

Балым Әлібекқызы Әлібекова – Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университетінің «Surface Engineering and Tribology» ғылыми-зерттеу орталығының инженері, Өскемен қаласы, Қазақстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7644-4527>.

Сведения об авторах

Лайла Ғылыммедденовна Сулюбаева – PhD, ассоциированный профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра «Инженерия поверхностей и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: lsulyubayeva@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1924-1459>.

Санжар Дауренулы Болатов* – младший научный сотрудник Научно-исследовательского центра «Инженерия поверхностей и трибология» Восточно-Казахстанского университета имени Сәрсен Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: sanzharbolatov94@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3136-0535>.

Балым Алибекқызы Алибекова – инженер Научно-исследовательского центра «Surface Engineering and Tribology» Восточно-Казахстанского университета имени Сәрсен Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: balymalibekova304@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7644-4527>.

Received 14.04.2026

Revised 03.06.2026

Accepted 04.06.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-63](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-63)



МРНТИ: 55.22.01

М.К. Даутбеков¹, А.Б. Кеңесбеков², Т.Т. Төлеубаев³, А. Мұрал*

¹ТОО «PlasmaScience»,

070002, Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя, 7г

²ТОО «Институт композиционных материалов»

070002, Казахстан, г. Усть-Каменогорск, пр. Шакарим, 157

³ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ»,

070002, Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Промышленная, 2

*e-mail: aibolm02@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ТОНКОГО HVOF-ПОКРЫТИЯ Cr_3C_2 -NiCr НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ТРУБ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ КОТЛА БКЗ-320-140

Аннотация: В работе проведён анализ влияния газотермических покрытий на основе Cr_3C_2 -NiCr, полученных методом высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF), на теплофизические характеристики труб ширмовых пароперегревателей котлоагрегата БКЗ-320-140. Рассмотрено влияние защитного покрытия на процессы теплопередачи, включая конвективный и радиационный теплообмен, а также на температурное состояние металла в условиях высокотемпературного воздействия дымовых газов. Расчёт температурного поля выполнен методом конечных элементов в программном комплексе ELCUT 6.6 с учётом нестационарного режима теплопередачи. В ходе моделирования учтены реальные эксплуатационные параметры, включая давление и температуру пара, скорость потоков и теплофизические свойства материалов. Установлено, что наличие покрытия приводит к незначительному увеличению суммарного термического сопротивления системы «стенка трубы – покрытие». При этом влияние покрытия на температурный режим труб и плотность теплового потока остаётся минимальным. Показано, что применение покрытий Cr_3C_2 -NiCr позволяет повысить коррозионно-эрозионную стойкость поверхностей нагрева без существенного снижения теплотехнической эффективности котлоагрегата в реальных условиях эксплуатации. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, модернизации и оптимизации энергетического оборудования тепловых электростанций в промышленной энергетике Казахстана.

©М.К. Даутбеков, А.Б. Кеңесбеков, Т.Т. Төлеубаев, А. Мұрал, 2026

Ключевые слова: тепловые электростанции, поверхности нагрева, пароперегреватель, газотермическое напыление, HVOF, защитные покрытия.

Введение

В рамках глобальной «зелёной» повестки и развития возобновляемых источников энергии традиционная тепловая энергетика продолжает играть ключевую роль в обеспечении базовой нагрузки энергосистем во многих странах, включая Китай, Индию и государства с развитой промышленной инфраструктурой [1]. Республика Казахстан, располагая значительными запасами угля и природного газа, сохраняет высокую долю тепловой генерации в структуре электроэнергетического баланса [2, 3]. В этой связи повышение надёжности и эффективности эксплуатации тепловых электростанций (ТЭС) остаётся актуальной инженерной и научной задачей. Значительная часть котлоагрегатов ТЭС Казахстана была введена в эксплуатацию несколько десятилетий назад и характеризуется высоким уровнем износа поверхностей нагрева [4, 5]. Наиболее уязвимыми элементами являются ширмовые пароперегреватели, работающие в условиях интенсивного лучистого теплообмена, высоких температур и воздействия золых частиц. Для котлов типа БКЗ-320-140 характерно сочетание высокотемпературной коррозии и эрозионного износа, что приводит к утонению стенок труб, росту температур металла и снижению ресурса оборудования [6-8].

Коррозионно-эрозионный износ поверхностей нагрева оказывает комплексное влияние на работу котлоагрегатов, изменяя как механические свойства труб, так и условия теплообмена. Теплопередача в ширмовых пароперегревателях определяется излучением и конвекцией дымовых газов, а также теплофизическими свойствами материала труб и состоянием их поверхности [9, 10]. Изменение характеристик поверхности вследствие износа и нанесения защитных покрытий может существенно влиять на тепловой поток и температурное состояние металла.

Одним из перспективных методов повышения коррозионно-эрозионной стойкости поверхностей нагрева является применение газотермических покрытий. HVOF как один из видов газотермического напыления позволяет формировать плотные покрытия с низкой пористостью и высокой адгезией, что обеспечивает их устойчивость в условиях высоких температур и абразивного воздействия [11]. В качестве покрытий широко используются материалы на основе систем $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, NiCr и WC-Co [12-14]. Современные исследования показывают, что газотермические покрытия, особенно HVOF-покрытия на основе $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ и NiCr -систем, остаются одним из наиболее эффективных способов защиты котельных труб от высокотемпературной коррозии, эрозионного износа и шлакования. В обзорах последних лет подчёркивается, что выбор состава покрытия, его пористость, адгезия, фазовый состав и теплопроводность являются ключевыми факторами, определяющими долговечность поверхностей нагрева в условиях эксплуатации котельного оборудования [15-17]. Однако влияние таких покрытий на теплофизические и термодинамические характеристики поверхностей нагрева изучено недостаточно. В связи с этим необходим анализ влияния покрытий полученных методом HVOF на теплопередачу и температурное состояние труб.

Покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ выбрано в качестве объекта исследования вследствие сочетания его высоких эксплуатационных свойств в условиях работы поверхностей нагрева котлоагрегатов. Карбид хрома Cr_3C_2 обеспечивает высокую твёрдость и устойчивость к эрозионному и абразивному износу в потоке дымовых газов и золых частиц, тогда как связка NiCr способствует повышению жаростойкости и коррозионной стойкости за счёт формирования защитных оксидных слоёв на основе Cr_2O_3 . Покрытия данной системы характеризуются устойчивостью к высокотемпературной оксидной, сульфатной и хлоридной коррозии, а также стабильностью фазового состава при рабочих температурах поверхностей нагрева, что делает их перспективными для защиты труб пароперегревателей энергетических котлов.

Целью работы является количественная оценка влияния тонкого защитного HVOF-покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ толщиной 100 мкм на суммарное термическое сопротивление, линейную плотность теплового потока и температурное состояние трубы ширмового пароперегревателя котла БКЗ-320-140 с учётом конвективного и радиационного теплообмена со стороны дымовых газов.

Научная новизна работы заключается в том, что для условий эксплуатации ширмового пароперегревателя котла БКЗ-320-140 выполнена количественная оценка вклада тонкого HVOF-покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ в общее термическое сопротивление многослойной системы «дымовые газы – покрытие – стенка трубы – пар». Показано, что при толщине покрытия 100 мкм его собственное термическое сопротивление составляет лишь малую долю от общего сопротивления теплопередаче, вследствие чего изменение температуры стенки трубы не превышает 1°C , а изменение линейной плотности теплового потока составляет менее 1 %. Таким образом, установлено, что защитное покрытие может повышать коррозионно-эрозионную стойкость труб без существенного ухудшения их теплотехнической эффективности.

Материалы и методы

Наличие на внешней поверхности трубы слоя покрытия полученные методом HVOF из никель-хромового сплава с карбидом хрома ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) существенно снижает скорость как коррозии, так и эрозии. Такое покрытие характеризуется высокой жаростойкостью и твердостью: связка NiCr обеспечивает коррозионную стойкость (за счет образования стабильных оксидов Cr_2O_3), а твердые частицы Cr_3C_2 придают износостойкость. Однако, перед внедрением защитного покрытия требуется провести анализ его влияния на теплофизические свойства труб, включая процессы теплопередачи. В работе внимание уделено оценке возможного влияния покрытия на проектно-эксплуатационные характеристики котельного оборудования, параметры поверхностей нагрева которого изначально определены для конкретных заданных эксплуатационных условий.

Ключевой особенностью является учет защитного покрытия как фактора, меняющего граничные условия теплообмена (коэффициенты теплоотдачи сред и теплопроводность материала). Для оценки теплофизических свойств системы «стенка трубы–покрытие» было использовано компьютерное моделирование в программном комплексе ELCUT методом конечных элементов нестационарных температурных полей. Для построения расчётной модели были приняты допущения, характерные для задач теплопроводности многослойных цилиндрических конструкций [16]. Расчётная методика основана на применении критериальных зависимостей теплообмена и уравнений теплопередачи через многослойную цилиндрическую стенку.

Численный расчёт температурного поля в сечении трубы диаметром $\varnothing 32 \times 4$ выполнялся в программном комплексе ELCUT 6.6 методом конечных элементов для решения задач теплопроводности и теплопередачи. Моделирование проводилось в модуле «Нестационарная теплопередача» в плоской постановке задачи. Геометрия расчётной области представляла собой поперечное сечение трубного элемента, моделируемое в виде осесимметричной цилиндрической стенки. В качестве исходных данных задавались коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к наружной поверхности трубы и от внутренней поверхности к пару, а также температуры соответствующих сред. Теплофизические свойства материала трубы (сталь 12X1МФ) и покрытия ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$) включали коэффициент теплопроводности, удельную теплоёмкость и плотность.

Расчёт температурного поля выполнялся в радиальной постановке для многослойной цилиндрической стенки трубы. Задача рассматривалась как нестационарная теплопроводность с последующим выходом на установившийся режим. Для материала трубы и покрытия использовалось уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (1)$$

где

ρ – плотность материала, кг/м^3 ;

c – удельная теплоёмкость, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$;

T – температура, K или $^\circ\text{C}$;

t – время, с ;

λ – коэффициент теплопроводности материала, $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$.

Для цилиндрической стенки при радиальном переносе теплоты уравнение может быть записано в виде:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

где

r – радиальная координата, м.

На внутренней поверхности трубы задавалось граничное условие конвективного теплообмена между стенкой и перегретым паром:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_1 (T_s - T_p) \quad (3)$$

где

α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки к пару, Вт/(м²·К);

T_s – температура поверхности стенки, °С;

T_p – средняя температура пара, °С.

На наружной поверхности трубы с покрытием задавалось комбинированное граничное условие теплообмена с дымовыми газами, включающее конвективную и радиационную составляющие:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_k (T_g - T_s) + \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4) \quad (4)$$

где

α_k – конвективный коэффициент теплоотдачи со стороны дымовых газов, Вт/(м²·К);

T_g – температура дымовых газов, К;

T_s – температура наружной поверхности, К;

ε – приведённая степень чёрноты поверхности;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Для учёта теплофизических свойств были приняты параметры котла БКЗ-320-140 (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры ширмового пароперегревателя по котлоагрегату БКЗ-320-140

Величина	Обозначение	Значение
Давление перегретого пара	p	14 МПа
Температура пара на входе в систему пароперегревателей	$T_{вх}$	372 °С
Температура пара на выходе из системы пароперегревателей	$T_{вых}$	410 °С
Внешний диаметр труб	d_2	32 мм
Внутренний диаметр труб	d_1	24 мм
Теплопроводность стенки (12Х1МФ)	λ_w	40 Вт/(м·К)
Теплопроводность стенки (Cr ₃ C ₂ -NiCr)	$\lambda_{w,пкр}$	19 Вт/(м·К)
Скорость пара в трубах	w_1	16 м/с
Скорость газов (узкое сечение)	w_2	19,5 м/с
Температура дымовых газов на участке входа в ширмовый пароперегреватель	$T_{д1}$	1177 °С
Температура дымовых газов на участке выхода из ширмовый пароперегревателя	$T_{д2}$	1067 °С
Кинематическая вязкость при $t=1122$ °	ν	$197,1 \cdot 10^{(-6)}$ м ² /с;
Коэффициент теплопроводности дымовых газов при $t=1122$ °С	$\lambda_{дг}$	$11,75 \cdot 10^{(-3)}$ Вт/(м·К)
Число Прандтля: при $t=1122$ °С	Pr	0,57
Плотность пара: при $t=391$ °С и давлении $p_{пп}=14$ Мпа	ρ	60,07 кг/м ³
Динамическая вязкость пара	μ	$2,4828 \cdot 10^{(-5)}$ Па·с

Данные параметры приняты на основании литературных данных и эксплуатационных характеристик котла БКЗ-320-140.

Для оценки теплоотдачи со стороны рабочего тела (перегретого пара) в трубах пароперегревателя первоначально определялся режим течения. В качестве определяющего безразмерного параметра использовался критерий Рейнольдса для внутреннего течения в трубопроводе.

$$Re = \frac{w \cdot d_n}{\nu}, \quad (5)$$

где w – средняя скорость потока, м/с; d_n – внутренний диаметр трубы, м; ν – кинематическая вязкость, м²/с.

Согласно классическим положениям теории теплообмена [9], при $Re > 10^4$ течение в трубах считается развитым турбулентным, что позволяет применять обобщённые критериальные зависимости для расчёта коэффициента теплоотдачи. Для турбулентного течения в трубах число Нуссельта определялось по формуле [4, 7]:

$$Nu = c Re^n \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right)^{0,25} \quad (6)$$

Где Pr – число Прандтля теплоносителя при средней температуре потока;

Pr_w – число Прандтля при температуре стенки.

Коэффициент теплоотдачи [10,11]:

$$a_n = \frac{Nu \cdot \lambda_n}{d_n} \quad (7)$$

где λ_n – теплопроводность рабочей среды [12]

Схема теплопередачи через цилиндрическую стенку без покрытия приведена на рисунке 1.

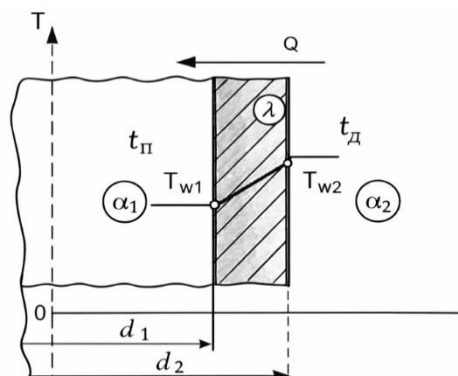


Рисунок 1 – Распределение температуры по толщине однослойной стенки (металл 12Х1МФ).
 T_{w2} внешняя граница

Схема теплопередачи через градиентную структуру покрытия Cr_3C_2-NiCr и цилиндрическую стенку приведена на рисунке 2.

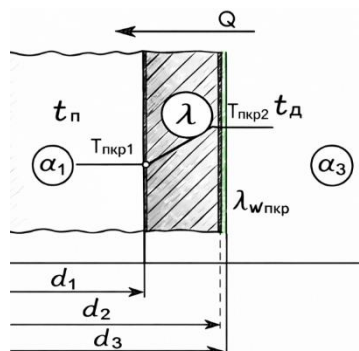


Рисунок 2 – Распределение температуры по толщине многослойной стенки (металл 12Х1МФ+покрытие Cr_3C_2-NiCr). $T_{пкр2}$ внешняя граница

Эффективность котлоагрегата определяется долей тепла, переданного рабочему телу (пару), от общего количества теплоты, подведённой с продуктами сгорания. При неизменном тепловом вводе снижение интенсивности теплопередачи через стенку труб поверхностей нагрева приводит к уменьшению полезного теплового потока, проходящего через рассматриваемый участок трубы длиной l .

Поскольку перенос теплоты к пару осуществляется через последовательную систему «дымовые газы – наружная конвекция – стенка трубы – внутренняя конвекция – пар», физически обоснованным является использование эквивалентного линейного термического сопротивления [7,12].

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \Sigma d_2} \text{ (м·К)/Вт} \quad (8)$$

Где R_l – суммарное линейное термическое сопротивление трубы без покрытия, (м·К)/Вт;

α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к пару, Вт/(м²·К);

α_2, Σ – суммарный коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к наружной поверхности трубы с учётом конвекции и излучения, Вт/(м²·К);

d_1 – внутренний диаметр трубы, м;

d_2 – наружный диаметр трубы без покрытия, м;

λ_w – коэффициент теплопроводности стали 12Х1МФ, Вт/(м·К).

$$R_{l,1} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} \quad (9)$$

$$R_{l,2} = \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (10)$$

$$R_{l,3} = \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3} \quad (11)$$

Составляющие суммарного линейного термического сопротивления определялись по формулам (9-11).

Температурное состояние стенки трубы с покрытием определяется совместным действием конвективного теплообмена и теплопроводности материалов, при этом наличие покрытия увеличивает суммарное линейное термическое сопротивление R_l , изменяя распределение температуры по радиусу и влияя на линейную плотность теплового потока и выглядит следующим образом:

$$R_{l,p} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_w} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_p} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \Sigma d_3} \text{ (м·К)/Вт} \quad (12)$$

Для цилиндрической стенки линейная плотность теплового потока определяется из условия равенства теплового потока на всех участках теплопередачи и может быть выражена через суммарное линейное термическое сопротивление без покрытия [7]:

$$q_l = \frac{\pi(T_n - T_{дг})}{\Sigma R_l} \quad \text{Вт/м} \quad (13)$$

или с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$:

$$q_l = \frac{\pi(T_n - T_{дг})}{\Sigma R_{l,n}} \text{ Вт/м} \quad (14)$$

Расчет температур наружной и внутренней стенок трубы основан на определении линейной плотности теплового потока и пропорциональности перепадов температур термическим сопротивлениям соответствующих участков и выглядит следующим образом:

$$T_{w,1} = t_n - q_l \cdot \frac{R_{l,1}}{\pi} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15)$$

$$T_{w,2} = t_d - q_l \cdot \frac{R_{l,3}}{\pi} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (16)$$

Для трубы с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$:

$$T_{пкр1} = T_n - q_l \cdot \frac{R_{l,1}}{\pi} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (17)$$

$$T_{пкр2} = t_d - q_l \cdot \frac{R_{l,4}}{\pi} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (18)$$

Результаты и обсуждения

Расчёты выполнены для условий эксплуатации ширмового пароперегревателя котла БКЗ-320-140 с использованием аналитических зависимостей и численного моделирования в программном комплексе ELCUT. Моделирование в ELCUT проводилось для нестационарного режима с последующим выходом на стационарное состояние. Полученные коэффициенты теплоотдачи использованы при моделировании температурного состояния трубы без покрытия и с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$.

Внешний теплообмен со стороны дымовых газов рассматривался с учётом конвективной и лучистой составляющих. Полученный суммарный коэффициент теплоотдачи использован при расчёте теплового состояния трубы без покрытия и с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$.

Результаты расчёта теплового состояния трубы без покрытия представлены в таблице 2. Полученные значения показывают, что температура наружной поверхности трубы выше

температуры внутренней поверхности, что соответствует направлению теплопередачи от дымовых газов к перегретому пару.

Нестационарный расчет (паропровод без покрытия) проводился в программе Elcut. Исходными данными служили коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке и от стенки к пару, определяющие температуры дымовых газов и пара, а также коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность стали 12Х1МФ. В расчете не учитывалась зависимость этих параметров от температуры, т.к. по табличным данным примерно в диапазоне от 20-400 градусов параметры меняются незначительно.

Начальная температура для нестационарного расчета была принята за $T_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рисунке 3 показано температурное поле трубы без покрытия после выхода системы на установившийся режим. Температурное распределение имеет равномерный радиальный характер. Распределение температуры по толщине трубопровода представлено на рисунке 4.

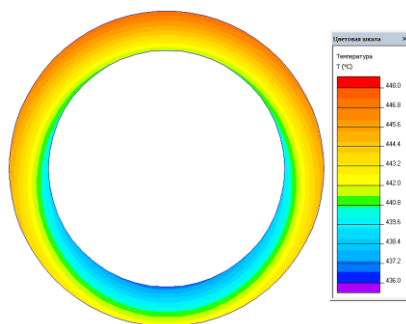


Рисунок 3 – Температурное поле в сечении спустя $t=600$ сек

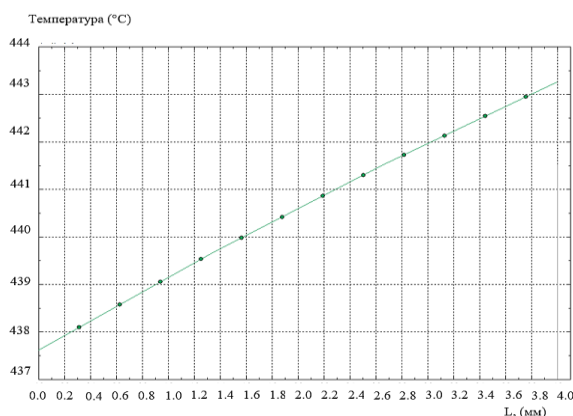


Рисунок 4 – Распределение температуры по толщине трубы после 60 с.

На рисунке 4 представлено распределение температуры по толщине стенки трубы без покрытия. Разность температур между внутренней и наружной поверхностями составляет около 9°C .

Из представленных в таблице 2 данных следует, что результаты аналитического расчёта и численного моделирования в программном комплексе ELCUT хорошо согласуются между собой. Расхождение между полученными значениями не превышает 0,1%, что подтверждает корректность разработанной расчётной модели. Результаты расчёта для трубы с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ представлены в таблице 3. Нанесение покрытия толщиной 100 мкм приводит к незначительному изменению температурного состояния трубы и не оказывает существенного влияния на теплопередачу.

Таблица 2 – Результаты расчетов без покрытия

Показатели	Математические расчеты	Расчеты в программе Elcut
Температура $T_{w,1}$, $^{\circ}\text{C}$	415,2	415,198
Температура $T_{w,2}$, $^{\circ}\text{C}$	424,3	424,285

Нестационарный расчет проводился в программе Elcut. Исходными данными служили коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к стенке и от стенки к пару, определяющие температуры дымовых газов и пара, а также коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность стали 12X1МФ и соответственно теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность сплава $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$. В расчете не учитывалась зависимость этих параметров от температуры, т.к. по табличным данным примерно в диапазоне от 20-400 градусов параметры меняются незначительно.

Начальная температура для нестационарного расчета была принята за $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

На рисунке 5 показано температурное поле трубы с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$. Видно, что наличие тонкого покрытия не приводит к существенному изменению температурного поля. Распределение температуры по толщине трубопровода представлено на рисунке 6.

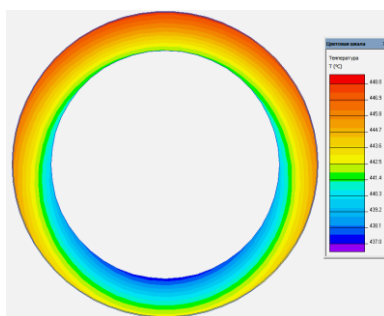


Рисунок 5 – Температурное поле в сечении спустя $t=600$ С

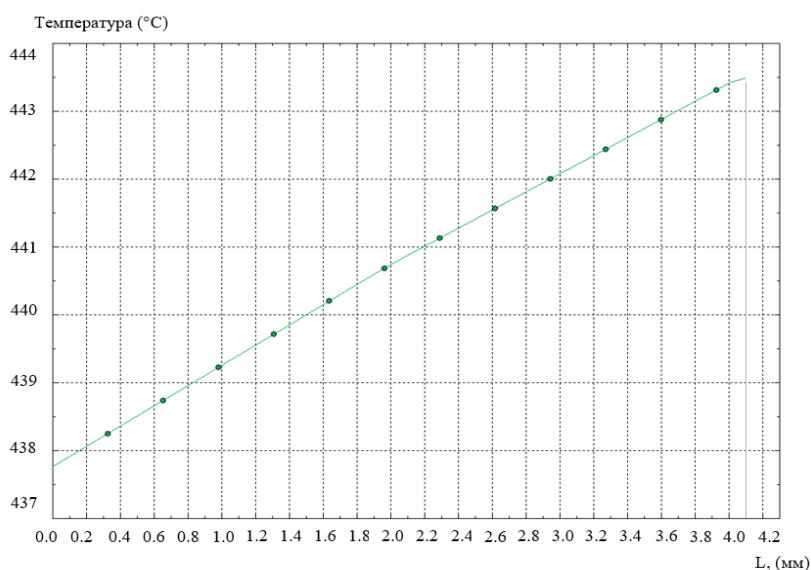


Рисунок 6 – Распределение температуры по толщине трубы после 600 секунд

На рисунке 6 представлено распределение температуры по толщине трубы с покрытием. По сравнению с трубой без покрытия изменение температуры наружной поверхности составляет менее 1°C .

Сравнение результатов аналитического расчёта и численного моделирования для трубы с покрытием также показывает высокую степень согласованности результатов. Расхождение между расчётными данными и результатами моделирования не превышает 0,1 %, что подтверждает достоверность используемой модели (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты расчётов для трубы с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$

Показатели	Математические расчеты	Расчеты в программе Elcut
Температура $T_{\text{пкр1}}, ^\circ\text{C}$	415,38	415,377
Температура $T_{\text{пкр2}}, ^\circ\text{C}$	424,66	424,647

Из данных таблицы 4 следует, что нанесение покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ толщиной 100 мкм практически не изменяет теплотехнические характеристики трубы. Изменение температуры наружной поверхности не превышает 1°C , а изменение линейной плотности теплового потока составляет менее 1%, что свидетельствует об отсутствии существенного влияния покрытия на эффективность теплообмена.

Таблица 4 – Сравнение теплотехнических параметров трубы без покрытия и с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$

Параметр	Без покрытия	С покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$
Суммарное термическое сопротивление, $(\text{м}\cdot\text{К})/\text{Вт}$	0,2627	0,2617
Линейная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}$	8738,3	8770,5
Температура внутренней поверхности, $^\circ\text{C}$	415,2	415,4
Температура наружной поверхности, $^\circ\text{C}$	424,3	424,7

Для оценки устойчивости полученных результатов был проведён анализ чувствительности расчётной модели к изменению толщины покрытия, коэффициента теплопроводности покрытия и температуры дымовых газов. Такой анализ необходим, поскольку в реальных условиях толщина газотермического покрытия может изменяться в зависимости от режима напыления, а теплофизические свойства покрытия зависят от пористости, фазового состава и степени окисления материала.

В качестве варьируемых параметров рассматривались: толщина покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ в диапазоне 50-300 мкм, коэффициент теплопроводности покрытия в диапазоне 10-30 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а также температура дымовых газов в диапазоне $1067\text{-}1177^\circ\text{C}$. Оценивалось влияние этих параметров на суммарное линейное термическое сопротивление, линейную плотность теплового потока и температуру наружной поверхности трубы.

Анализ показал, что увеличение толщины покрытия приводит к росту термического сопротивления многослойной стенки, однако при технологически применимой толщине 100 мкм вклад покрытия остаётся незначительным по сравнению с сопротивлением внешнего теплообмена со стороны дымовых газов. Следовательно, изменение теплового потока и температуры стенки трубы остаётся минимальным. Наиболее чувствительным параметром является не теплопроводность тонкого покрытия, а температура дымовых газов и суммарный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности.

В рамках данной работы анализ чувствительности выполнен как параметрическая оценка влияния основных факторов на расчётную модель (табл. 5). Количественное уточнение зависимости $R_{l,p}, R_{l,p}, q_l, T_s$ от толщины покрытия планируется выполнить на следующем этапе исследования с использованием серии расчётов в ELCUT.

Таблица 5 – Параметры анализа чувствительности расчётной модели

Варируемый параметр	Диапазон изменения	Оцениваемый результат
Толщина покрытия δ	50-300 мкм	$R_{l,p}, q_l, T_s$
Теплопроводность покрытия λ_p	10-30 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	изменение термического сопротивления покрытия
Температура дымовых газов T_g	$1067\text{-}1177^\circ\text{C}$	изменение температуры наружной стенки и теплового потока

Проведённый анализ показал, что добавочное термическое сопротивление покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ толщиной 100 мкм составляет $4,126\cdot 10^{-5} (\text{м}\cdot\text{К})/\text{Вт}$, что значительно меньше сопротивления внешнего теплообмена со стороны дымовых газов. Поэтому влияние покрытия на суммарное термическое сопротивление, температуру стенки и линейную плотность теплового потока остаётся незначительным.

Полученный результат объясняется соотношением отдельных составляющих суммарного термического сопротивления. Несмотря на то что теплопроводность покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ниже теплопроводности стали 12Х1МФ, его толщина составляет всего 100 мкм. Поэтому добавочное сопротивление слоя покрытия оказывается значительно меньше сопротивления внешнего теплообмена со стороны дымовых газов. Основной температурный

перепад формируется не в тонком покрытии, а в зоне внешнего теплообмена между дымовыми газами и наружной поверхностью трубы. Вследствие этого нанесение покрытия приводит лишь к незначительному изменению температурного поля и линейного теплового потока. Физически это означает, что покрытие выполняет преимущественно защитную функцию, повышая стойкость поверхности к коррозионно-эрозионному износу, но не создаёт существенного теплового барьера для передачи теплоты к пару.

Покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, полученное методом HVOF, выполняет преимущественно защитную функцию в условиях высокотемпературного газового потока и коррозионно-эрозионного износа. Карбидная составляющая Cr_3C_2 обеспечивает высокую твёрдость и сопротивление воздействию золы частиц, тогда как NiCr-связка способствует повышению жаростойкости и коррозионной стойкости за счёт формирования защитных оксидных слоёв на основе Cr_2O_3 . С учётом результатов теплотехнического расчёта можно заключить, что такое покрытие повышает эксплуатационную стойкость поверхности нагрева, не создавая существенного дополнительного теплового сопротивления. [14].

Заключение

На основе критериальных зависимостей теплообмена (Re , Pr , Nu) установлено, что как во внутреннем потоке пара, так и во внешнем потоке дымовых газов реализуется развитый турбулентный режим, что обосновывает применение соответствующих корреляционных уравнений при расчёте коэффициентов теплоотдачи и теплового потока через стенку трубы.

С использованием программного комплекса ELCUT 6.6 создана конечно-элементная модель трубы диаметром $\varnothing 32 \times 4$ мм из стали 12X1МФ первой ступени пароперегревателя котла БКЗ-320-140. Модель учитывает реальные эксплуатационные параметры: давление пара 14 МПа, температуру дымовых газов до 1177°C и теплофизические свойства защитного покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$.

Теплотехнический расчёт и моделирование показали, что для трубы без покрытия температура внутренней поверхности составляет $415,2^\circ\text{C}$ ($415,198^\circ\text{C}$ по ELCUT), а внешней поверхности – $424,3^\circ\text{C}$ ($424,285^\circ\text{C}$ по ELCUT), тогда как для трубы с покрытием $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ температура внутренней поверхности составляет $415,38^\circ\text{C}$ ($415,377^\circ\text{C}$ по ELCUT), а внешней поверхности – $424,66^\circ\text{C}$ ($424,647^\circ\text{C}$ по ELCUT). Установлено, что нанесение покрытия приводит к незначительному увеличению суммарного термического сопротивления системы вследствие добавления дополнительного слоя $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ с более низкой теплопроводностью по сравнению со сталью 12X1МФ. Однако из-за малой толщины покрытия (100 мкм) увеличение термического сопротивления остаётся минимальным, вследствие чего изменение линейной плотности теплового потока не превышает 0,38%, а температурный режим трубы изменяется менее чем на 1°C .

Показано, что снижение теплопроводности покрытия не оказывает существенного влияния на теплотехническую эффективность пароперегревателя, поскольку основная доля общего термического сопротивления системы определяется конвективным теплообменом со стороны дымовых газов и пара. В связи с этим покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ может рассматриваться как эффективное защитное решение для поверхностей нагрева котлов.

Инженерный смысл полученного результата состоит в том, что покрытие $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ толщиной 100 мкм не является критическим тепловым барьером для труб ширмового пароперегревателя. При расчётных условиях котла БКЗ-320-140 изменение температуры стенки составляет менее 1°C , а изменение линейной плотности теплового потока не превышает 1%. Следовательно, применение такого покрытия может быть рекомендовано как способ повышения ресурса труб за счёт защиты от коррозионно-эрозионного износа без заметного снижения теплотехнической эффективности поверхности нагрева.

Список литературы

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. 524 p.
2. Министерство энергетики Республики Казахстан. Топливо-энергетический баланс Республики Казахстан. Астана, 2022. – 120 с.
3. Samruk-Energy JSC. Annual Report 2022. Astana, 2023. – 180 p.
4. Viswanathan R. Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components. Materials Park: ASM International. – 1989. – 500 p.
<https://doi.org/10.31399/asm.tb.dmlahtc.9781627083409>.

5. Stringer J. High temperature corrosion of metals / J. Stringer // *Materials Science and Technology*. – 1987. – Vol. 3. – P. 482-493. <https://doi.org/10.1080/02670836.1987.11782259>.
6. Ненашев А.А. Моделирование и исследование топочно-горелочных процессов энергетических паровых котлов: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. – 150 с.
7. Oka Y. Erosion and corrosion behavior of boiler tubes / Y. Oka, Y. Mihara, M. Yamamoto // *Wear*. – 2005. – Vol. 258. – P. 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.004>.
8. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications / R.C. Reed // Cambridge: Cambridge University Press. – 2006. – 372 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>.
9. Герасимова Н.П. Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов / Н.П. Герасимова // *iPolytech Journal*. – 2020. – Т. 24, № 3(152). – С. 596-605. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605>.
10. Modest M.F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest // 3rd ed. Academic Press. – 2013. – 928 p.
11. Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings / S. Sampath et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2003. – Vol. 201. – P. 1979-1989. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.023>.
12. Hydrophilic modification of expanded polytetrafluoroethylene (ePTFE) by atmospheric pressure glow discharge (APG) treatment / E. Njatawidjaja et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Т. 201, № 3-4. – P. 699-706. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.017>.
13. Myung H.S. A study on the synthesis and formation behavior of nanostructured TiN films by copper doping / H.S. Myung, J.G. Han, J.H. Boo // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 404-408. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.016>.
14. Jackson R.L. A multi-scale model for contact between rough surfaces / R.L. Jackson, J.L. Streater // *Wear*. – 2006. – Vol. 261. – No. 11-12. – P. 1337-1347. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.015>.
15. Singh S. A review on protection of boiler tube steels with thermal spray coatings from hot corrosion / S. Singh, K. Goyal, R. Bhatia // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 56. – P. 379-383. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.219>.
16. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications – A comprehensive review / V. Lakkannavar et al // *Results in Surfaces and Interfaces*. – 2024. – Vol. 16. – Article 100250. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100250>.
17. High Temperature Corrosion Resistant and Anti-slagging Coatings for Boilers: A Review / K. Khantisopon et al // *High Temperature Corrosion of Materials*. – 2024. – Vol. 101, Suppl. 1. – P. 1-55. <https://doi.org/10.1007/s11085-024-10251-0>.

References

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023. 524 p. (In English).
2. Ministerstvo energetiki Respubliki Kazakhstan. Toplivno-energeticheskii balans Respubliki Kazakhstan. Astana, 2022. – 120 s. (In Russian).
3. Samruk-Energy JSC. Annual Report 2022. Astana, 2023. – 180 p. (In English).
4. Viswanathan R. Damage mechanisms and life assessment of high-temperature components. Materials Park: ASM International. – 1989. – 500 p. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.dmlahtc.9781627083409>. (In English).
5. Stringer J. High temperature corrosion of metals / J. Stringer // *Materials Science and Technology*. – 1987. – Vol. 3. – P. 482-493. <https://doi.org/10.1080/02670836.1987.11782259>. (In English).
6. Nenashev A.A. Modelirovanie i issledovanie topochno-gorelochnykh protsessov energeticheskikh parovykh kotlov: dis. ... kand. tekhn. nauk. Krasnoyarsk : Sibirskii federal'nyi universitet, 2023. – 150 s. (In Russian).
7. Oka Y. Erosion and corrosion behavior of boiler tubes / Y. Oka, Y. Mihara, M. Yamamoto // *Wear*. – 2005. – Vol. 258. – P. 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.004>. (In English).
8. Reed R.C. The Superalloys: Fundamentals and Applications / R.C. Reed // Cambridge: Cambridge University Press. – 2006. – 372 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511541285>. (In English).

9. Gerasimova N.P. Zolovoi iznos poverkhnostei nagreva kotloagregatov / N.P. Gerasimova // iPolytech Journal. – 2020. – T. 24, № 3(152). – S. 596-605. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605>. (In Russian).
10. Modest M.F. Radiative Heat Transfer / M.F. Modest // 3rd ed. Academic Press. – 2013. – 928 p. (In English).
11. Role of thermal spray processing method on the microstructure, residual stress and properties of coatings / S. Sampath et al // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 201. – P. 1979-1989. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.08.023>. (In English).
12. Hydrophilic modification of expanded polytetrafluoroethylene (ePTFE) by atmospheric pressure glow discharge (APG) treatment / E. Njatawidjaja et al // Surface and Coatings Technology. – 2006. – T. 201, № 3-4. – R. 699-706. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.017>. (In English).
13. Myung H.S. A study on the synthesis and formation behavior of nanostructured TiN films by copper doping / H.S. Myung, J.G. Han, J.H. Boo // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 177-178. – P. 404-408. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2003.09.016>. (In English).
14. Jackson R.L. A multi-scale model for contact between rough surfaces / R.L. Jackson, J.L. Streater // Wear. – 2006. – Vol. 261. – No. 11-12. – P. 1337-1347. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.015>. (In English).
15. Singh S. A review on protection of boiler tube steels with thermal spray coatings from hot corrosion / S. Singh, K. Goyal, R. Bhatia // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 56. – P. 379-383. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.219>. (In English).
16. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications – A comprehensive review / V. Lakkannavar et al // Results in Surfaces and Interfaces. – 2024. – Vol. 16. – Article 100250. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100250>. (In English).
17. High Temperature Corrosion Resistant and Anti-slagging Coatings for Boilers: A Review / K. Khantisophon et al // High Temperature Corrosion of Materials. – 2024. – Vol. 101, Suppl. 1. – P. 1-55. <https://doi.org/10.1007/s11085-024-10251-0>. (In English).

Информация о финансировании:

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP226683418).

М.К. Даутбеков¹, А.Б. Кеңесбеков², Т.Т. Төлеубаев³, А. Мұра^{}**

¹ЖШС «PlasmaScience», 070002, Қазақстан, Өскемен қ., Гоголь к., 7г

²ЖШС «Институт композиционных материалов»

070002, Қазақстан, Өскемен қ., Шакарим, 157

³ЖШС «Өскемен ЖЭО», Қазақстан, Өскемен қ., Промышленная к., 2

*e-mail: aibolm02@gmail.com

ВКЗ-320-140 ҚАЗАНДЫҒЫНЫҢ ҚЫЗДЫРҒЫШ ТҮТІКТЕРІНІҢ ЖЫЛУ КЕДЕРГІСІ МЕН ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ КҮЙІНЕ ЖҰҚА HVOF ЖАБЫНЫНЫҢ Cr_3C_2 -NiCr ӘСЕРІ

Бұл жұмыста HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2 -NiCr негізіндегі газотермиялық жабындардың ВКЗ-320-140 қазан агрегатының экрандық бу қыздырғыш құбырларының жылуфизикалық сипаттамаларына әсері талданды. Қорғаныш жабынның жылуалмасу процестеріне, соның ішінде конвективті және сәулелік жылуалмасуға, сондай-ақ жоғары температуралы түтін газдары әсеріндегі металлдың температуралық күйіне ықпалы қарастырылды. Температуралық өріс ELCUT 6.6 бағдарламалық кешенінде соңғы элементтер әдісі арқылы бейстационарлық режимде есептелді. Модельдеу барысында бу қысымы мен температурасы, ағын жылдамдығы және материалдардың жылуфизикалық қасиеттері ескерілді. Нәтижелер көрсеткендей, жабынның болуы «құбыр қабырғасы – жабын» жүйесінің жалпы жылулық кедергісін аздап арттырады. Сонымен қатар жабынның температуралық режимге және жылу ағынының тығыздығына әсері мардымсыз. Cr_3C_2 -NiCr жабындарын қолдану қыздыру беттерінің коррозиялық-эрозиялық төзімділігін арттырып, қазан агрегатының жылутехникалық тиімділігін төмендетпейтіні анықталды нақты өндірістік жағдайларда. Алынған нәтижелер жылу электр станцияларының энергетикалық жабдықтарын жобалау, жаңғырту және оңтайландыру кезінде Қазақстан өнеркәсіптік энергетикасында қолданылуы мүмкін.

Түйін сөздер: жылу электр станциялары, жылыту беттері, қыздырғыш, жылулық бүрку, детонациялық бүрку, қорғаныс жабындары.

M.K. Dautbekov¹, A.B. Kengesbekov², T.T. Toleubayev³, A. Mural*

¹PlasmaScience LLP, 070002, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, st. Gogol, 7g

²Institute of Composite Materials LLP,

070002, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, st. Shakarym Ave. 157

³LLP «Ust-Kamenogorsk CHP», Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Promyshlennaya St., 2

*e-mail: aibolm02@gmail.com

THE EFFECT OF A THIN Cr_3C_2 -NICR HVOF COATING ON THE THERMAL RESISTANCE AND TEMPERATURE DISTRIBUTION OF STEAM SUPERHEATER TUBES IN A BKZ-320-140 BOILER

This study analyzes the effect of HVOF-sprayed Cr_3C_2 -NiCr coatings on the thermophysical characteristics of superheater tubes of the BKZ-320-140 boiler unit. The influence of the protective coating on heat transfer processes, including convective and radiative heat exchange, as well as on the temperature state of the tube material under high-temperature flue gas conditions, is investigated. The temperature field was calculated using the finite element method in the ELCUT 6.6 software under transient heat transfer conditions. The model incorporates real operating parameters, including steam pressure and temperature, flow velocities, and thermophysical properties of materials. The results show that the presence of the coating leads to a slight increase in the total thermal resistance of the “tube wall–coating” system. However, its effect on the temperature regime and heat flux density is negligible. It is demonstrated that Cr_3C_2 -NiCr coatings improve the corrosion and erosion resistance of heating surfaces without significantly reducing the thermal efficiency of the boiler unit under real operating conditions. The obtained results can be applied in design, modernization and optimization of power equipment in industrial energy systems of Kazakhstan.

Key words: thermal power plants, heating surfaces, steam superheater, gas thermal spraying, detonation spraying, protective coatings.

Сведения об авторах

Мерхат Курметович Даутбеков – научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: merkhatd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>.

Айдар Бақытбекұлы Кеңесбеков – старший научный сотрудник ТОО «Институт композиционных материалов»; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5630-9467>.

Тұрар Тұрысбекұлы Төлеубаев – руководитель отдела подготовки ремонтов и перспективного развития ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: turar.t.t@mail.ru.

Айбол Мурал* – младший научный сотрудник ТОО «PlasmaScience», Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: aibolm02@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>.

Авторлар туралы мәліметтер

Меруерт Курметұлы Даутбеков – ЖШС «PlasmaScience» ғылыми қызметкері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: merkhatd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>.

Айдар Бақытбекұлы Кеңесбеков – «Композиттік материалдар институты» ЖШС аға ғылыми қызметкері; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5630-9467>.

Тұрар Тұрысбекұлы Төлеубаев – «Өскемен ЖЭО» ЖШС жөндеулерді дайындау және перспективалық даму бөлімінің басшысы, Өскемен, Қазақстан; e-mail: turar.t.t@mail.ru.

Айбол Мурал* – ЖШС «PlasmaScience» кіші ғылыми қызметкері, Өскемен, Қазақстан; e-mail: aibolm02@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>.

Information about the authors

Merkhat Kurmetovich Dautbekov – Researcher, PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: merkhatd@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0203-6050>.

Aidar Bakytbrkuly Kenesbekov – Senior Researcher, LLP «Institute of Composite Materials»; e-mail: kenesbekovaidar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5630-9467>.

Turar Turysbekuly Toleubaev – Head of the Department of Repair Preparation and Prospective Development, LLP «Ust-Kamenogorsk Combined Heat and Power Plant», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: turar.t.t@mail.ru.

Aibol Mural* – Junior Researcher, PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: aibolm02@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8026-1408>.

Поступила в редакцию 31.03.2026

Поступила после доработки 20.05.2026

Принята к публикации 03.06.2026