

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК / TECHNICAL SERVICE IN AGRICULTURE

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 621.793:669.059.9

DOI 10.34677/1728-7936-2019-3-51-58

АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ АПК РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

КРАВЧЕНКО ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор¹

E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

КУЗНЕЦОВ ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор²

E-mail: kentury@rambler.ru

СИРОТОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИСЛАВОВИЧ, докт. техн. наук, профессор³

E-mail: sirotov@mgul.ac.ru

ГЛИНСКИЙ МАКСИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ, инженер¹

E-mail: maximagl@yandex.ru

ПЕТРОВСКАЯ ЕЛЕНА АНДРЕЕВНА, инженер¹

E-mail: ea-petrovskaya@rambler.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

² Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина; ул. Генерала Родина, 69, Орел, 302019, Российская Федерация

³ Мытищинский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана; ул. 1-я Институтская, 1, Московская обл., г. Мытищи, 141005, Российская Федерация

Анализ существующих технологий и способов ремонта кожухотрубных теплообменных аппаратов (КТА) позволяет сделать вывод о необходимости выработки нового подхода к организации ремонта и восстановления теплообменных трубок КТА. Одним из перспективных способов восстановления и защиты трубок КТА является их обработка полимерными компаундами, в частности, – терморассеивающими пластмассами, полимерами с многократно увеличенной теплопроводностью. В ходе проведенных исследований предложен способ защиты от коррозии и восстановления поверхностей КТА, заключающийся в использовании жидких реакционноспособных олигомеров или мономеров с целью образования покрытия в обрабатываемом контуре без использования специальных внутритрубных устройств. Для инициации отверждения в смежный контур КТА вводится теплоноситель с температурой, равной или превышающей температуру отверждения материала покрытия. Проведено моделирование процесса теплопередачи от теплоносителя к компаунду через разделяющую их стенку, что позволяет установить необходимые требования, предъявляемые к компаунду, для реализации представленного способа. Согласно требованиям предложен компаунд, для отверждения которого представлены рекомендации по использованию латентных отвердителей на основе кислот Льюиса в интервалах температур 80...100°C и 120...140°C. Предложенный способ восстановления и защиты теплообменных трубок КТА позволяет наносить равномерное покрытие с заданной эластичностью, стойкое к линейному расширению металла трубок с толщиной, достаточной для заделки сквозных дефектов.

Ключевые слова: антикоррозионная защита, теплообменное оборудование, метод ремонта, прочность, эксплуатация, ремонтно-восстановительные покрытия, компаунд, коррозионное растрескивание под напряжением.

Формат цитирования: Кравченко И.Н., Кузнецов Ю.А., Сиротов А.В., Глинский М.А., Петровская Е.А. Антикоррозионная защита теплообменного оборудования перерабатывающих производств АПК ремонтно-восстановительными покрытиями // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2019. N3(91). С. 51-58. DOI: 10.34677/1728-7936-2019-3-51-58.

ANTICORROSION PROTECTION OF THE HEAT-EXCHANGE EQUIPMENT OF FARM PROCESSING ENTERPRISES WITH REPAIR AND RECOVERY COATINGS

IGOR N. KRAVCHENKO, DSc (Eng), Professor¹

E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

YURI A. KUZNETSOV, DSc (Eng), Professor²

E-mail: kentury@rambler.ru

ALEKSANDR V. SIROTOV, DSc (Eng), Professor³

E-mail: sirotov@mgul.ac.ru

MAKSIM A. GLINSKIY, Engineer¹

E-mail: maximagl@yandex.ru

YELENA A. PETROVSKAYA, Engineer¹

E-mail: ea-petrovskaya@rambler.ru

¹Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127550, Russian Federation

²Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin; Generala Rodina Str., 69, Orel, 302019, Russian Federation

³Mytishchi Branch of Bauman Moscow State Technical University; Institutskaya Str., 1, Moscow Region, Mytishchi, 141005, Russian Federation

Analysis of repair methods of shell-and-tube heat exchangers (STHE) has shown the necessity to develop a new approach to the repair and reconditioning organization of STHE heat transfer tubes. One of the promising ways to restore and protect STHE tubes is to treat them with polymer compounds especially with heat-dissipating plastics – polymers with greatly increased thermal conductivity. In the research, a method for corrosion protection and restoration of STHE surfaces is proposed. This method consists in using liquid reactive oligomers or monomers to form a coating in the treated circuit without using special in-tube devices. To initiate curing, a coolant with a temperature equal to or higher than the curing temperature of the coating material is introduced into the adjacent STHE circuit. Heat transfer process was modeled from the coolant to the material (compound) through the separating wall, which allowed to determine the requirements for the compound necessary to implement the discussed method. According to the established requirements, the authors have proposed a compound and its curing technology with recommendations on the use of latent hardeners based on Lewis acids in the temperature ranges of 80...100°C and 120...140°C. The proposed method of protecting and reconditioning STHE tubes allows to apply a uniform coating with a predefined elasticity, resistant to linear expansion of the tube metal and with a thickness sufficient to seal through-wall defects.

Key words: anticorrosive protection, heat exchange equipment, repair method, strength, use, repair and restoration coatings, compound, stress corrosion cracking.

For citation: Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu. A., Sirotov A.V., Glinskiy M.A., Petrovskaya Ye.A. Anticorrosion protection of the heat-exchange equipment of farm processing enterprises with repair and recovery coatings. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2019; 3(91): 51-58. DOI: 10.34677/1728-7936-2019-3-51-58. (In Rus.).

Введение. Теплообменное оборудование находит широкое применение в самых различных технологических процессах предприятий АПК для нагрева, охлаждения, пастеризации продуктов, подготовки технических сред и т.п. [1-4]. В зависимости от характера решаемых задач и обрабатываемых продуктов, в различных отраслях АПК применяют следующие виды теплообменного оборудования (рис. 1):

- пластинчатые разборные теплообменники различных конфигураций (рис. 1, а);
- пластинчатые неразборные теплообменники: сварные и меднопаяные (рис. 1, б);
- скребковые теплообменники с вращающимся ротором и неподвижным теплообменным цилиндром (рис. 1, в);
- кожухотрубные и кожухопластинчатые теплообменники (рис. 1, г);
- спиральные и другие виды теплообменников (рис. 1, д).

Проблемам обеспечения безопасной эксплуатации теплообменного оборудования посвящен ряд публикаций [5-7], в которых указывается, что возрастающее количество отказов КТА свидетельствует о недостаточной разработке системы планово-предупредительного ремонта данного вида оборудования.

Повреждаемость КТА (рис. 1, г) определяется, как правило, состоянием их трубных систем (рис. 2).

Восстановление работоспособности КТА при обнаружении течи в трубном пучке производится, в основном, исключением дефектных труб из процесса теплообмена путём установки заглушек.

В ряде случаев достаточно заменить трубный пучок (рис. 3), при этом корпус аппарата и присоединительные линии по теплоносителям не меняются. Стоимость проведения таких работ для КТА с большим количеством теплообменных трубок достаточно высока.

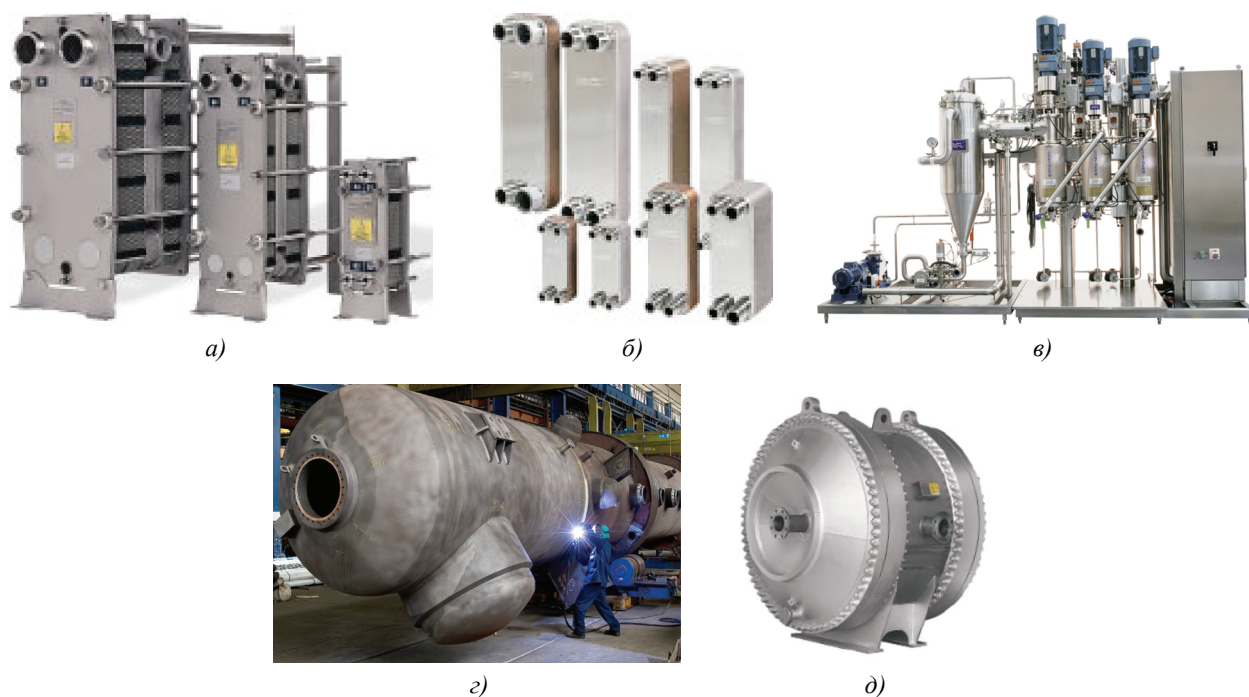


Рис. 1. Виды теплообменного оборудования, применяемого в АПК:

- а) пластинчатые разборные теплообменники;
- б) пластинчатые неразборные теплообменники (сварные и меднопаяные); в) скребковые теплообменники;
- г) кожухотрубные и кожухопластинчатые теплообменники; д) спиральные теплообменники

Fig. 1. Types of heat exchange equipment used in agriculture:

- a) separable plate heat exchangers; b) non-separable plate heat exchangers (welded and copper-brazed);
- c) scraper-type heat exchangers; d) shell-and-tube and shell-and-plate heat exchangers; d) spiral heat exchangers



Рис. 2. Оконцовки трубок трубного пучка и соединение трубок с трубной доской

Fig. 2. Tube termination of tube bundle and tube connection with tube plates

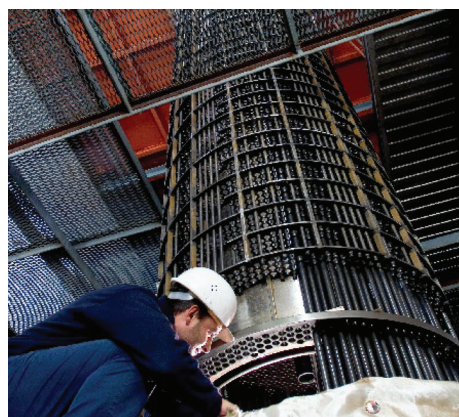


Рис. 3. Замена трубного пучка кожухотрубного теплообменного аппарата

Fig. 3. Replacing the tube bundle of a shell-and-tube heat exchanger

Цель исследования – повышение эффективности эксплуатации теплообменного оборудования перерабатывающих производств АПК за счёт внедрения перспективных способов антикоррозионной защиты теплообменных аппаратов ремонтно-восстановительными материалами. **Задача исследования** – совершенствование технологий ремонта трубных пучков КТА.

Материал и методы. Анализ способов ремонта КТА показал, что существующие технологии имеют ряд ограничений [8-10]. Так, например, способ замены повреждённой трубы в теплообменнике [11] заключается в закреплении специального устройства, с помощью которого

производится извлечение повреждённой трубы с одновременным протягиванием новой трубы с последующим закреплением её в трубных досках.

Одним из способов восстановления КТА, вышедших из строя вследствие эрозии труб и коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), является технология in-situ. Данный метод ремонта включает установку металлических дублеров трубок по месту разрушения и их гидравлическую раздачу до контакта «металл-металл».

Существующие способы ремонта достаточно технологичны [8-10], однако необходимо большое пространство для обеспечения возможности беспрепятственного

извлечения и установки труб (вставок). При этом длина используемых теплообменных труб на теплообменниках средних размеров составляет от 2,5 до 3 м, и для производства ремонта КТА с применением указанных способов потребуется такое же количество незанятого пространства.

Практика показывает, что операции по демонтажу технологических трубопроводов и крышек КТА являются весьма трудоёмкой задачей. Известны способы, позволяющие производить ремонт поверхностей труб без демонтажа КТА и использования габаритных комплектующих [12-14]. Вместе с тем не исключается необходимость неполного разбора КТА. В указанных способах используются для защиты от коррозии и восстановления поверхностей трубок полимерный компаунд, который размещают на внутренней поверхности трубки с помощью внутритрубного устройства и отверждают на поверхности обрабатываемой трубки.

Данные способы обладают рядом недостатков и ограничений: необходимостью разборки теплообменника, проведением многократных манипуляций для обработки

полимерным компаундом отдельно каждой трубки трубного пучка, обязательностью разработки и изготовления внутритрубных устройств соответствующих диаметров для каждого типоразмера теплообменных трубок.

Рассмотренные выше способы не могут быть применены для нанесения покрытий на внешние поверхности трубок трубного пучка КТА, а также на поверхности трубок с внутренним оребрением. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о необходимости выработки нового подхода к организации подобного рода работ.

В промышленности, с целью защиты и восстановления поверхностей различных деталей машин, широко применяются различные покрытия и материалы, отличающиеся составом, свойствами и способами их нанесения [15-17].

Принимая во внимание конструктивные особенности КТА, условия их эксплуатации, а также требования к минимизации операций по подготовке аппарата к нанесению покрытий, предложена оценка применимости существующих покрытий и методов их нанесения на поверхности деталей [18, 19] (таб.).

Классификация методов нанесения покрытий

Classification of coating methods

Метод нанесения	Разновидность метода
1. Механические	Плакирование. Соединение
2. Напыление	Детонационной пушкой. Электрической дугой. Металлизация. Плазменное. Газопламенное
3. Наплавка	Лазерная. Ручной электросваркой. Сваркой в инертном газе. Плазменной сваркой. Кислородно-ацетиленовой сваркой
4. Физические	Физическое осаждение из газовой фазы. Вакуумные покрытия. Термическое испарение. Распыление. Ионное осаждение
5. Химические	Химическое осаждение из газовой фазы. Осаждение из электролита без наложения электрического поля
6. Электрохимические	В водных растворах. В расплавах солей

Заметим, что приведенные в таблице методы (1), (2) и (3) связаны с непосредственным контактом рабочих инструментов с покрываемой поверхностью и их применение для КТА ограничено, так как в результате сварки образуется замкнутый контур межтрубного пространства, и покрытие внешней поверхности теплообменных трубок становится невозможным.

Применение металлических покрытий элементов КТА электролитическими, гальваническими методами или методами физического (PVD) и химического (CVD) осаждения имеет ряд преимуществ [20-22]:

- создание равномерного покрытия с контролируемой толщиной с возможностью восстановления структурной однородности изношенных и подвергнутых коррозии поверхностей;

- формирование защитного покрытия, служащего анодным протектором по отношению к основному металлу.

- применяемые металлические покрытия являются хорошими проводниками тепла и не препятствуют процессу теплообмена.

Однако наряду с преимуществами имеются и ограничения [23, 24]:

- нанесение металлических покрытий (кроме серебра, золота и платины) на трубки, выполненные из меди,

нецелесообразно ввиду низкой восстановительной активности последней;

- толщина создаваемого покрытия недостаточна для заделки сквозных дефектов;

- возможно нежелательное прямое осаждение;

- нанесение покрытий методом PVD (Physical Vapour Deposition) возможно только на видимую часть поверхности;

- нанесение покрытия на поверхности труб кожухотрубных КТА существующими методами трудоёмко или технически нереализуемо.

Перспективным способом восстановления поверхностей деталей машин и защиты от действия окружающей среды является обработка полимерными компаундами [25-27]. Современные полимерные компаунды создаются с возможностью варьирования физических и химических свойств в зависимости от нужд потребителя. Так, например, терморассеивающие пластмассы – полимеры с многократно увеличенной теплопроводностью – могут, наравне с металлами и их сплавами, использоваться в теплообменной технике.

Использование полимеров для ремонта трубок КТА перспективно при получении покрытия с заданной эластичностью, стойкому к линейному расширению металла трубок или сдерживающим имеющиеся трещиноподобные дефекты, а также при нанесении равномерного

покрытия с толщиной, достаточной для заделки сквозных дефектов (при использовании термореактивных групп олигомеров или мономеров).

Результаты и обсуждение. В ходе исследования, направленного на совершенствование способов ремонта и восстановления поверхностей теплообменного оборудования, предложен способ защиты от коррозии и восстановления поверхностей теплообменника.

Суть способа заключается в нанесении на поверхность стенки, разделяющей смежные контуры теплообменника, покрытия на основе жидких реакционноспособных олигомеров или мономеров. Принципиально новым является введение жидкости или другого текучего вещества на основе жидких реакционноспособных олигомеров или мономеров в трубное пространство теплообменника. Полимеры способны необратимо превращаться в твёрдые, неплавкие, нерастворимые сетчатые полимеры (процесс отверждения) с участием специальных отвердителей и/или в результате взаимодействия реакционноспособных групп олигомеров между собой при достижении температуры отверждения

полимера. При этом в смежный контур, разделенный стенкой от контура с материалом покрытия (межтрубного пространства теплообменника) для инициации отверждения путём передачи тепла через разделяющую стенку, вводят теплоноситель с температурой, равной или превышающей температуру отверждения материала покрытия.

Ввиду неравномерности нагревания материала покрытия отверждение материала инициируется на поверхности покрываемой стенки. При достижении необходимой толщины покрытия выводят теплоноситель из контура или понижают температуру теплоносителя ниже температуры отверждения материала покрытия. Далее выводят из контура оставшийся неотвержденный материал покрытия.

Выбор конкретного материала покрытия в сочетании с отвердителем и другими наполнителями (полимерного компаунда) сводится к оценке способности проведения контролируемой реакции полимеризации и получения покрытия с заданными физическими свойствами.

На рисунке 4 изображен процесс теплопередачи от теплоносителя к компаунду через разделяющую их стенку.

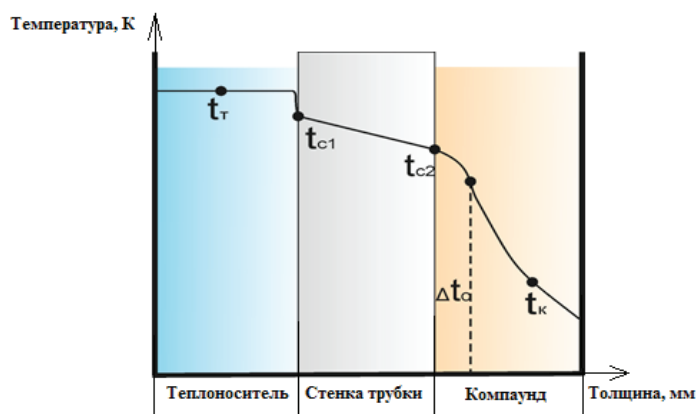


Рис. 4. Теплопередача через плоскую стенку:

t_r – температура теплоносителя; t_{c1} – температура стенки со стороны теплоносителя;
 t_{c2} – температура стенки со стороны компаунда; Δt_0 – требуемый диапазон температуры инициации отверждения;
 t_k – температура компаунда

Fig. 4. Heat transfer through a flat wall:

t_r – coolant temperature; t_{c1} – wall temperature on the heat carrier side; t_{c2} – wall temperature from the compound side;
 Δt_0 – the required range of curing initiation temperature; t_k – compound temperature

При теплопередаче в материале компаунда температурные поля распределяются в соответствии с законом Фурье, образуя изотермические поверхности:

$$\bar{q} = -\lambda \cdot \text{grad} t = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (1)$$

где q – удельный тепловой поток, Вт/м²; λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К); $\text{grad} t$ – градиент температуры, К/м.

Изотермические поверхности друг с другом не пересекаются, они или замыкаются на себе, или кончатся на границе тела. Изменение температуры в теле наблюдается лишь в направлениях, пересекающих эти поверхности (рис. 5).

Соответственно, покрытие образуется только в границах изотермических поверхностей, удовлетворяющих реакции отверждения, которые распределяются в зависимости от разницы температур, геометрии поверхности,

времени и длительности процесса, а также коэффициента теплопроводности компаунда.

Таким образом, для реализации представленного способа необходим компаунд, обладающий рядом свойств: высокой скоростью отверждения; узкой границей инициации отверждения; низким коэффициентом теплопроводности в жидком состоянии; высокой адгезией к материалу поверхности; высокой эластичностью и трещиностойкостью; вязкостью, исключающей конвекцию при нагревании.

Схожий по эксплуатационным требованиям компаунд был разработан для создания новой клеевой композиции холодного отверждения [28]. За счёт введения термоэластопласта компаунд сохраняет высокую эластичность при одновременном повышении ударной вязкости и трещиностойкости. При этом жизнеспособность данного компаунда, ввиду его использования в качестве отвердителя диэтилентриаминометилфенола УП-583Д, ограничена и составляет 20-30 мин.

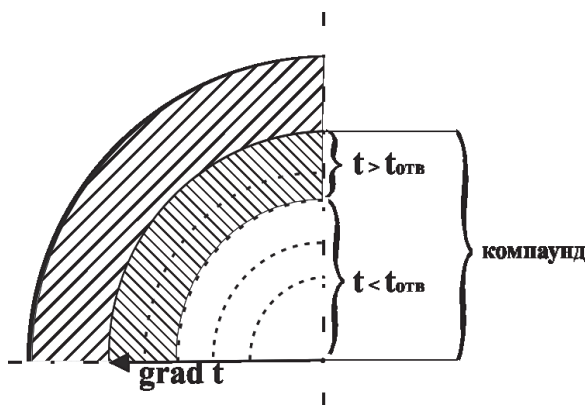


Рис. 5. Изотермы теплового потока (изображена четверть трубки, заполненной компаундом):





— — — линии изотерм;  — стенка трубки;
 — область отверждения компаунда;
 $t_{отв}$ — температура соответствующая старту реакции полимеризации компаунда

Fig. 5. Heat flow isotherms (a quarter of a tube filled with compound is depicted):

— — — isotherm lines;  — a tube wall;
 — a compound curing area;
 $t_{отв}$ — the temperature corresponding to the start of a compound polymerization reaction

Инициация отверждения происходит непосредственно при введении отвердителя и продолжается на разных изотермических поверхностях, что недопустимо при реализации представленного способа.

Условие отверждения материала покрытия на границах изотермической поверхности, непосредственно контактирующей с поверхностью теплообменной трубки и угнетения реакции полимеризации (при понижении температуры ниже температуры отверждения), обуславливает необходимость выбора подходящего отвердителя.

Выводы

1. Наиболее подходящим инициатором отверждения при реализации способа защиты от коррозии и восстановления поверхностей теплообменника, по мнению авторов, являются латентные отвердители на основе кислот Льюиса. Отверждение эпоксидных смол при использовании таких отвердителей как УП-605/1р, УП-605/3 происходит в определенном интервале температур 80...100°C и 120...140°C соответственно.

2. В результате анализа методов нанесения защитно-восстановительных покрытий на внутренние и внешние поверхности теплообменников предложен способ защиты от коррозии и восстановления поверхностей теплообменника, для реализации которого необходимо создание нового полимерного компаунда, отвечающего эксплуатационным требованиям, что является направлением дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Боровков В.М., Калютик А.А., Сергеев В.В. Тепло-техническое оборудование. 2-е изд., испр. М.: Издательский центр «Академия», 2015. 192 с.

2. Иванов А.Н., Белоусов В.Н., Смородин С.Н. Теплообменное оборудование предприятий. СПб: ВШТЭ СПбГУПТД, 2016. 184 с.

3. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Голубев И.Г., Немущая Л.А. [и др.]. Научные разработки по использованию нанотехнологий в АПК: каталог. М.: ФГБНУ «Росинформротех», 2008. 152 с.

4. Федоренко В.Ф., Ерохин М.Н., Балабанов В.И., Буклагин Д.С. [и др.]. Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе. М.: ФГБНУ «Росинформротех», 2011. 312 с.

5. Мурманский Б.Е. Разработка и реализация концепции комплексной системы повышения надежности состояния паротурбинной установки // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 1 (28). С. 44-48.

6. Бродов Ю.М., Аронсон К.Э., Рябчиков А.Ю. [и др.]. Повышение эффективности теплообменных аппаратов паротурбинных установок за счет применения профильных витых трубок // Проблемы энергетики. 2016. № 7-8. С. 72-78.

7. Лепеш Г.В., Лунева С.К. Повышение эффективности теплообменных аппаратов // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2017. № 1 (39). С. 42-57.

8. Зезюлин Ю.В., Седельников А.В., Иголкин А.И. Восстановление труб теплообменных аппаратов методом установки трубных вставок // Химическая техника. 2012. № 2. С. 7-9.

9. Седельников А.В. Технология ремонта и модернизации АВО и кожухотрубных ТОА при помощи металлических трубных вставок // Химическая техника. 2017. № 1. С. 28-30.

10. Спиригин В.В., Панкин Д.А., Ерофеев М.Н. [и др.]. Технология ремонта и восстановления трубок теплообменного оборудования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 3. С. 11-15.

11. Способ замены поврежденной трубы в теплообменнике: А.с. SU947570. МПК F22B37/58, F28F 11/00 / Ю.В. Зайцев, А.В. Белов, П.С. Семенов, А.Г. Палагушин [и др.]. № 2980332; заявл. 12.09.1980; опубл. 30.07.1982. Бюл. № 28.

12. Способ защиты от коррозии и отложений накипи и восстановления трубок теплообменного оборудования и устройство для осуществления этого способа: Патент RU № 2186633, МПК B05C7/06 / В.А. Головин, В.Т. Кузнец, К.В. Кублицкий, А.Б. Ильин. № 2001121975/12; заявл. 07.08.2001; опубл. 10.08.2002. Бюл. № 22.

13. Система и способ покрытия труб: Патент RU № 2343999, МПК B05C7/08 / Хорн Майкл Дж. № 2006143568/12; заявл. 17.06.2005; опубл. 20.01.2009. Бюл. № 2.

14. Улюкина Е.А. Методы борьбы с коррозией теплоэнергетического оборудования котельных и тепловых сетей в АПК // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина» 2018. № 5(87). С. 45-50. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-5-45-50.

15. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Глинский М.А. Способы использования сверхвысокомолекулярного полиэтилена для защиты технологического оборудования, конструкций и деталей машин // Отчет о НИР. Шифр «Полиэтилен»; № 05-06/294. Балашиха: ВТУ при Спецстрое России, 2011. 82 с.

16. Кравченко И.Н., Кононенко А.С., Гладков В.Ю., Глинский М.А. Повышение эксплуатационных свойств восстанавливаемых деталей дорожно-строительных и почвообрабатывающих машин нанесением полимерных покрытий

// Отчет о НИР. Шифр «Нанокomпозиция»; № 10/1-2-77. Балашиха: ВТУ при Спецстрое России, 2013. 118 с.

17. Кравченко И.Н., Глинский М.А. Обеспечение долговечности подшипниковых узлов барабанных сушилок с использованием металлополимерных композиционных покрытий // Сборник научных трудов 5-й Международной науч.-практ. конференции «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование»; Т. 1. Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 314-317.

18. Яппаров А.Х., Коваленко Л.В. [и др.]. Научное обоснование получения наноструктурных и нанокomпозитных материалов и технологии их использования в сельском хозяйстве // Под общ. ред. А.Х. Яппарова и Л.В. Коваленко. Казань: Центр инновационных технологий, 2014. 304 с.

19. Кравченко И.Н., Пузряков А.Ф., Корнеев В.М. [и др.]. Технологические процессы в техническом сервисе машин и оборудования. М.: ИНФРА-М, 2017. 346 с.

20. Kuznetsov Yu., Kosenko A., Lugovskoy A. Studies on corrosion resistance of coatings formed by plasma electrolytic oxidation on aluminum alloys / The optimization of the composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano and amorphous materials // Proceedings of the tenth Israeli-Russian Bi-National Workshop 2011. Jerusalem, Israel, 2011. Pp. 297-307.

21. Kuznetsov Y. Corrosion testing of coatings being obtained by plasma electrolytic oxidation / Proceedings of the union of scientists // Ruse. Fifth conference «Energy efficiency and agricultural engineering». Ruse, Bulgaria, 2013. Pp. 554-559.

22. Определение параметров CVD-процесса (ПП «STAT CVD1.0»): Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014662618 / И.Н. Кравченко, А.С. Алмосов, А.А. Клименко. Заявка № 2014660512 от 16.10.2014; зарег. 04.12.2014; опубл. 20.12.2014.

23. Kravchenko I., Chupyatov N., Kolomeichenko A. Providing a chemically stable interaction of components of fibrous composite materials based adhesive compositions of cold hardening // Journal of Scientific Society: Tractors and power machines. 2014. Т. 19. № 2. Pp. 59-64.

24. Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Чупятков Н.Н. Технологическое оснащение процесса получения металлических покрытий CVD-методом металлоорганических соединений // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2018. № 6(88). С. 40-44. DOI: 10.34677/1728-7936-2018-6-40-44

25. Кравченко И.Н., Клименко А.А., Мясников А.В. Обоснование выбора герметиков для изоляции неподвижных фланцевых соединений // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. № 8. С. 7-12.

26. Кравченко И.Н., Кузнецов Ю.А., Сиротов А.В. [и др.]. Перспективы применения металлополимерных покрытий для эффективной защиты деталей почвообрабатывающих машин // Техника и оборудование для села. 2017. № 7 (241). С. 38-43.

27. Ильин А.Б., Щелков В.А., Добрян С.А. [и др.]. Полимерные покрытия для защиты теплообменных трубок конденсаторов пара от коррозии и солевых отложений // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. Вып. 5 (71). С. 69-75. DOI: 10.23670/IRJ.2018.71.037.

28. Клеевая композиция холодного отверждения: Патент RU № 2527787, МПКС 09J 163/02 / И.Н. Кравченко, А.А. Клименко, М.Н. Ерофеев, Н.Ю. Лузан. № 2013105634/05; заявл. 11.02.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 25.

References

1. Borovkov V.M., Kalyutik A.A., Sergeyev V.V. Teplotekhnicheskoye oborudovaniye [Thermotechnical equipment]. 2nd ed., rev. and ext. Moscow, Izdatel'skiy tsentr "Akademiya", 2015: 192. (In Rus.)

2. Ivanov A.N., Belousov V.N., Smorodin S.N. Teploobmennoye oborudovaniye predpriyatiy [Heat exchange equipment of enterprises]. St. Petersburg, VSHTe SPb-GUPTD, 2016. 184 p. (In Rus.)

3. Fedorenko V.F., Buklagin D.S., Golubev I.G., Neme-nushchaya L.A. [et al.]. Nauchnyye razrabotki po ispol'zovaniyu nanotekhnologiy v APK [Scientific development on the use of nanotechnology in agriculture]. Katalog. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2008: 152. (In Rus.)

4. Fedorenko V.F., Yerokhin M.N., Balabanov V.I., Buklagin D.S. [et al.]. Nanotekhnologii i nanomaterialy v agropromyshlennom komplekse [Nanotechnologies and nanomaterials in agriculture]. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2011: 312. (In Rus.)

5. Murmanskii B.Ye. Razrabotka i realizatsiya kontseptsii kompleksnoy sistemy povysheniya nadezhnosti sostoyaniya paroturbinnoy ustanovki [Development and implementation of the concept of an integrated system to improve the reliability of a steam turbine installation]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2015; 1 (28): 44-48. (In Rus.)

6. Brodov Yu.M., Aronson K.E., Ryabchikov A.Yu. [et al.]. Povysheniye effektivnosti teploobmennyykh apparatov paroturbinnyykh ustanovok za schet primeneniya profil'nykh vitykh trubok [Improving the efficiency of heat exchangers of steam turbine installations through the use of shaped twist-ed tubes]. *Problemy energetiki*, 2016; 7-8: 72-78. (In Rus.)

7. Lepesh G.V., Luneva S.K. Povysheniye effektivnosti teploobmennyykh apparatov [Improving the efficiency of heat exchangers]. *Tekhniko-tekhnologicheskkiye problemy servisa*, 2017; 1 (39): 42-57. (In Rus.)

8. Zezyulin Yu.V., Sedel'nikov A.V., Igolkin A.I. Vosstanovleniye trub teploobmennyykh apparatov metodom ustanovki trubnykh vstavok [Restoration of pipes of heat exchangers by installing pipe inserts]. *Khimicheskaya tekhnika*, 2012; 2: 7-9. (In Rus.)

9. Sedel'nikov A.V. Tekhnologiya remonta i modernizatsii AVO i kozhukhotrubnykh TOA pri pomoshchi metallicheskih trubnykh vstavok [Technology of repair and modernization of air-cooled and shell-and-tube heat exchangers using metal tube inserts]. *Khimicheskaya tekhnika*, 2017; 1: 28-30. (In Rus.)

10. Spiriyagin V.V., Pankin D.A., Yerofeyev M.N. [et al.]. Tekhnologiya remonta i vosstanovleniya trubok teploobmennogo oborudovaniya [Technology of repair and restoration of tubes of heat exchange equipment]. *Remont. Vosstanovleniye. Modernizatsiya*, 2019; 3: 11-15. (In Rus.)

11. Zaytsev Yu.V., Belov A.V., Semenov P.S., Palagushin A.G. [et al.]. Sposob zameny povrezhdennoy truby v teploobmennike [Method for replacing a damaged pipe in a heat exchanger]: Author's certificate SU947570, IPC F22B37/58, F28F 11/00. No. 2980332, 1982. (In Rus.)

12. Golovin V.A., Kuznets V.T., Kublitskiy K.V., Il'in A.B. Sposob zashchity ot korrozii i otlozheniy nakipi i vosstanovleniya trubok teploobmennogo oborudovaniya i ustroystvo dlya osushchestvleniya etogo sposoba [The method of protection against corrosion and scale deposits and restoration of tubes of heat exchange equipment and a device

for implementing this method]: Patent No. 2186633 Russia, IPC B05C7/06. No. 2001121975/12, 2002. (In Rus.)

13. Khorn Maykl Dzh. Sistema i sposob pokrytiya trub [Pipe coating system and method]: Patent No. 2343999 Russia, IPC B05C7/08. No. 2006143568/12, 2009. (In Rus.)

14. Ulyukina Ye.A. Metody bor'by s korroziiyey teploenergeticheskogo oborudovaniya kotel'nykh i teplovykh setey v APK [Methods of preventing corrosion of heat-and-power equipment of boiler and heat supply systems in agriculture]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2018; 5(87): 45-50. DOI: 10.26897/1728-7936-2018-5-45-50. (In Rus.)

15. Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Glinskiy M.A. Sposoby ispol'zovaniya sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena dlya zashchity tekhnologicheskogo oborudovaniya, konstruksiy i detaley mashin [Methods of using ultra-high molecular weight polyethylene for the protection of process equipment, structures and machine parts]. *Otchet o NIR. Shifr "Polietilen"*; No. 05-06/294. Balashikha: VTU pri Spetsstroye Rossii, 2011: 82. (In Rus.)

16. Kravchenko I.N., Kononenko A.S., Gladkov V.Yu., Glinskiy M.A. Povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv vostanavlivayemykh detaley dorozhno-stroitel'nykh i pochvoobrabatyvayushchikh mashin nanoseniyem polimernykh pokrytiy [Improving the performance properties of the restored parts of road-building and tillage machines by applying polymer coatings]. *Otchet o NIR. Shifr "Nanokompozitsiya"*; No. 10/1-2-77. Balashikha: VTU pri Spetsstroye Rossii, 2013: 118. (In Rus.)

17. Kravchenko I.N., Glinskiy M.A. Obespecheniye dolgovechnosti podshipnikovyx uzlov barabannykh sushilok s ispol'zovaniyem metallopolimernykh kompozitsionnykh pokrytiy [Ensuring the durability of the bearing assemblies of drum dryers using metal-polymer composite coatings]. *Sbornik nauchnykh trudov 5th Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Kachestvo produktsii: kontrol", upravleniye, povysheniye, planirovaniye"* Vol. 1. Kursk: Izdvo ZAO "Universitetskaya kniga", 2018: 314-317. (In Rus.)

18. Yapparov A.Kh., Kovalenko L.V. [et al.]. Nauchnoye obosnovaniye polucheniya nanostrukturnykh i nanokompozitnykh materialov i tekhnologii ikh ispol'zovaniya v sel'skom khozyaystve [Scientific grounds for obtaining nanostructured and nanocomposite materials and technology for their use in agriculture]. Ed.by. A.Kh. Yapparov and L.V. Kovalenko. Kazan': Tsentri innovatsionnykh tekhnologiy, 2014: 304. (In Rus.)

19. Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Korneyev V.M. [et al.]. Tekhnologicheskiye protsessy v tekhnicheskome servise mashin i oborudovaniya [Technological processes in technical service of machinery and equipment]. Moscow, INFRA-M, 2017: 346. (In Rus.)

20. Kuznetsov Yu., Kosenko A., Lugovskoy A. Studies on corrosion resistance of coatings formed by plasma electrolytic

oxidation on aluminum alloys. *The optimization of the composition, structure and properties of metals, oxides, composites, nano and amorphous materials. Proceedings of the tenth Israeli-Russian Bi-National Workshop 2011*. Jerusalem, Israel, 2011: 297-307.

21. Kuznetsov Yu. Corrosion testing of coatings being obtained by plasma electrolytic oxidation. *Proceedings of the union of scientists. Ruse. Fifth conference «Energy efficiency and agricultural engineering»*. Ruse, Bulgaria, 2013: 554-559.

22. Kravchenko I.N., Almosov A.S., Klimenko A.A. Opre-deleniye parametrov CVD-protsesta (RP "STAT CVD1.0") [Determining the parameters of the CVD process (CP "STAT CVD1.0")]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM No. 2014662618 [Certificate of PC program registration No. 2014662618]*, 2014. (In Rus.)

23. Kravchenko I., Chupyatov N., Kolomeichenko A. Providing a chemically stable interaction of components of fibrous composite materials based on adhesive compositions of cold hardening. *Journal of Scientific Society. Tractors and power machines*. 2014. Vol. 19. No. 2. Pp. 59-64.

24. Yerokhin M.N., Kazantsev S.P., Chupyatov N.N. Tekhnologicheskoye osnashcheniye protsesta polucheniya metallicheskikh pokrytiy CVD-metodom metalloorganicheskikh soyedineniy [Technological equipment for the production of metal coatings by the CVD method of organometallic compounds]. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering*, 2018; No. 6 (88): 40-44. DOI: 10.34677/1728-7936-2018-6-40-44. (In Rus.)

25. Kravchenko I.N., Klimenko A.A., Myasnikov A.V. Obosnovaniye vybora germetikov dlya izolyatsii nepodviznykh flantsevykh soyedineniy [Justification of the choice of sealants to isolate fixed flanges]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2013; 8: 7-12. (In Rus.)

26. Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu.A., Siroto A.V. [et al.]. Perspektivy primeneniya metallopolimernykh pokrytiy dlya effektivnoy zashchity detaley pochvoobrabatyvayushchikh mashin [Prospects for the use of metal-polymer coatings for the effective protection of tillage machine parts]. *Tekhnika i oborudovaniye dlya sela*, 2017; 7 (241): 38-43. (In Rus.)

27. Il'in A.B., Shchelkov V.A., Dobriyan S.A. [et al.]. Polimernyye pokrytiya dlya zashchity teploobmennyykh trubok kondensatorov para ot korrozii i soletozheniy [Polymer coatings to protect heat exchange tubes of steam condensers from corrosion and scaling]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2018; 5 (71): 69-75. DOI: 10.23670/IRJ.2018.71.037. (In Rus.)

28. Kravchenko I.N., Klimenko A.A., Yerofeyev M.N., Luzan N.Yu. Kleyevaya kompozitsiya kholodnogo otverzheniya [Cold glue adhesive composition]. Patent No. 2527787 Russia, IPC C09J 163/02. No. 2013105634/05, 2014. (In Rus.)

Критерии авторства

Кравченко И.Н., Кузнецов Ю.А., Сиротов А.В., Глинский М.А., Петровская Е.А. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Кравченко И.Н., Кузнецов Ю.А., Сиротов А.В., Глинский М.А., Петровская Е.А. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила 18.03.2019

Contribution

Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu.A., Siroto A.V., Glinskiy M.A., Petrovskaya Ye.A. carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu.A., Siroto A.V., Glinskiy M.A., Petrovskaya Ye.A. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received on March 18, 2019