

# ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



УДК 504.06

DOI:10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185

7

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ ЕЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

А.В. Дмитриев<sup>1</sup>, Г.Р. Бадретдинова<sup>1</sup>, С.Д. Борисова<sup>1</sup>, А.Н. Николаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный энергетический университет,  
г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет, г.  
Казань, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, [nice.badretdinova@mail.ru](mailto:nice.badretdinova@mail.ru)  
[svetlana-zag@bk.ru](mailto:svetlana-zag@bk.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0714-2613>, [andr\\_nik\\_nik@rambler.ru](mailto:andr_nik_nik@rambler.ru)

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Определить режим работы теплообменного аппарата, предназначенного для передачи тепла от парогазовой смеси, содержащей твердые частицы. Получить зависимость для расчета времени, через которое необходимо восстанавливать поверхность путем смывания ее водой. Провести оценочные расчеты режима работы теплообменного аппарата установленного на предприятии «ПАЛП Инвест». Повысить устойчивость работы теплообменного аппарата и снизить загрязнение окружающей среды частицами целлюлозы. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи использовались законы сохранения тепла и массы, балансовые соотношения при расчете экономических затрат. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* В статье описана актуальность темы, рассмотрены особенности работы теплообменного аппарата, в котором происходит передача тепла от конденсирующейся парогазовой смеси, содержащей твердые частицы. Сделано предположение о механизме осаждения этих частиц на поверхность теплообмена. Получена зависимость, позволяющая определить время, через которое нужно восстанавливать поверхность с учетом стоимости воды и электричества. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Исследования позволили предположить механизм формирования осадка на поверхности теплообмена. Выбор рационального режима эксплуатации теплообменного аппарата позволит значительно сэкономить расход воды на восстановление поверхности, а также извлечь наибольшее количество тепла из парогазовой смеси. Выброс частиц в воздушную среду может быть снижен.

**Ключевые слова:** *загрязнения окружающей среды; устойчивая работа объектов; снижение экологической опасности; совершенствование методов технического обслуживания; теплообменные аппараты.*

**Для цитирования:** Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р., Борисова С.Д., Николаев А.Н. Восстановление поверхности теплообмена в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 1. С. 176-185. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185.

## RESTORATION OF THE HEAT EXCHANGE SURFACE UNDER CONDITIONS OF ITS CONTAMINATION DURING CONDENSATION OF A VAPOR-GAS MIXTURE

AV. Dmitriev<sup>1</sup>, GR. Badretdinova<sup>1</sup>, SD. Borisova<sup>1</sup>, AN. Nikolaev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>2</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8979-4457>, [ieremiada@gmail.com](mailto:ieremiada@gmail.com)<sup>1</sup>  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5312>, [nice.badretdinova@mail.ru](mailto:nice.badretdinova@mail.ru)<sup>2</sup>  
[svetlana-zag@bk.ru](mailto:svetlana-zag@bk.ru)<sup>3</sup>  
[andr\\_nik\\_nik@rambler.ru](mailto:andr_nik_nik@rambler.ru)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0714-2613>, [andr\\_nik\\_nik@rambler.ru](mailto:andr_nik_nik@rambler.ru)<sup>4</sup>

**Abstract:** *THE PURPOSE.* Determine the operating mode of a heat exchanger designed to transfer heat from a vapor-gas mixture containing solid particles. Get a dependency for calculating the time after which it is necessary to restore the surface by washing it with water. To carry out estimated calculations of the operating mode of the heat exchanger installed at the PULP Invest enterprise. To increase the stability of the heat exchanger and reduce environmental pollution by cellulose particles. *METHODS.* In solving this problem, the laws of heat and mass conservation, balance ratios in the calculation of economic costs were used. *RESULTS.* The article describes the relevance of the topic, discusses the features of the operation of a heat exchanger in which heat is transferred from a condensing vapor-gas mixture containing solid particles. An assumption is made about the mechanism of deposition of these particles on the heat exchange surface. A dependence is obtained that allows us to determine the time after which the surface needs to be restored, taking into account the cost of water and electricity. *CONCLUSION.* Studies have suggested the mechanism of sediment formation on the heat exchange surface. Choosing a rational mode of operation of the heat exchanger will significantly save water consumption for surface restoration, as well as extract the greatest amount of heat from the steam-gas mixture. The release of particles into the air can be reduced.

**Keywords:** *environmental pollution; stable operation of objects; reducing environmental hazards; improvement of maintenance methods; heat exchangers.*

**For citation:** Dmitriev AV, Badretdinova GR, Borisova SD, Nikolaev AN. Restoration of the heat exchange surface under conditions of its contamination during condensation of a vapor-gas mixture *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(1): 176-185. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185.

### **Введение**

В начале 20 века произошло стремительное развитие технологий, а также появление крупномасштабных промышленных производств. При реализации технологических процессов возникла необходимость в управлении температурным режимом, следовательно, это стало толчком для создания и совершенствования теплообменного оборудования.

Применение теплообменных аппаратов в промышленности для нагрева и охлаждения технологических потоков становится экономически выгодным, так как они эффективно решают задачи в использовании энергоносителей. Однако при эксплуатации теплообменников производство сталкивается с проблемой загрязнения твердыми частицами поверхностей теплообмена. Наиболее распространёнными отраслями, сталкивающимися с частым загрязнением не только теплообменников, но и большинства элементов технологических установок являются пищевая промышленность, водоподготовка, целлюлозно-бумажное производство, производство волокна, традиционные и атомные электростанции, нефте- и газоперерабатывающие заводы [1, 2]. Загрязнение твердыми частицами способствует изменению тепловых характеристик теплообменников, что в конечном итоге приводит к увеличению капитальных затрат и затрат на их техническое обслуживание, а также к крупным производственным и энергетическим потерям.

На образование загрязнений влияет довольно большое количество параметров, в том числе механизмы осаждения частиц, температура и геометрия поверхности теплообмена. Основываясь на результатах современных исследований [3], загрязнения классифицируются на загрязнение осадками или твердыми частицами, загрязнение в результате химической реакции, коррозионное и биологическое загрязнение, замерзание и кристаллизация. Как правило, наиболее проблемные отложения образуются при переработке твердых или жидких отходов и сжигании топлива [4-6]. При сжигании твердых бытовых отходов утилизация отработанного тепла является эффективным

способом использования ресурсов, но низкотемпературная коррозия и отложение золы серьезно ограничивают использование отходящего тепла дымовых газов. Например, с помощью экспериментов в работе [7] были изучены характеристики строения и осаждения твердых частиц при сжигании твердых отходов, влияющие на процессы теплопередачи и образования низкотемпературной коррозии на оборудовании.

За последние десятилетия наблюдается растущий интерес к загрязнению теплообменников различных конструкций со стороны воздуха. Из многочисленных проведенных экспериментальных исследований становится ясным, что загрязнение оказывает значительное влияние на гидравлическое сопротивление и теплопередачу поверхности теплообмена [8-10]. Следовательно, изменение данных параметров свидетельствует об образовании загрязнений твердыми частицами на поверхностях теплообменника.

Очистка теплообменного оборудования в любой сфере промышленности является энергозатратным процессом. Поэтому достижение качественной очистки и снижение при этом количества потребляемой энергии на сегодняшний день является актуальной задачей. Для этого исследователи в данной области предлагают различные методы прогнозирования обрастания твердыми частицами поверхностей теплообменного оборудования с помощью моделирования [11-13] и способы по снижению количества загрязнений теплообменных элементов [14-16]. Так, в работе [17] авторами была предложена модель ромбической поверхности теплообменного аппарата, способствующая уменьшению зольных отложений на цементном заводе. Поскольку отработавшие газы содержат большое количество частиц золы, то загрязнение труб с течением времени является обычным явлением для котлов-утилизаторов. В приведенной статье было проведено исследование по определению влияния расположения пучков труб в выровненном шахматном порядке и в ромбическом положении соответственно на степень осаждения частиц золы, изменения теплопередачи и гидравлического сопротивления. В результате численного моделирования и промышленного эксперимента обнаружено, что ромбическая поверхность теплообменного аппарата может улучшить теплопередачу и уменьшить накопление золы за счет увеличения гидравлического сопротивления потоку дымовых газов. Аналогичное исследование в работе [18] было выполнено с целью изучения теплообмена, гидравлического сопротивления и скоростей загрязнения дымовыми газами с взвешенными частицами золы, в которой авторы подтвердили, что по сравнению со стандартной компоновкой пучки труб с неравными цилиндрами значительно снижает коэффициент и скорость осаждения частиц, приводит к увеличению теплоотдачи при небольшом изменении гидравлического сопротивления.

Исследование характеристик теплопередачи теплообменных аппаратов в состоянии загрязнения имеет важное значение, поэтому влияние загрязнения твердыми частицами должно быть полностью учтено в процессе проектирования теплообменников [19, 20].

Таким образом, на многих промышленных объектах передача и использование отводимого тепла от дымовых газов для дальнейшей реализации технологических и хозяйственных нужд является актуальной задачей [21-23]. Однако загрязнение поверхностей теплообменников является серьезной проблемой для некоторых технологических установок. Поэтому устранение или, по крайней мере, уменьшение загрязнения относятся к наиболее важным видам деятельности в этой области.

В данной работе была рассмотрена проблема загрязнения частицами целлюлозы теплообменного аппарата, установленного на предприятии «ПАЛП Инвест», занимающегося производством бумаги санитарно-гигиенического назначения и изделий тисью в России. На рисунке 1 показан загрязненный промышленный теплообменник в результате его эксплуатации. Загрязнение теплообменника твердыми частицами повлияло на эффективность работы оборудования, а именно привело к снижению теплопередачи от парогазовой смеси, в которой содержатся твердые частицы, и увеличению гидравлического сопротивления. Следовательно, появилась необходимость в очистке поверхности теплообменника, а также в выявлении режима работы аппарата и получении зависимости для расчета времени, по истечению которого необходимо восстанавливать поверхность теплообмена путем смывания ее водой для дальнейшей ее эксплуатации.

**Материалы и методы**

Для построения методики расчета режима восстановления поверхности зададимся распределением потока тепла во времени.

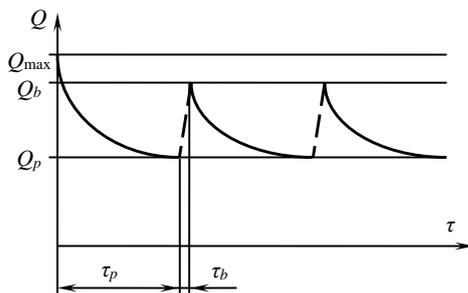


Рис. 2. К расчету теплового потока на оребренных трубах подверженных интенсивному загрязнению внешней поверхности *Fig. 2. To calculate the heat flow on finned pipes exposed to intense contamination of the external surface*

Очевидно, что максимальный поток  $Q_{max}$  при  $\tau = 0$  (рис. 2). При уменьшении значения теплового потока до  $Q_p$ , которое происходит за время  $\tau_p$ , начинается восстановление поверхности. Полное восстановление поверхности невозможно, поэтому она восстанавливается до значения  $Q_b$ . На восстановление поверхности затрачивается время  $\tau_b$ .

Тепловой поток за один цикл можно определить по формуле:

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

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

На основе исследований, проведенных ранее, эту зависимость можно описать уравнением:

$$Q(\tau) = A \exp(-B\tau) + C \tag{2}$$

При значении интервала времени стремящимся к бесконечности тепловой поток стремиться к нулю, следовательно,  $C = 0$ . С другой стороны, в начальный момент времени, тепловой поток имеет максимальное значение, таким образом,  $A = Q_{max}$ . Тогда зависимость преобразуется к виду:

$$Q(\tau) = Q_{max} \exp(-B\tau) \tag{3}$$

или, при условии большого количества циклов

$$Q(\tau) = Q_b \exp(-B\tau) \tag{4}$$

Здесь параметр  $B$  зависит от технологических параметров потока парогазовой смеси, конструктивных размеров оребренной трубы, имеет размерность  $1/c$  и определяется для каждого случая отдельно.

Следует отметить, что общее время эксплуатации поверхности теплообмена складывается из времени работы и времени восстановления поверхности. Однако, если восстановление поверхности происходит высоконапорным потоком воды, то время на восстановление поверхности на несколько порядков меньше поэтому в оценочных расчетах им пренебрегаем.

После интегрирования можно записать:

$$Q_1 = \frac{Q_b}{B} (1 - \exp(-B\tau_p)) \tag{5}$$

Экономия электроэнергии благодаря работе теплообменного аппарата определится:

$$P_Q = Q_1 n_\tau P_1 \tag{6}$$

где  $n_\tau$  – количество циклов работы за год;  $P_1$  – стоимость единицы энергии, руб./Дж.

С другой стороны, увеличение количества циклов работы приведет к росту объема потребляемой воды на восстановление поверхности теплообмена. Эти расходы можно определить по уравнению:

$$P_V = V_1 n_\tau P_{V1} \tag{7}$$

где  $V_1$  – объем воды, затрачиваемый на одно восстановление поверхности,  $\text{м}^3$ ;  $P_{V1}$  – стоимость использования воды руб./ $\text{м}^3$ .

Следует отметить, что стоимость использования воды складывается из стоимости воды по тарифу и платы за сброс загрязняющих веществ в составе сточных вод, которые, как правило, значительно больше.

Таким образом, расходы на электричество, с учетом их снижения затрат на подогрев воды теплом парогазовой смеси и увеличении затрат на подачу воды для восстановления поверхности, определяются:

$$P_{\Sigma} = P_e + P_V - P_Q \quad (8)$$

Минимум этой функции определится по соотношению:

$$\frac{dP_{\Sigma}}{dn_{\tau}} = V_1 P_{V1} - Q_1 P_1 = 0 \quad (9)$$

После преобразования можно получить:

$$V_1 P_{V1} = Q_1 P_1 \quad (10)$$

Окончательное выражение связывающие параметры для нахождения минимальных затрат запишется:

$$\frac{Q_b}{V_1 B} (1 - \exp(-B\tau_p)) = \frac{P_{V1}}{P_1} \quad (11)$$

Следовательно, время работы между процессом восстановления поверхности определяется:

$$\tau_p = -\frac{1}{B} \ln \left( 1 - \frac{P_{V1} V_1 B}{P_1 Q_b} \right) \quad (12)$$

Для удобства представления времени загрязнения поверхности введем понятие снижение теплового потока в два раза. Тогда параметр  $B$  можно определить по формуле:

$$B = -\frac{1}{\tau_{1/2}} \ln \left( \frac{1}{2} \right) \quad (13)$$

Наблюдения за работой теплообменных аппаратов в качестве утилизаторов тепла парогазовой смеси на предприятии по производству бумаги санитарно-гигиенического назначения показали, что этот период примерно равен 1 месяц. Таким образом, параметр  $B$  равен:

$$B = -\frac{1}{30 \cdot 24 \cdot 3600} \ln \left( \frac{1}{2} \right) = 2,7 \cdot 10^{-7} \quad (14)$$

### Результаты

При формировании осадка за счет инерционного механизма осаждения частиц его толщина существенно отличается по поверхности, о чем написано в представленном литературном обзоре. Однако, при изучении осадка на установленном на предприятии «ПАЛП Инвест» теплообменном аппарате было замечено, что осадок имеет практически симметричный профиль относительно оси труб. Исходя из этого, можно предположить механизм образования осадка, а именно частицы целлюлозы перемещаются к поверхности теплопередачи вместе с каплями конденсирующегося пара. Поэтому поток массы частиц к поверхности одинаковый по всем направлениям.

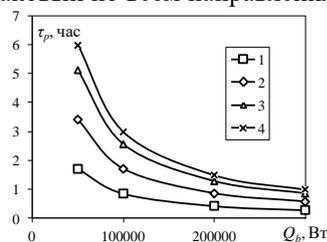


Рис. 3. Зависимость времени работы между процессом восстановления от теплового потока и объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности.  $P_{V1} = 750$  руб./ $\text{м}^3$ ;  $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$  руб./Дж;  $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$  1/с;  $V_1, \text{м}^3$ : 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 1,75

Из рисунке 3 видно, что период восстановления поверхности заметно снижается с увеличением значения восстановленного теплового потока. Это объясняется

необходимостью снижения термического сопротивления создаваемого слоем осадка. Например, если для поддержания теплового потока 50 кВт необходимо смывать осадок каждые 6 часов, то для поддержания теплового потока в 200-300 кВт необходимо восстанавливать поверхность каждые 30 минут. Также прослеживается сильная зависимость от объема подаваемой воды на одну промывку. Подавая 0,5 м<sup>3</sup> воды необходимо повторять процедуру восстановления каждые 1,7 часов, а при 1,75 м<sup>3</sup> это значение составит 6 часов.

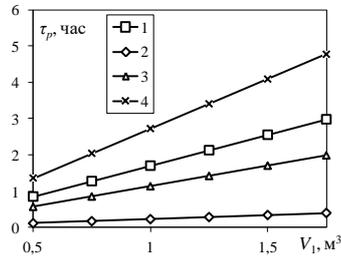


Рис. 4. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды.  $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$  руб./Дж;  $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$  1/с;  $Q_b = 100$  кВт.  $P_{V1}$ , руб./м<sup>3</sup>: 1 – 750; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1200

Fig. 4. The dependence of the operating time between the recovery process on the volume of water spent on one surface restoration and the cost of using water.  $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$  руб./Дж;  $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$  1/с;  $Q_b = 100$  кВт.  $P_{V1}$ , руб./м<sup>3</sup>: 1 – 750; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1200

Ожидаемая зависимость получилась от стоимости воды (рис. 4). Если подавать на одну промывку 1,75 м<sup>3</sup> воды при ее стоимости 100 руб./м<sup>3</sup> то время работы составит 0,44 часа, а если стоимость увеличится в 12 раз то и время, соответственно, должно быть увеличено примерно в 12 раз.

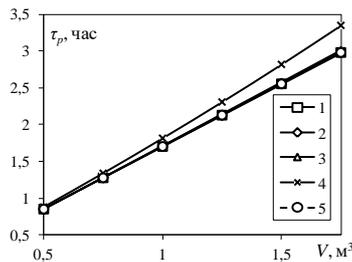


Рис. 5. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды.  $P_{V1} = 750$  руб./м<sup>3</sup>;  $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$  руб./Дж;  $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$  1/с;  $Q_b = 100$  кВт.  $B$ , 1/с: 1 –  $2,7 \cdot 10^{-7}$ ; 2 –  $2 \cdot 10^{-8}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-6}$ ; 4 –  $2 \cdot 10^{-5}$ ; 5 – линия полученная по формуле  $\tau_p = \frac{P_{V1} V_1}{P_1 Q_b}$

Fig. 5. The dependence of the operating time between the recovery process on the volume of water spent on one surface restoration and the cost of using water.  $P_{V1} = 750$  руб./м<sup>3</sup>;  $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$  руб./Дж;  $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$  1/с;  $Q_b = 100$  кВт.  $B$ , 1/с: 1 –  $2,7 \cdot 10^{-7}$ ; 2 –  $2 \cdot 10^{-8}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-6}$ ; 4 –  $2 \cdot 10^{-5}$ ; 5 – the line obtained by the formula  $\tau_p = \frac{P_{V1} V_1}{P_1 Q_b}$

Достаточно интересная зависимость получилась при выявлении влияния параметра  $B$  на режим восстановления поверхности (рис. 5). Исследования демонстрируют очень слабую зависимость от параметра  $B$ . Также исследования показали, что с достаточной для инженерных расчетов точностью можно использовать упрощенную формулу для определения время работы между процессом восстановления поверхности:

$$\tau_p = \frac{P_{V1} V_1}{P_1 Q_b} \quad (15)$$

Эта формула позволяет упростить понимание рационального режима работы теплообменника, работающего в условиях интенсивного загрязнения поверхности.

#### Обсуждение

Следует отметить, что возможна организация замкнутого цикла использования воды при восстановлении поверхности. В этом случае необходимо подбирать объем емкости для сбора воды таким образом, чтобы частицы успевали оседать на дно. В емкость возможно добавления порошкообразного коагулянта «полиакриламид серии АК 631, марки А930», так как он уже используется в системе очистки воды от частиц

целлюлозы, или его аналога, что позволит укрупнять частицы для их более простого отделения. Обычно используется техническая вода которая имеется на предприятии. Ее использование не приведет к коррозии, так как все элементы проточной части аппаратов и трубопроводы изготовлены из нержавеющей стали способной работать при температуре до 250 °С. Брикетты, из уловленных частиц целлюлозы, уже изготавливаются на предприятии, поэтому предлагаемый способ очистки поверхности не потребует установки дополнительного оборудования. Теплота сгорания получаемых брикеттов ниже теплоты сгорания топлив, которое наиболее часто используется в настоящее время. Поэтому их можно использовать только в бытовых условиях.

#### **Заключение**

В заключение можно отметить, что выбор рационального режима эксплуатации теплообменного аппарата позволит значительно сэкономить расход воды на восстановление поверхности, а также извлечь наибольшее количество тепла из парогазовой смеси. Кроме того, решается еще и экологическая проблема, связанная с выбросами частиц в атмосферу вместе с парогазовой смесью. Уловленные частицы целлюлозы можно спрессовать и высушить, а полученные брикетты использовать, например, в качестве топлива.

#### **Литература**

1. Bansal B., Chen X.D. A critical review of milk fouling in heat exchangers // *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2006. V. 5. N2. pp. 27–33.
2. Young A., Venditti S., Berruoco C., et al. Characterization of crude oils and their fouling deposits using a batch stirred cell system // *Heat Transfer Engineering*. 2011. V. 32, N3-4. pp. 216–227.
3. Kilkovsky B., Stehlik P., Jegla Z., et al. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies—I. Energy recovery from flue gas // *Applied Thermal Engineering*. 2014. V. 64, N1-2. pp. 213–223.
4. Khazhidinova A., Stepanova O., Yermolenko M., et al. Influence of contamination of low-temperature heating surfaces of boiler on the intensity of convective heat exchange during the burning of non-design fuel // *Heat Transfer Research*. 2022. V. 53, N1. pp.83–96.
5. Bujak J.W. Heat recovery from thermal treatment of medical waste // *Energy*. 2015. V. 90. pp. 1721–1732.
6. Syrodoj S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., et al. The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal-water fuels // *Journal of the Energy Institute*. 2018. V. 91, N6. pp. 1091–1101.
7. Zhang Y., Du X., Yue M., et al. Heat transfer and ash deposition performance of heat exchange surface in waste incineration flue gas // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 155. pp. 119691.
8. Bell I.H., Groll E.A. Air-side particulate fouling of microchannel heat exchangers: experimental comparison of air-side pressure drop and heat transfer with plate-fin heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2011. V. 31, N5. pp. 742–749.
9. Wallhäußer E., Hussein M.A., Becker T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry // *Food Control*. 2012. V. 27, N1. pp. 1–10.
10. Karlovich T.B. Heat Transfer of Circular Finned Tubes with Nonuniform Operational Fouling of the Interfin Space // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018. V. 91, N5. pp. 1211–1219.
11. Davoudi E., Vaferi B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 130. pp. 138–153.
12. Hosseini S.B., Khoshkhoo R.H., Malabad S.M.J. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 115. pp. 406–417.
13. Kapustenko P.O., Klemeš, J.J., Matsegora O.I., et al. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in plate heat exchanger // *Energy*. 2019. V. 174. pp. 1049–1059.
14. Schnöing L., Augustin W., Scholl S. Fouling mitigation in food processes by modification of heat transfer surfaces: A review // *Food and Bioprocesses Processing*. 2020. V. 121. pp. 1–19.
15. Siebeneck K., Lüken J., Lu Y., et al. Aging and thermal conditioning of modified heat exchanger surfaces—impact on crystallization fouling // *Heat Transfer Engineering*. 2017.

V. 38, N7-8. pp. 818–828.

16. Liu D.Z., Jindal S., Amamcharla J., et al. Evaluation of a sol-gel-based stainless steel surface modification to reduce fouling and biofilm formation during pasteurization of milk // *Journal of dairy science*. 2017. V. 100. N4. pp. 2577–2581.

17. Li J., Du W., Cheng L. Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 113. pp. 1033–1046.

18. Mavridou S.G., Bouris D.G. Numerical evaluation of a heat exchanger with inline tubes of different size for reduced fouling rates // *International journal of heat and mass transfer*. 2012. V. 55. N.19-20. pp. 5185–5195.

19. Tang S.Z., Li M.J., Wang F.L., et al. Fouling and thermal-hydraulic characteristics of aligned elliptical tube and honeycomb circular tube in flue gas heat exchangers // *Fuel*. 2019. V. 251. pp. 316–327.

20. Li M.J., Tang S.Z., Wang F.L., et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V. 126. pp. 737–761.

21. Зинуров В.Э., Дмитриев А.В., Шарипов И.И., Галимова А.Р. Экспериментальное исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2021. Т. 7. № 2 (26). С. 60–74.

22. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Гумерова Г.Х. Оценочный расчет процесса теплообмена в камере сгорания при сжигании природного газа // *Вестник технологического университета*. 2018. № 2(21). С. 99–103.

23. Зинуров В. Э., Галимова А. Р., Бадретдинова Г. Р., Санников И. В. Исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность // *Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI Бенардосовские чтения), посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бенардосом; 2-4 июня 2021 г., Иваново*. С. 241–243.

#### Авторы публикации

**Дмитриев Андрей Владимирович** – д-р.техн.наук, доцент, заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

**Бадретдинова Гузель Рамилевна** – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники», Казанский государственный энергетический университет.

**Борисова Светлана Дмитриевна** – канд. тех. наук, доцент кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура», Казанский государственный энергетический университет.

**Николаев Андрей Николаевич** – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Оборудования пищевых производств», Казанский национальный исследовательский технологический университет.

#### References

1. Bansal B, Chen XD. A critical review of milk fouling in heat exchangers. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2006;5(2):27-3. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2006.tb00080.x>

2. Young A, Venditti S, Berruoco C, et al. Characterization of crude oils and their fouling deposits using a batch stirred cell system. *Heat Transfer Engineering*. 2011;32(3-4):216-7. <https://doi.org/10.1080/01457632.2010.495603>

3. Kilkovsky B, Stehlik P, Jegla Z, et al. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies–I. Energy recovery from flue gas. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 64(1-2):213-3. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.041>

4. Khazhidinova A, Stepanova O, Yermolenko M, et al. Influence of contamination of low-temperature heating surfaces of boiler on the intensity of convective heat exchange during the burning of non-design fuel. *Heat Transfer Research*. 2022;53(1):83-6. doi:

10.1615/HeatTransRes.2021040471

5. Bujak JW. Heat recovery from thermal treatment of medical waste. *Energy*. 2015;90:1721–1732. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.124>

6. Syrodoy SV, Kuznetsov GV, Gutareva NY, et al. The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal-water fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2018;91(6):1091-1. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.06.014>

7. Zhang Y, Du X, Yue M, et al. Heat transfer and ash deposition performance of heat exchange surface in waste incineration flue gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;155:119691. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119691>

8. Bell IH, Groll EA. Air-side particulate fouling of microchannel heat exchangers: experimental comparison of air-side pressure drop and heat transfer with plate-fin heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31(5):742-9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.10.019>

9. Wallhäußer E, Hussein MA, Becker T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry. *Food Control*. 2012;27(1):1–10. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.02.033>

10. Karlovich TB. Heat Transfer of Circular Finned Tubes with Nonuniform Operational Fouling of the Interfin Space. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2018;91(5):1211-9. <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1850-8>

11. Davoudi E, Vaferi B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018;130:138-3. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.12.017>

12. Hosseini SB, Khoshkhoo RH, Malabad SMJ. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2017;115:406-7. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.110>

13. Kapustenko PO, Klemeš, JJ, Matsegora OI, et al. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in plate heat exchanger. *Energy*. 2019;174:1049-9. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.026>

14. Schnöing L, Augustin W, Scholl S. Fouling mitigation in food processes by modification of heat transfer surfaces: A review. *Food and Bioprocess Processing*. 2020;121:1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.01.013>

15. Siebeneck K, Lüken J, Lu Y, et al. Aging and thermal conditioning of modified heat exchanger surfaces—impact on crystallization fouling. *Heat Transfer Engineering*. 2017;38(7-8):818-8. <https://doi.org/10.1080/01457632.2016.1206431>

16. Liu DZ, Jindal S, Amamcharla J, et al. Evaluation of a sol-gel-based stainless steel surface modification to reduce fouling and biofilm formation during pasteurization of milk. *Journal of dairy science*. 2017;100(4):2577-1. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12141>

17. Li J, Du W, Cheng L. Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface. *Applied Thermal Engineering*. 2017;113:1033-6. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.198>

18. Mavridou SG, Bouris DG. Numerical evaluation of a heat exchanger with inline tubes of different size for reduced fouling rates. *International journal of heat and mass transfer*. 2012;55(19-20):5185-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.020>

19. Tang SZ, Li MJ, Wang FL, et al. Fouling and thermal-hydraulic characteristics of aligned elliptical tube and honeycomb circular tube in flue gas heat exchangers. *Fuel*. 2019;251:316-7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.045>

20. Li MJ, Tang SZ, Wang FL, et al. Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment. *Applied Thermal Engineering*. 2017;126:737-1. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>

21. Zinurov VE, Dmitriev AV, Sharipov II, Galimova AR. Experimental study of heat exchange from a steam-gas mixture during heat transfer through a ribbed surface. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2021; 7(2(26)):60-74. (In Russ). doi: 10.21684/2411-7978-2021-7-2-60-74

22. Dmitriev AV, Zinurov VE, Gumerova GH. Otsenochnyi raschet protsessy teploobmena v kamere sgoraniya pri szhiganiy prirodnogo gaza. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2018; 21(2): 99-103. (In Russ).

23. Zinurov VE, Galimova AR. Issledovanie teploobmena ot parogazovoi smesi pri peredache tepla cherez rebristuyu poverkhnost'. In: Badretdinova GR, Sannikov IV, et al. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XXI Benardosovskie chteniya), posvyashchennoi 140-letiyu*

**Authors of the publication**

*Andrey V. Dmitriev* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Guzel R. Badretdinova* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Svetlana D. Borisovna* – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

*Andrey N. Nikolaev* – Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia.

*Получено* *14.03.2022г.*

*Отредактировано* *21.03.2022г.*

*Принято* *22.03.2022г.*