах появляются трещины, вздутия и деформации [8]. Это нередко является причиной аварийных ситуаций, сокращения межремонтных сроков и увеличения затрат на ремонт и обслуживание. Например, при слое накипи толщиной 0,2 мм температура стенок котла сильно отличается от температуры котловой воды и в современных котлах достигает около 700°С, что может привести к аварийному разрыву экранных труб [9]. Накипь также уменьшает сечение труб, увеличивая их гидросопротивление, а это влечет за собой дополнительные потери электроэнергии в насосном оборудовании на перекачку воды. Перегрев металла, несвоевременная и

некачественная очистка неизбежно приводят к сокращению срока службы котлов в 2-3 раза, неоправданным затратам на приобретение и монтаж новых котлов взамен вышедших из строя [10].

Для уменьшения и исключения накипеобразования обычно проводится предварительное химическое умягчение воды в установках докотловой обработки воды [4]. Водоподготовка осуществляется в специальных установках и она связана со значительными затратами и большим расходом необходимых химических реагентов, в частности, поваренной соли для регенерации фильтров. Водоподготовительные установки требуют строгого соблюдения режимных параметров, зависящих от квалификации лаборанта и, при их нарушении, эффективность химической подготовки воды сильно снижается [11].

Наряду с химическими, в последние годы находят все более широкое применение находят физические (безреагентные) методы предотвращения накипеобразования, в частности, ультразвуковой. Этот метод не требует больших капитальных затрат, исключает применение химических реагентов, имеет невысокую трудоемкость и не вызывает загрязнения окружающей среды.

Принцип ультразвуковой технологии предотвращения образования накипи основан на воздействии механических колебаний ультразвуковой частоты на механизм накипеобразования при его работе [12]. С помощью ультразвуковой установки в металле котла и в воде, заполняющей его, возбуждаются маломощные ультразвуковые колебания. Под действием этих колебаний соли жесткости начинают кристаллизоваться непосредственно в толще воды, образуя мелкодисперсный шлам, а колебания поверхностей нагрева препятствуют осаждению шлама на стенках труб [13]. Поэтому шлам находится в воде во взвешенном состоянии и удаляется из теплоагрегата при регулярных продувках, в результате чего образования накипи не происходит. Ультразвук также воздействует на осевший на стенки шлам, препятствуя образовавшемуся слою уплотняться, а на ранее образовавшуюся накипь оказывает разрушающее действие. Ультразвуковые колебания, воздействуя на поверхность нагрева, создают знакопеременные механические усилия, под влиянием которых прочность связи внутри накипи, а также между накипью и металлом нарушается, и образуются трещины [14]. Вода под действием капиллярных сил быстро проникает через трещины-капилляры к поверхности нагрева, где она быстро испаряется, вызывая вспучивание и отслаивание накипи. Содержащиеся в воде газовые пузырьки, также попадая в трещины между накипью и металлом, начинают колебаться с ультразвуковой частотой, ослабляя сцепление накипи с металлом. Отслоившиеся мелкие частицы и чешуйки накипи удаляются из котла при периодических продувках. То есть, происходит постепенное очищение котла в процессе его работы. Ультразвуковые колебания увеличивают теплопередачу греющей поверхности за счет повышения скорости потока воды из-за снижения гидродинамического сопротивления труб с колеблющимися стенками. Под действием ультразвука улучшается отвод пузырьков пара от поверхности нагрева и дегазация воды вследствие лучшего перемешивания пристеночного слоя жидкости, что также способствует увеличению теплопередачи [15]. Трубы поверхностей нагрева имеют естественные дефекты – узкие микронные щели и трещины, где в обычных условиях (без ультразвука) сохраняется кислород воздуха. При воздействии ультразвуковых колебаний кислород легко выходит из этих щелей, в результате этого исключается один из механизмов кислородной коррозии металла труб.

Приведенные выше факторы взаимосвязаны и в совокупности являются причиной положительного воздействия ультразвука на процессы предотвращения накипеобразования, снижения коррозии металла и повышения эффективности работы теплотехнического оборудования. Применение ультразвукового метода исключает загрязнение окружающей среды вредными стоками водоподготовительных установок, а стоимость обработки 1 м³ воды этим способом, как показывают ориентировочные расчеты, в 200-250 раз ниже стоимости химической обработки. Для примера, капитальные вложения, связанные с приобретением, монтажом и наладкой ультразвуковых противонакипных установок «Волна» выпускаемых предприятием «Агроприбор», окупаются в течение нескольких месяцев их работы. Обслуживание установок не требует привлечения дополнительных трудовых ресурсов и может производиться штатным персоналом котельной после предварительного изучения конструкции и правил эксплуатации установки. Однако, следует отметить, что вышеназванные эффекты проявляются при достаточно высоких уровнях интенсивности ультразвуковых колебаний, пороговое значение которого регламентировано интенсивностью протекания

гравитационных явлений.

Из гидродинамики хорошо известно, что кавитация в жидкостях является одним из распространенных механизмов разрушения металла, и при превышении определенного уровня интенсивности в теплообменных трубах начинают возникать негативные процессы. В связи с этим разработчики ультразвуковых антинакипных устройств перестраховываются и поставляют на рынок аппараты с низкой мощностью [16]. Из-за этого вышеперечисленные преимущества ультразвука в котлах проявляются не в полной мере. Часть шлама оседает на стенках и под действием диффузионных сил держится на них [17]. Для удаления его со стенок теплообменных аппаратов необходимо оказывать на него дополнительное механическое воздействие, например, звуковыми волнами, распространяющимися как в металле, так и в жидком теплоносителе.

Акустическое воздействие на накипеобразование относится к физическим методам воздействия. Как указывалось выше, соли жесткости оседают и образуют на нагретой поверхности твердые отложения за счет диффузионных сил. Несмотря на множество работ, выполненных по рассматриваемой теме, механизм осадкообразования до конца не изучен. Исследования в данной области продолжаются. Для примера, в работе [18] отмечено, что на процесс отложения накипи влияют геометрические параметры теплообменников, режимные характеристики потока, размер и концентрации частиц, приводится математическая модель образования накипи для сложных условий, когда на стенках теплообменного аппарата конденсируется парогазовая смесь с твердыми частицами. В соответствии с предложенной моделью толщина отложений зависит от физических свойств накипи, таких как: термическая проводимость, коэффициент теплопроводности, тепловой коэффициент приращения. Полученные результаты весьма полезны для решения обратной задачи – изучению процесса разрушения твердых отложений под воздействием физического воздействия, например, акустического в диапазоне звуковых колебаний. В такой постановке вопроса ранее исследования не проводились.

В данной работе объектом исследования являлось накипеобразование на нагретой поверхности электрического ТЭНа со стальным корпусом, помещенного в проточный нагреватель.

Предмет исследования – оценка эффективности комплексного воздействия звука в ультразвуковом и звуковом диапазонах на твердые отложения на стенках труб.

Задачи исследований:

- разработать экспериментальную установку (проточный нагреватель) для исследования интенсивности накипеобразования при различных условиях его работы;
- провести анализ воды на содержание солей жесткости, используемой в экспериментах;
- экспериментально исследовать скорость накипеобразования на стенках электрического ТЭНа в условиях ультразвуковых колебаний с наложением звуковых колебаний разных частот;
- разработать опытно-промышленное антинакипное устройство для апробирования на рабочем котле ДЕ-25-24;
- разработать программу испытаний и провести опытно-промышленные испытания устройства с оценкой эффективности его работы с использованием тест-платин.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для решения поставленных задач была разработана экспериментальная установка, схема которой приведена на рисунке 1.

Установка включала в себя проточный нагреватель 4 (рис. 1) с электронагревателем 6, систему подачи воды с входным патрубком 9, вибратор 1, ультразвуковой генератор 5. Проточный нагреватель 4 содержит два патрубка: входной 9 и выходной 2, к которым соединены водопроводные трубы. Для регистрации расхода воды и температуры на входе в нагреватель предусмотрены расходомер 8 – универсальный водосчетчик с импульсным выходом Valtec VLF-15U-I и датчик температуры 7 – термометр биметаллический Stout с погружной гильзой. Минимальный расход воды, измеряемый данным счетчиком, составляет 0,03 м³/ч. На выходе регистрируется температура нагретой воды при помощи аналогового прибора – термометра для воды Uni-Fitt 120°C. Внутри корпуса проточного нагревателя расположен электрический нагреватель 10 Rexant RDT-1500 Вт, с переменным электрическим питанием 220 В. К корпусу проточного нагревателя 4 сверху через стержень прикреплен ультразвуковой генератор 5 УЗА-2 (модель НО-478), к торцевой части корпуса свободно примкнут стержень вибратора 1 – перфоратора BOSCH PBN-2800. Число ударов перфоратора при максимальном числе оборотов двигателя 1450 об/мин составляет 4000 уд/мин, что составляет 66 Гц. Имеется электронная

регулировка числа оборотов. Сила удара равна 2,6 Дж. Для оценки параметров вибрации на корпусе проточного нагревателя использовался пьезоэлектрический датчик KD-35A (производства ГДР, фирма RFT), имеющего чувствительность $5,0 \text{ мВ} \cdot \text{м/с}^2$ и цифровой осциллограф GDS-71062A. Регистрировались частота колебания и виброперемещение на корпусе нагревателя. Максимальная погрешность датчика KD-35 составляла 1,8%, максимальная погрешность канала вертикального отклонения осциллографа в режиме измерения напряжения – не более 3%.

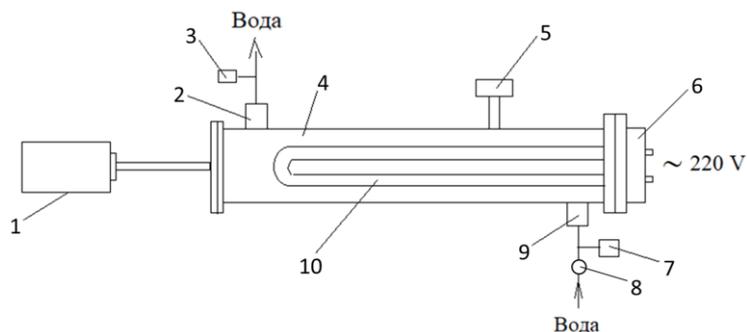


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – вибратор; 2 – выходной патрубков; 3 – датчик температуры; 4 – корпус проточного нагревателя; 5 – ультразвуковой генератор; 6 – электронагреватель; 7 – датчик температуры; 8 – расходомер; 9 – входной патрубок; 10 – нагревательный элемент

Fig. 1. Experimental setup diagram:

1 – vibrator; 2 – outlet pipe; 3 – temperature sensor; 4 – flow heater housing; 5 – ultrasonic generator; 6 – electronic heater; 7 – temperature sensor; 8 – flow meter; 9 – inlet pipe; 10 – heating element

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эксперименты проводились на артезианской воде со следующими характеристиками: вода негазированная, жесткость 22,4 мг-экв/л, массовая доля гидрокарбонат-ионов (HCO_3) 186,3 мг/дм³, щелочность 12,6 мг-экв/л. Продолжительность каждого эксперимента составляла 4 часа. Это время было определено экспериментально, оно соответствовало полному покрытию нагревательных элементов тэна солями жесткости. Вибратор включался через каждый час на период времени равный одной минуте. Эффективность воздействия звуковых колебаний на накипеобразование оценивалась тестовым методом путем взвешивания массы электронагревателя на электронных весах до и после проведения эксперимента. По разнице массы определялась эффективность режима воздействия звуковых колебаний на процессы накипеобразования. Очистка поверхности нагревательного элемента после экспериментов осуществлялась химическим методом с использованием раствора воды и лимонной кислоты. Результаты исследований были обобщены и представлены в виде графика зависимости разницы массы Δm (количества твердых отложений) от частоты вибрации звуковых колебаний ν , представленном на рисунке 2.

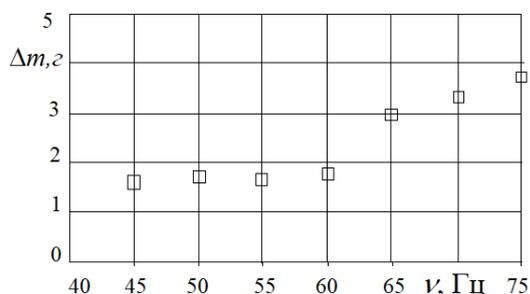


Рис. 2. График зависимости количества твердых отложений Δm от частоты звуковых колебаний ν

Fig. 2. Graph of the dependence of the amount of solid deposits Δm on the frequency of sound vibrations ν

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из рисунка видно, что частота звуковых колебаний сильно влияет на количество твердых отложений на поверхности нагревателя. В диапазоне частот от 45 Гц до 60 Гц условия осадкообразования на стенках нагревателя менее благоприятные, чем при

воздействии звука на высоких частотах. Предположительно, объяснить характер изменения полученной зависимости можно резонансными явлениями. При настройке вибратора на заданное значение частоты замечено, что амплитуда виброперемещения корпуса нагревателя при изменении частоты меняется. Так, в диапазоне частот 45-69 Гц амплитуда соответствует значениям 32-23 мкм, в случае более высоких частот соответствия следующие: 65 Гц – 12,9 мкм, 70 Гц – 10 мкм, 75 Гц – 10,4 мкм. Полученные результаты позволяют прийти к важному практическому выводу: звуковой генератор эффективнее работает при его настройке на резонансные частоты защищаемого элемента котла. Таким образом, опыты на экспериментальной установке позволили выявить наиболее благоприятный частотный диапазон для уменьшения осадкообразования на стенках нагревателя.

С учетом полученных данных, в ходе выполнения научно-исследовательских работ был разработан и опробован на практике опытно-промышленный образец антинакипного устройства, использующий принцип ультразвуковой технологии предотвращения образования накипи. Монтаж устройства проведен на паровом котле рабочей котельной. Предложенное антинакипное устройство апробировано на действующем котле ДЕ-25-24, эксплуатируемого в тепловых сетях АПТС (г. Альметьевск). В связи с большим износом водоподготовительного оборудования на таких котлах проблема накипеобразования стоит особо остро.

Разработанное антинакипное устройство для очистки теплообменников котельных от твердых отложений предназначено для использования в составе водонагревательных и паровых котлов с целью предотвращения образования накипи на наиболее проблемных участках теплообменной поверхности котлов. Устройство использует принцип ультразвуковой технологии предотвращения образования накипи, основанном на комплексном физическом воздействии механических колебаний на жидкость и поверхность труб, путем наложения на колебания ультразвуковой частоты звуковых колебаний высокой интенсивности, генерируемых другим источником. Низкочастотные колебания позволяют своевременно удалять с поверхности теплообменных труб разрыхленные твердые отложения, перенося их в теплоноситель. В дальнейшем, механические частицы выводятся из полости теплообменника при сдвиге котла. Предложенное техническое решение приводит к увеличению срока службы теплообменных котлов за счёт повышения качества удаления отложений накипи с внутренних поверхностей теплообменных труб путем комплексного воздействия ультразвуковых и звуковых колебаний.

Общий вид опытно-промышленного антинакипного устройства, смонтированного на котле ДЕ-25-24 представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Схема монтажа опытно-промышленного антинакипного устройства на котле ДЕ-25-24:

1 – ультразвуковые преобразователи;
2 – акустический вибратор; 3 – волновод

Fig. 3. Installation diagram of a pilot-industrial anti-chip device on a DE-25-24 boiler:

1 – ultrasonic transducers; 2 – acoustic vibrator;
3 – waveguide

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Опытно-промышленное антинакипное устройство включает в себя:

- блок управления;
- генератор ультразвуковой частоты;

- ультразвуковые преобразователи;
- генератор звуковых колебаний;
- акустический вибратор;
- соединительные и питающие кабели.

Управление работой устройства для очистки теплообменников котельных от твердых отложений производится с блока управления, смонтированного в непосредственной близости от котла. Ультразвуковые преобразователи 1 (рис. 1) смонтированы на элементах теплообменника котла с помощью герметичных сварных швов. Количество преобразователей и точки их расположения выбираются с учетом конструкции котлоагрегата, его мощности и количества накипи, которое, в среднем, образуется за сезон эксплуатации. Для обеспечения требуемой температуры рабочих элементов, ультразвуковые преобразователи к нагретой части котла подключены через волновод.

По такой же технической схеме подключен акустический вибратор 2 звукового генератора, так как допустимая температура корпуса вибратора составляет не более 40 °С. Волновод 3 представляет собой цилиндрическую трубу длиной 40 см, диаметром 10 см и толщиной стенки 0,5 см, на боковой поверхности которого предусмотрены четыре стабилизатора шириной 5 см, толщиной 0,4 см и длиной 30 см, обеспечивающие температуру корпуса вибратора на допустимом уровне. Снижение уровня звука в таком волноводе составляет менее 0,5 %, что позволяет пренебречь звуковым сопротивлением волновода.

Генератор ультразвуковой частоты задает импульсы тока, которые через соединительные кабели передаются на ультразвуковые преобразователи. Ультразвуковые преобразователи преобразуют их в механические колебания ультразвуковой частоты, передающиеся на очищаемую поверхность конструкции. Они создают в пристенном слое трубы знакопеременное давление на частоте 22000 Гц, которое препятствует образованию накипи. Ультразвуковые преобразователи представляют собой серийно выпускаемые ультразвуковые антинакипные приборы УЗИ-074.

Генератор звуковых колебаний ЗГ-В предназначен для возбуждения колебаний в упругих средах в диапазоне частот от 50 Гц до 500 Гц. Акустический вибратор ЭВ-320Е – дебалансовый, представляет собой центробежный вибровозбудитель, вынуждающая сила которого вызывается вращательным движением инерционного элемента.

Механические колебания, создаваемые ультразвуковыми преобразователями, передаются в протекающий теплоноситель котлов и на очищаемую поверхность конструкции, где возникают колебания, разрушающие накипь на стенках и предотвращающие образование накипи. Под воздействием ультразвуковых колебаний накипь разрыхляется и при воздействии на него колеблющегося потока жидкости (возникают при распространении в жидкости звуковых колебаний) размельченные частицы накипи уносятся с потоком теплоносителя.

Отставшие от стенок теплоагрегата крупные частицы выпадают в осадок и удаляются продувкой агрегата. В дальнейшем, при непрерывной работе устройства, на очищенном от накипи оборудовании новые отложения не образуются.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Оценка эффективности способа ультразвукового удаления отложений накипи с внутренних стенок теплообменных труб проводилась экспериментально. Для оценки эффективности предложенных технических решений были выбраны два идентичных паровых котла ДЕ-25-24, расположенных в одной котельной, подключенных к одной и той же системе водоснабжения, и газовой линии. Один из котлов был оборудован антинакипным устройством, другой эксплуатировался в штатной комплектации. В ходе экспериментов тепловая нагрузка на обоих котлах поддерживалась на одном уровне.

Для оценки эффективности способа ультразвукового удаления отложений накипи с внутренних стенок теплообменных труб в коллекторы обоих паровых котлов в тыльной части вмонтировались лёгкосъёмные тест-пластины, изготовленные из того же металла, что и коллектор. Внешний вид тест-пластин представлен на рисунке 4. Предварительно, тест-пластины взвешивались на электронных весах ВЛТ-150-П, которые составили: для первого котла – 320,43 г, для второго котла – 328,63 г. Оба котла проработали три месяца с одинокой тепловой нагрузкой (котлы к линии выдачи пара были подключены параллельно).



Рис. 4. Внешний вид тест-пластины, установленной в коллекторе котла
Fig. 4. External view of the test plate installed in the boiler manifold

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

По истечении испытательного срока тест-пластины из коллекторов были извлечены. Было замечено, что на тестовой пластине, установленной на котле без антинакипного устройства, были замечены твердые отложения серо-коричневого цвета. На второй пластине, извлеченной из коллектора первого котла визуально следов образования твердых отложений не обнаружено.

После сушки пластин в естественных условиях они повторно взвешивались на весах. Определялась разница в весе тест-пластины как для первого, так и для второго котлов. Полученные значения сравнивались между собой. Определено, что масса твердых отложений на тест-пластине первого котла, оборудованного антинакипным устройством, на 6-8 граммов меньше, чем на тест-пластине второго котла.

Состояние стенок теплообменного аппарата на котле, оборудованном антинакипным устройством, также позволяло судить о хорошем положительном эффекте (рис. 5). На основании полученных экспериментальных данных можно сделать однозначный вывод о положительной эффективности предлагаемого способа.



Рис. 5. Состояние стенок теплообменника котла с установленным опытно-промышленным антинакипным устройством
Fig. 5. The condition of the walls of the boiler heat exchanger with the installed pilot-industrial anti-scale device

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.*

Оценка эффективности работы устройства проводилась также по изменению содержания механических частиц в продувочной воде. Предполагалось, что при сдувке котла с установленным антинакипным устройством содержание механических частиц в теплоносителе должно быть больше, чем в котле без использования устройства. Для проверки этого предположения проводился отбор проб теплоносителя после каждой продувки. Отбор проб проводился в разные сосуды, на которые были приклеены маркеры с надписями: дата отбора, номер котла, время отбора. Далее определялась масса

механических частиц, содержащейся в каждой пробе. Образцы проб и инструментальные средства, использованные при работе приведены на рисунке 6.



Рис. 6. Образцы проб воды

Fig. 6. Water samples

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В дальнейшем полученные экспериментальные данные подвергались математической обработке вероятностно-статистическим методом.

На основе сравнения результатов определения содержания механических примесей в пробах воды можно прийти к выводу о том, что разработанное антинакипное устройство способствует большему выделению из теплообменной полости механических частиц на 0,012 мг в 300 мл воды. При сдуве котлов в период эксплуатации сливается объем воды $V = 50$ л. Для оценки эффективности антинакипного устройства полученный результат необходимо пересчитать по отношению к объему V , который будет составлять 2 мг.

Заключение (Conclusions)

Опытно-промышленное антинакипное устройство является новым аппаратом, отличительной особенностью которого является использование звукового генератора в сочетании с генератором ультразвуковых колебаний. Значение настраиваемой частоты зависит от типа котла и его элементов и необходимо его подбирать опытным путем. Длительность работы и периодичность включения звукового генератора также определяется в процессе эксплуатации котла в зависимости от амплитуды виброперемещения. При длительной вибрационной нагрузке с повышенными значениями амплитуд могут возникнуть проблемные вопросы с обеспечением надежности работы конструктивных элементов котла: обмуровки котла, уплотнительными соединениями, элементами крепления труб и т.д.

При частоте звуковых колебаний 50 Гц с длительностью 12 с и периодичностью включения через каждые 4 часа, распространяющихся по металлической конструкции котла и теплоносителю в сочетании с ультразвуковыми колебаниями установлен положительный эффект очистки внутренних поверхностей теплообменника, выразившейся в большом содержании механических частиц как в продувочной воде, так и на тестовой пластине. При этом состояние элементов котла оставалось в работоспособном состоянии, что свидетельствует о правильном подборе параметров работы вибратора. Для установления более корректных параметров звуковых колебаний как по амплитуде, так и по частоте и длительности их воздействия необходимо провести длительные и детальные испытания котла, в особенности при использовании устройства на других модификациях котлов.

По результатам проведенной работы был получен патент РФ №2789413 на изобретение по безреагентной обработке водных систем [13].

Литература

1. Производственная компания «Спецгазпром». Котельные установки. Доступно по: <https://www.specgazprom.ru/articles/stati-po-zhkh-i-kotelnomu-oborudovaniyu/kotelnye-ustanovki>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
2. Пономарева Д.С., Березина К.В. Предотвращение повреждений котельных труб / Сборник статей Международной научно-практической конференции «Научная инициатива: проблемы и перспективы внедрения инновационных решений», 15 августа 2023 г., СГТУ имени Гагарина Ю.А., Стерлитамак. Уфа: АМИ, 2023. С. 115-117.

3. Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Ситников О.Р., Накоряков П.В. О снижении влияния акустических колебаний на работу расходомеров в гидравлических системах энергетических установок // 7-я международная конференция «Динамика и виброакустика машин» (DVM'2024). 4-6 сентября 2024. Самара. 2024 IEEE. Доступно по: <https://repo.ssau.ru/handle/DVM-2022/444/simple-search?filterquery=Зарипов+Ф.+А.%2C+Павлов+Г.+И.%2C+Ситников+О.+Р.%2C+Накоряков+П.+В.&filtername=author&filtertype>equals>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
4. Стрельников А.С., Батухтин А.Г., Минаков А.А., Кобылкин М.В. Очистка поверхностей нагрева котлоагрегата // Сборник статей XIV Международной научно-практической конференции: «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов». 26–28 ноября 2014 г., Чита : Заб. гос. ун-т, 2014. С. 155-161.
5. Овчинников Г.Л. Умягчение воды при водоподготовке. Специализированный ресурс Air Water Therm. Доступно по: <https://masters.donntu.ru/2019/fkita/burda/library/article03.htm>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
6. Дудочкин И.Б., Овчинников Я.В., Кухта М.В. Причины появления внутренних загрязнений в паровых и водогрейных котлах // Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки и техники», 7 апреля 2015 г., Самара. №2. С.162-164.
7. Васильева Л.В. Формирование элементного и фазового состава отложений в теплоэнергетическом оборудовании в условиях различных схем водоподготовки и способы их удаления. Дис. канд. хим. наук. Краснодар, 2017. 136с. Доступно по: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008711596>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
8. Николаевский Н.Н. Ультразвуковой метод предотвращения накипеобразования // Новости теплоснабжения. 2002. № 10(26). С. 44-45.
9. Терехов С.В., Михайлов А.Г., Слободина Е.Н., Васильев А.В. Образование отложений накипи на поверхностях нагрева в жаротрубных котлах // Омский научный вестник. 2017. №3(153). С.74-77.
10. Корюкин С.С. Исследование влияния ультразвука на выпадение накипи в теплообменном аппарате // Вестник науки и творчества. 2021. №5(65). С.40-42.
11. Глотов М.В., Позынич К.П., Захарычев С.П. Очистка от накипи теплотехнического оборудования и трубопроводов горячего водоснабжения термодинамически активированной водой // Вестник ТОГУ. 2017. №2(45). С.81-90.
12. Антропов Г.В., Трушина И.В. Применение ультразвука для предотвращения накипеобразования // Вестник СГТУ. 2007. №3(27), Вып.2. С.72-74.
13. Зарипов Ф.А., Павлов Г.И., Накоряков П.В., Кочергин А.В., Абраковнов А.П., Валеева К.А. Способ противонакипной обработки водогрейных и паровых котлов и устройство для его осуществления. Патент РФ на изобретение №2789413. 02.02.2023. Бюл. №4. Доступно по: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
14. Ларочкина Н.М., Дерунов А.Н., Данилов В.Н., Муравская И.И. Эффективные методы предупреждения аварий паровых котлов // Современная техника и технологии. 2016. №2 Доступно по: <https://technology.snauka.ru/2016/02/9535>. Ссылка активна на 26 февраля 2025.
15. Пирогов Г.В., Богловский А.В. Применение ультразвука для ограничения накипеобразования в теплосетях // Новости теплоснабжения. 2010. №2(114). С.41-43.
16. Ланин В.Л., Дежкунов Н.В., Томаль В.С. Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2008. № 2. С.51-55.
17. Васильев А.А., Дромиади А.А., Иванов Д.С., Ирдынцев Г.Л., Толстой К.В. Межкристаллическая коррозия и ее развитие на основных элементах котла на примере парового двухбарабанного котла типа ДЕ-25-24-380-ГМО // Научные труды КубГТУ. 2015. №9. С. 1-8.
18. Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Уваров В.А., Минко В.А. Влияние накипных отложений на температурный режим в каналах теплообменников пластинчатого типа // Вестник МГСУ. 2023. Т.18. Вып.5. С.737-746.

Авторы публикации

Павлов Григорий Иванович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Специальных технологий в образовании» (СТВО) Казанского национального исследовательского технического университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). *ORCID*: <http://orcid.org/0000-0003-0825-0875>. *Email*: pavlov16@mail.ru

Ситников Олег Рудольфович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Специальных технологий в образовании» (СТВО) Казанского национального исследовательского

технического университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6138-3645>. Email: Halmer169990@mail.ru

Накоряков Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Специальных технологий в образовании» (СТВО) Казанского национального исследовательского технического университет им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). Email: nakorjakov@mail.ru

References

1. Manufacturing company "Spetsgazprom". Boiler installations. Available at: <https://www.specgazprom.ru/articles/stati-po-zhkh-i-kotelnomu-oborudovaniyu/kotelnye-ustanovki>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
2. Ponomareva D.S., Berezina K.V. Predotvrashchenie povrezhdenii kotel'nykh trub / Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnaya initsiativa: problemy i perspektivy vnedreniya innovatsionnykh reshenii», 15 avgusta 2023 g., SGTU imeni Gagarina Yu.A., Sterlitamak. Ufa: AMI, 2023. S. 115-117.
3. Zaripov F.A., Pavlov G.I., Sitnikov O.R., Nakoryakov P.V. On reducing the impact of acoustic vibrations on the operation of flow meters in hydraulic systems of power plants // 7-th International conference «Dynamics and vibroacoustics of machines» (DVM'2024). 4-6 September 2024. Samara. 2024 IEEE. Available at: <https://repo.ssau.ru/handle/DVM-2022/444/simple-search?filterquery=Зарипов+Ф.+А.%2C+Павлов+Г.+И.%2C+Ситников+О.+Р.%2C+Накоряков+П.+В.&filtername=author&filtertype>equals>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
4. Strel'nikov A.S., Batukhtin A.G., Minakov A.A., Kobylkin M.V. Ochistka poverkhnostei nagreva kotloagregata // Sbornik statei XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: «Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov». 26–28 noyabrya 2014 g., Chita : Zab. gos. un-t, 2014. S. 155-161.
5. Ovchinnikov G.L. Umyagchenie vody pri vodopodgotovke. Spetsializirovannyi resurs Air Water Therm. Available at: <https://masters.donntu.ru/2019/fkita/burda/library/article03.htm>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
6. Dudochkin I.B., Ovchinnikov Ya.V., Kukhta M.V. Prichiny poyavleniya vnutrennikh zagryaznenii v parovykh i vodogreinykh kotlakh // Sbornik nauchnykh trudov po itogam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye voprosy nauki i tekhniki», 7 aprelya 2015 g., Samara. №2. S.162-164.
7. Vasil'eva L.V. Formirovanie elementnogo i fazovogo sostava otlozhenii v teploenergeticheskom oborudovanii v usloviyakh razlichnykh skhem vodopodgotovki i sposoby ikh udaleniya. Dis. kand. khim. nauk. Krasnodar, 2017. 136s. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01008711596>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
8. Nikolaevskii N.N. Ul'trazvukovoi metod predotvrashcheniya nakipeobrazovaniya // Novosti teplosnabzheniya. 2002. № 10(26). S. 44-45.
9. Terebilov S.V., Mikhailov A.G., Slobodina E.N., Vasil'ev A.V. Obrazovanie otlozhenii nakipi na poverkhnostyakh nagreva v zharotrubnykh kotlakh // Omskii nauchnyi vestnik. 2017. №3(153). S.74-77.
10. Koryukin S.S. Issledovanie vliyaniya ul'trazvuka na vypadenie nakipi v teploobmennom apparate // Vestnik nauki i tvorchestva. 2021. №5(65). S.40-42.
11. Glotov M.V., Pozynich K.P., Zakharychev S.P. Ochistka ot nakipi teplotekhnicheskogo oborudovaniya i truboprovodov goryachego vodosnabzheniya termodinamicheski aktivirovannoi vodoi // Vestnik TOGU. 2017. №2(45). S.81-90.
12. Antropov G.V., Trushina I.V. Primenenie ul'trazvuka dlya predotvrashcheniya nakipeobrazovaniya // Vestnik SGTU. 2007. №3(27), Vyp.2. S.72-74.
13. Zaripov F.A., Pavlov G.I., Nakoryakov P.V., Kochergin A.V., Abrakovnov A.P., Valeeva K.A. Sposob protivonakipnoi obrabotki vodogreinykh i parovykh kotlov i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya. Patent RUS №2789413. 02.02.2023. Byul. №4. Available at: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
14. Larochkina N.M., Derunov A.N., Danilov V.N., Muravskaya I.I. Effektivnye metody preduprezhdeniya avarii parovykh kotlov // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. 2016. №2 Available at: <https://technology.snauka.ru/2016/02/9535>. Accessed: 26 Feb 2025. (In Russ).
15. Pirogov G.V., Boglovskii A.V. Primenenie ul'trazvuka dlya ogranicheniya nakipeobrazovaniya v teplosetyakh // Novosti teplosnabzheniya. 2010. №2(114). S.41-43.
16. Lanin V.L., Dezhkunov N.V., Tomal' V.S. Pribornoe obespechenie izmereniya parametrov ul'trazvukovykh vozdeistvii v tekhnologicheskikh protsessakh // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature. 2008. № 2. S.51-55.

17. Vasil'ev A.A., Dromiadi A.A., Ivanov D.S., Irdyncheev G.L., Tolstoi K.V. Mezhkristallicheskaya korroziya i ee razvitiye na osnovnykh elementakh kotla na primere parovogo dvukhbarabannogo kotla tipa DE-25-24-380-GMO // Nauchnye trudy KubGTU. 2015. №9. S. 1-8.

18. Elistratova Yu.V., Seminenko A.S., Uvarov V.A., Minko V.A. Vliyanie nakipnykh otlozhenii na temperaturnyi rezhim v kanalakh teploobmennikov plastinchatogo tipa // Vestnik MGSU. 2023. T.18. Vyp.5. S.737-746.

Authors of the publication

Grigory I. Pavlov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0003-0825-0875>. *Email:* pavlov16@mail.ru

Oleg R. Sitnikov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia. *ORCID:* <http://orcid.org/0000-0002-6138-3645>. *Email:* Halmer169990@mail.ru

Pavel V. Nakoryakov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, Kazan, Russia. *Email:* nakorjakov@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Получено **30.04.2025 г.**

Отредактировано **29.05.2025 г.**

Принято **18.06.2025 г.**