

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Некоммерческое акционерное общество
«Алматинский университет энергетики и связи имени
Гумарбека Даукеева»**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»**

**ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

**Международная научно-техническая конференция
(Алматы, Казань, 20-21 октября 2022 г.)**

Электронный сборник научных статей по материалам конференции

В трех томах

Том 1

Алматы, Казань

2023

УДК 620+004+378
ББК 31.1+32.81+74.48
М43

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии»
Национального исследовательского университета «МЭИ» К.В. Суслов

д-р экон. наук, зав. сектором «Экономика энергетики» Института энергетики Национальной
академии наук Беларуси Зорина Т.Г.

Редакционная коллегия:

Э.Ю. Абдуллазянов, С.С. Сагинтаева, И.Г. Ахметова, А.А. Саухимов, Ю.С. Валеева,
Р.С. Зарипова, Ж.Б. Суйменбаева

М43 Международная научно-техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование»: электронный сборник научных статей по материалам конференции: [в 3 томах] / ред.кол. Э.Ю. Абдуллазянов, С.С. Сагинтаева, И.Г. Ахметова, А.А. Саухимов, Ю.С. Валеева, Р.С. Зарипова, Ж.Б. Суйменбаева. – Казань: КГЭУ, 2023. – Т. 1. – 621 с.

ISBN 978-5-89873-615-6 (т. 1)
ISBN 978-5-89873-618-7

В электронном сборнике представлены научные статьи по материалам Международной научно-технической конференции «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование» по следующим научным направлениям:

1. Теплоэнергетика и теплотехнологии;
2. Электроэнергетика;
3. Радиотехника, электроника и телекоммуникации;
4. Энергообеспечение сельского хозяйства;
5. Промышленная и экологическая безопасность;
6. Математическое моделирование и системы управления;
7. Информационные технологии и кибербезопасность;
8. Космическая инженерия и робототехника;
9. Социально-политическое и культурное развитие Евразии;
10. Экономика знаний как фактор инновационного развития высшего образования.

Предназначены для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в области энергетики, а также для обучающихся образовательных учреждений энергетического профиля.

Статьи публикуются в авторской редакции. Ответственность за содержание статей возлагается на авторов.

УДК 620+004+378
ББК 31.1+32.81+74.48

ISBN 978-5-89873-615-6 (т. 1)
ISBN 978-5-89873-618-7

© КГЭУ, 2023

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, СОДЕРЖАЩИЕСЯ В ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Бадретдинова Гузель Рамилевна¹, Дмитриев Андрей Владимирович², Гумерова Гузель
Хайдаровна³

^{1,2}ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

³ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический
университет»

¹nice.badretdinova@mail.ru, ²ieremiada@mail.ru, ³gumerova@kstu.ru

***Аннотация.** Авторами работы был разработан и внедрен теплообменный аппарат с оребренными трубами в ООО «ПАЛП Инвест», г. Казань. На основе полученных экспериментальных данных был определен режим работы теплообменного аппарата, предназначенного для передачи тепла от парогазовой смеси, содержащей твердые частицы целлюлозы к нагреваемой воде, протекающей внутри трубок. Получены зависимости времени работы от теплового потока между процессом восстановления и объемом воды затрачиваемому на одно восстановление поверхности, а также от стоимости воды.*

***Ключевые слова:** теплопередающая поверхность, загрязнения твердыми частицами, коэффициент теплопередачи, оптимальный режим работы*

RESTORATION OF THE HEAT TRANSFER SURFACE IN CASE OF CONTAMINATION BY SOLID PARTICLES OF CELLULOSE CONTAINED IN THE VAPOR-GAS MIXTURE

Badretdinova Guzel Ramilevna¹, Dmitriev Andrey Vladimirovich¹, Gumerova Guzel
Khaydarovna²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

¹nice.badretdinova@mail.ru, ²ieremiada@mail.ru, ³gumerova@kstu.ru

***Annotation.** The authors of the work developed and implemented a heat exchanger with finned pipes in «PULP Invest», the city of Kazan. Based on the experimental data obtained, the operating mode of a heat exchanger designed to transfer heat from a vapor-gas mixture containing solid cellulose particles to heated water flowing inside the tubes was determined. The dependences of the operating time on the heat flow between the restoration process and the volume of water spent on one restoration of the surface, as well as on the cost of water, are obtained.*

Key words: heat transfer surface, solid particle contamination, heat transfer coefficient, optimal operating mode

Введение

Большинство промышленных предприятий используют теплообменники для процессов предварительного нагрева, конденсации и испарения. Внутри и на поверхности этих аппаратов часто образуются нежелательные отложения [1, 2]. Эти отложения известны как загрязнения или засорения мелкими твердыми частицами и вызывают множество эксплуатационных проблем, таких как снижение коэффициента теплопередачи, увеличение гидравлического сопротивления или ухудшение качества продукта. С учетом технических и экономических требований все большее значение приобретают стратегии по уменьшению загрязнения. Зачастую с загрязнением теплообменного оборудования сталкиваются нефте- и газовые отрасли, тепловые электростанции, заводы по изготовлению, транспортировке, фракционированию сыпучих материалов и порошков, пищевые производства, целлюлозно-бумажные комбинаты и т.д. [3,4]. Современные исследования предлагают различные модификации конструкций теплообменников, а также различные способы очистки теплопередающих поверхностей как средства для минимизации загрязнений [5].

На тепловых электростанциях отложение золы на поверхности теплообменника влияет на его характеристики теплопередачи и срок службы аппарата, что снижает эффективность рекуперации и использование отработанного тепла, получаемого от дымовых газов [6, 7]. В работе [8] был разработан численный метод для исследования характеристик золоотложения в кожухотрубчатых теплообменниках. С помощью интегрированной модели загрязнения, включающая в себя такие механизмы, как перенос, отскок, осаждение и удаление частиц, прогнозировалось поведение частиц. В исследовании было изучено влияние диаметра частиц и скорости дымовых газов на образование слоя осадка, а также на абсолютный и относительный коэффициенты осаждения. Проведено сравнение механизмов образования осадков трех труб различной геометрии. Исходя из этого, образование осадков золы можно уменьшить за счет увеличения скорости потока дымовых газов, фильтрации средних и крупных частиц, а также использования эллиптических и плоских круглых труб.

Авторами статьи [9] был разработан численный метод исследования характеристик загрязнения типичного теплообменника. В ходе исследования была разработана интегрированная модель загрязнения, состоящая из процессов отложения и удаления слоя твердых частиц, имитирующая поведение загрязнений. Экспериментально было исследовано влияние скорости потока на входе и диаметра частиц на сопротивление загрязнению. Результаты показали, что движение частиц легко контролировалось различными вихревыми структурами, а засорение в основном происходило в области торможения и рециркуляции потока. Также увеличение скорости потока на входе и диаметра частиц приводит к уменьшению загрязнения.

В работе [10], направленной на повышение теплопередачи, снижения гидравлического сопротивления и уменьшения отложений на поверхностях теплообмена в условиях повышенной запыленности были предложены линейно-эллиптический и сотовый трубные пучки, а также исследованы характеристики слоев осадка и теплогидравлические характеристики до и после загрязнения. На основе модели зольного обрастания и метода прогнозирования были получены уравнения распределения слоя осадка и их морфология, а зольные обрастания и теплогидравлические характеристики были исследованы путем параметризации.

Отложение золы на поверхности теплообмена является серьезной проблемой, которая имеет решающее значение для работы котла-утилизатора [11]. В данной работе были проведены исследования по уменьшению отложений и сохранению характеристик теплопередачи. Методом численного моделирования исследовалась новая ромбическая поверхность теплообмена, анализировались характеристики осаждения и распределения частиц различного диаметра, а также скорости потока. Было проведено сравнение различных вариантов расположения трубок: ромбических, выровненных и расположенных в шахматном порядке. Результаты показывают, что из всех рассматриваемых вариантов компоновки трубок ромбическая поверхность теплообмена лучше всего способствует уменьшению зольных отложений.

В статье [12] дана численная оценка нового теплообменника с пучком труб с поперечным потоком, который сочетает в себе трубы разного диаметра во встроенной компоновке с целью снижения скорости загрязнения твердыми частицами со стороны газа при сохранении оптимальных значений коэффициента теплопередачи. Проведено сравнение трех схем: кожухотрубчатый теплообменник с цилиндрическими трубами одинакового диаметра и две другие схемы, состоящие из чередующихся цилиндров с отношением диаметров $d/D = 0,5$, при двух разных поперечных расстояниях. Результаты показывают, что стандартная компоновка пучка труб с неравными цилиндрами, размещенными на максимальном поперечном расстоянии друг от друга, обеспечивают значительное снижение скорости осаждения частиц без изменений оптимальных значений коэффициентов теплопередачи на единицу объема и низкого перепада давления.

Многие исследования посвящены анализу влияния состава теплопередающей поверхности на степень загрязнения. Например, алмазоподобные углеродные покрытия поверхностей теплообменников используются для уменьшения кристаллизационного загрязнения [13]. В промышленности стабильность удельных свойств поверхности, подверженных жидкостным, термическим и химическим воздействиям, определяет их эффективность. Поэтому исследуются теплогидравлические и очищающие напряжения, приложенные к покрытию.

В пищевой отрасли загрязнение технологического оборудования частицами молока и биопленки являются распространенными проблемами в молочной

промышленности [14, 15]. Один из предлагаемых способов уменьшить загрязнение частицами молока и образование биопленок является изменение характеристик поверхностей, контактирующих с молоком. В исследовании [16] изучается возможность использования модификационной поверхности нержавеющей стали на основе золь-геля во время термической обработки молока для оценки обрастания и адгезии бактерий. Проведена оценка восприимчивости модифицированных образцов из нержавеющей стали к загрязнению в пластинчатом теплообменнике. Наблюдается значительное уменьшение количества загрязненного слоя на модифицированных поверхностях и их устойчивость к образованию биопленки. В целом модифицированная поверхность продемонстрировала хорошие результаты при термической обработке молока, обеспечивая значительно меньшее загрязнение и прилипание бактерий.

Основная часть

В данной работе авторами была изучена проблема загрязнения твердыми частицами целлюлозы поверхности теплообменного аппарата, внедренного на предприятии ООО «ПАЛП Инвест», г. Казань (рис.1). В процессе эксплуатации теплообменника, его поверхность покрывалась слоем осадка и конденсата, получаемого от парогазовой смеси. Вследствие данного процесса начали ухудшаться тепловые характеристики оборудования, а именно снижаться эффективность теплопередачи. Для того чтобы поддерживать значения коэффициентов теплопередачи оптимальными на протяжении всей работы теплообменника, необходимо реже проводить очистительные работы путем смывания водой слоев осадка. Так как эффективнее всего чаще проводить очистку, а не бороться с последствиями, то перед авторами возникает задача в выявлении режима работы аппарата и получении зависимостей для расчета времени, по истечению которого необходимо восстанавливать поверхность теплообмена путем смывания ее водой для дальнейшей ее эксплуатации.



Рис. 1. Внедренный теплообменный аппарат на предприятии «ПАЛП Инвест».

В ходе приведенного исследования была построена методики расчета режима восстановления поверхности. Для этого распределение потока тепла во времени прогнозировалось по графику на рисунке 2.

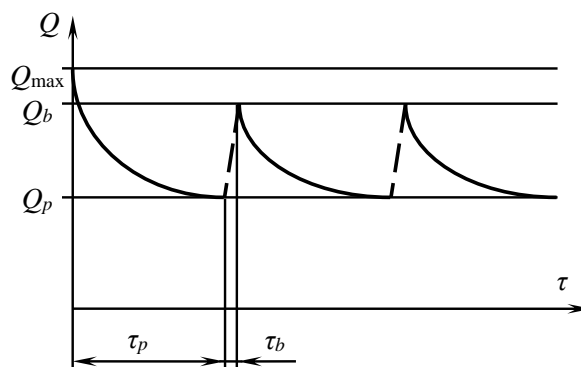


Рис. 2. График распределения теплового потока на оребренных трубах подверженных интенсивному загрязнению внешней поверхности

Из графика видно, что в начальный момент времени $\tau = 0$ максимальный тепловой поток составляет Q_{\max} . Восстановление поверхности происходит за период времени τ_p , когда тепловой поток уменьшается до значения Q_p . Так как очистка поверхности теплообменного оборудования осуществляется путем смывания отложений водой, то ее полное восстановление невозможно. Вследствие этого теплопередающая поверхность восстанавливается до значения Q_b за период времени τ_b .

Тепловой поток за один цикл можно определить по формуле:

$$Q_1 = \int_0^{\tau_p} Q(\tau) d\tau \quad (1)$$

где τ_p – время работы между процессами восстановления поверхности, с; $Q(\tau)$ – зависимость теплового потока от времени, Вт.

Результаты

Экспериментальные данные, полученные в ходе изучения осадений на теплообменнике, установленном на предприятии «ПАЛП Инвест» показывают, что осадок имеет симметричный профиль относительно оси труб. Данный механизм образования осадка свидетельствует о том, частицы целлюлозы перемещаются к поверхности теплопередачи вместе с каплями конденсирующегося пара. Поэтому поток массы частиц, осаждаемый к теплопередающей поверхности одинаковый по всем направлениям.

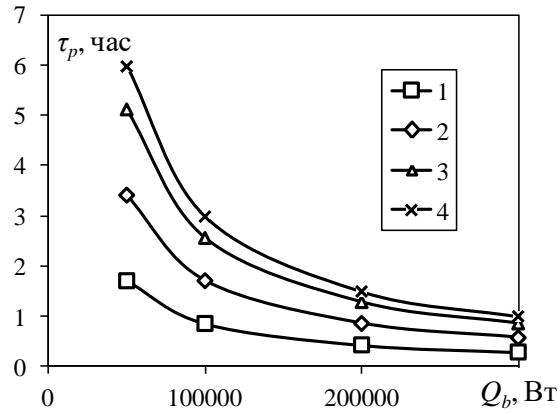


Рис. 3. Зависимость времени работы между процессом восстановления от теплового потока и объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности. V_1 , м³: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 1,75.

В процессе восстановления поверхности путем смывания водой по графику, представленном на рисунке 3 видно, что с увеличением значения восстановленного теплового потока Q_b период τ_r заметно снижается. Это объясняется тем, что необходимо снижать термическое сопротивление, которое создается слоем осадка. То есть для того, чтобы поддерживать тепловой поток, равный 50 кВт, необходимо смывать осадок каждые 6 часов, а для поддержания теплового потока в 200-300 кВт необходимо восстанавливать поверхность каждые 30 минут. В ходе исследования была получена зависимость от объема подаваемой воды на одну промывку. Например, подавая 0,5 м³ воды необходимо повторять процедуру восстановления каждые 1,7 часов, а при 1,75 м³ это значение составит 6 часов.

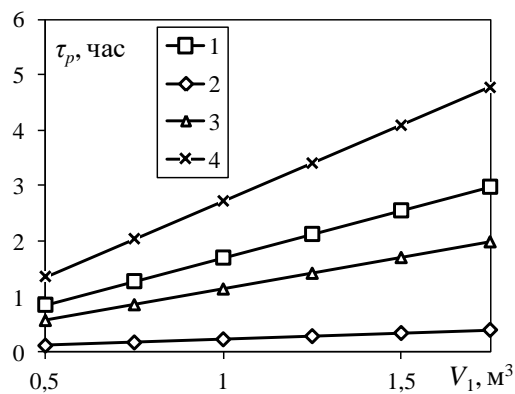


Рис.4. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды. PV_1 , руб./м³: 1 – 750; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1200

Так как объем воды, затрачиваемый на восстановление поверхности, и ее стоимость являются не мало важными факторами, была получена соответствующая зависимость (рис. 4). Как показано на графике, если для одной промывки необходимо $1,75 \text{ м}^3$ воды при ее стоимости 100 руб./м^3 , то время работы между процессом восстановления составит $0,44$ часа, а если стоимость увеличится в 12 раз, то и время, соответственно, должно быть увеличено примерно в 12 раз.

Обсуждение и выводы

Выявлено, что возможно существенное сокращение расхода воды на восстановление поверхности и увеличение эффективности использования теплообмена. Обнаружены условия, при которых наблюдается слабая зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности при высокой ее стоимости. оценочные расчеты показали, что время, через которое необходимо восстанавливать поверхность, может составлять 6 часов в диапазоне параметров, в которых производились расчеты.

Источники

- [1] Khazhidinova A., Stepanova O., et al. // Heat Transfer Research. 2022. V. 53. №. 1.
- [2] Bujak J.W. // Energy. 2015. V. 90. P. 1721-1732.
- [3] Bansal B., Chen X.D. // Comprehensive reviews in food science and food safety. 2006. V. 5. №. 2. P. 27-33.
- [4] Young A. et al. // Heat Transfer Engineering. 2011. V. 32. №. 3-4. P. 216-227.
- [5] Schnöing L., Augustin W., Scholl S. // Food and Bioproducts Processing. 2020. V. 121. P. 1-19.
- [6] Kukulka D. J., Smith R. // Applied Thermal Engineering. 2013. V. 61. №. 1. P. 60-66.
- [7] Kukulka D. J., Smith R., Li W. // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 89. P. 1079-1086.
- [8] Guo Z., et al. // Clean Technologies and Environmental Policy. 2022. V. 24. №. 1. P. 77-93.
- [9] Wang F. L., et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 104. P. 774-786.
- [10] Tang S. Z., et al. // Fuel. 2019. V. 251. P. 316-327.
- [11] Li J., Du W., Cheng L. // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 113. P. 1033-1046.
- [12] Mavridou S. G., Bouris D. G. // International journal of heat and mass transfer. 2012. V. 55. №. 19-20. P. 5185-5195.
- [13] Siebeneck K. et al. // Heat Transfer Engineering. 2017. V. 38. №. 7-8. P. 818-828.
- [14] Walmsley T. G., et al. // Advanced Powder Technology. 2013. V. 24. №. 4. P. 780-785.
- [15] Piepiórka-Stepuk J., Diakun J., Mierzejewska S. // Journal of cleaner production. 2016. V. 112. P. 946-952.
- [16] Liu D. Z. et al. // Journal of dairy science. 2017. V. 100. №. 4. P. 2577-2581.

Научное издание

**ЭНЕРГЕТИКА, ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И ВЫСШЕЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

Международная научно-техническая конференция
(Алматы, Казань, 20-21 октября 2022 г.)

Электронный сборник научных статей по материалам конференции

В трех томах

Том 1

Корректор Р.С. Зарипова
Компьютерная верстка Р.С. Зарипова

Центр публикационной активности КГЭУ
420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51

ISBN 978-5-89873-615-6



9 785898 736156 >