

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/FYZZ1289>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А. Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/MJZI9223>

**А. А. Генбач¹, Д. Ю. *Бондарцев², Н. А. Генбач³,
Е. А. Генбач⁴**

^{1,2,3,4}Алматинский Университет Энергетики и Связи
имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9876-2736>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0344-278X>

*e-mail: d.bondartsev@aues.kz

СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ С ПОКРЫТИЯМИ ИЗ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведены исследования предельных тепловых нагрузок для систем охлаждения с покрытиями из природных материалов. Определены принципы конструирования камер сгорания, сопел и условия напыления материала на поверхность нагрева. Исследования имеют практическое значение в области предельного состояния парогенерирующей поверхности, защищаемой охлаждением от пережога. Разработаны системы охлаждения с пористыми покрытиями, которые позволяют исключить развитие трещин в покрытиях камер и сопел за счет термодинамического и акустического экранов из трех тепловых источников, и устройства для проведения напыления покрытий детонационными высокотемпературными факелами, истекающими из камер сгорания и сопел, охлаждаемых капиллярно-пористыми покрытиями. В исследованиях применялся метод голографии и скоростной киноплёнки. Измерялись тепловые потоки, температуры, расходы, давления потоков жидкости и газа. Установлены термодинамические характеристики кислородно-керосиновых горелок для генерации ими сверхзвуковых высокотемпературных детонационных факелов при напылении покрытий из порошков природных материалов, получен гранулометрический состав материалов, подобраны гидродинамические режимы работы горелок в диапазоне удельных тепловых потоков ($2 \cdot 106 \div 2 \cdot 107$) Вт/м² от факела струи в покрытие.

Коэффициент избытка окислителя варьировался в пределах $0,3 \div 0,8$; температура факела струи ($3000 \div 850$) °С; длина струи ($0 \div 0,16$) м; радиус струи ($3 \div 10$) · 10-3 м; угол оси горелки к покрытию ($90 \div 0$) град.

Ключевые слова: природные материалы, покрытия, камера сгорания, сопло, горелка (термоинструмент), голография.

Введение.

Изучался механизм процесса теплообмена в капиллярно-пористых структурах с помощью внутренних (термогидравлических) характеристик парообразования [1;2;3;4;5]. Применялись скоростная киносъемка и импульсная голография. Получены простые инженерные формулы расчета критических тепловых нагрузок и предельных возможностей тепломассопереноса в структурах. Однако теплозащитные свойства покрытий из природных материалов (горных пород) в виде порошков, напыляемых реактивными горелками, не исследовались.

Более подробные исследования теплообмена в капиллярно-пористых структурах, приводятся в литературе, имеющейся в работе [4; 6]. Сетчатая пористая структура [7] позволила вдвое расширить теплопередающие возможности системы охлаждения за счет интенсификации теплообмена диспергированными каплями жидкости, причем многофазный поток перемещался в волнистом канале, стенки которого покрывались структурами. Однако пористое покрытие не применялось.

В работах [7; 8] нами использовалось покрытие, напыленное на теплообменную поверхность ракетной горелкой в виде гранитного порошка. Решение задачи термоупругости выявило зависимости нестационарных тепловых потоков и термических напряжений сжатия и растяжения от толщины покрытия (или глубины проникновения температурной волны). Скоростная киносъемка позволила экспериментально подтвердить теорию за счет измерения отрывающихся частиц от поверхности покрытия.

Материалы и методы.

Рассмотрим процесс взаимодействия сверхзвукового потока, генерируемого термоинструментом, с препятствием в зоне замедления потока. Расположение струи к поверхности покрытия – ортогональное.

В процессе взаимодействия сверхзвуковой струи с препятствием наблюдается совокупное воздействие высокоинтенсивной турбулентности [9]. Сверхзвуковая струя относится к типу импактных, влияет и воздействует на механизм теплопередачи на пятне торможения покрытия. Она увеличивает турбулентность (пульсации), а в случае кипящей системы охлаждения разрушает паровые конгломераты.

Запишем для «стандартных условий» уравнение теплопередачи в ламинарном пограничном слое при продольном обтекании пластины:

$$Nu_x = K_1 \sqrt{Re_x^3 Pr}, \quad (1)$$

где $Re_x = W_\infty \cdot \frac{x}{\nu}$, $W_\infty = W_0$. Локальная теплопередача при продольном обтекании пластины в турбулентном пограничном слое [10]:

$$Nu_x = K_2 \cdot Re_x^{0.8} \cdot Pr^{0.43},$$

где $T_{ст} = const$; $10^5 < Re_x < \dots$

В формуле (1) $K_1 = 0,323$; в формуле (2) $K_2 = 0,0296$.

Теплофизические свойства газа принимаются при средней температуре между T_∞ и $T_{ст}$; чаще в моделях за определяющую температуру выбирается температура невозмущенного потока T_∞ , либо $T_{ст}$;

$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ – критерий Прандтля;

Nu_x – число Нуссельта;

$$Nu_x = \alpha_x \cdot \frac{x}{\lambda}. \quad (1)$$

Перепишем число и критерий в более удобной форме для анализа.

Критерий Рейнольдса:

$$Re_x = \frac{\rho_0 \cdot W_0 \cdot x}{\mu_x}.$$

Число Нуссельта:

$$Nu_x = \frac{q(x) \cdot x}{\lambda_x \cdot (T_{a_{ст}} - T_{ст})}, \quad (2)$$

Рассчитаем температуру :

$$Nu_x = \frac{q(x) \cdot x}{\lambda_x \cdot (T_{a_{ст}} - T_{ст})}, \quad (3)$$

$$Tr_\infty = T_\infty + r \cdot \frac{W_\infty^2}{2Cp_\infty}, K; \quad (4)$$

Для :

$$T_{0\infty} = T'_{\infty} + r \cdot \frac{w_{\infty}^2}{2cp_{\infty}}, \text{ К}, \quad (5)$$

При $Pr < 1$, $Ta_{\text{ст}} < T_{0\infty}$.

Коэффициент восстановления:

$$r = \frac{Ta_{\text{ст}} - T'_{\infty}}{T_{0\infty} - T'_{\infty}}. \quad (6)$$

Для ламинарных слоев:

$$r = \sqrt{Pr}. \quad (7)$$

Термодинамическая температура равна:

$$T'_{\infty} = \frac{a_{\infty}^2}{K \cdot R}, \text{ К}. \quad (8)$$

Температура торможения:

$$T_{0\infty} = T_{\infty} \cdot \left[1 + \frac{(K-1)}{2} \cdot M_{\infty}^2 \right], \text{ К}. \quad (9)$$

Температура восстановления равна:

$$T_{r\infty} = T_{\infty} \cdot \left[1 + r \cdot \frac{(K-1)}{2} \cdot M_{\infty}^2 \right], \text{ К}, \quad (10)$$

где $K = \frac{cp}{c\vartheta}$.

Безразмерная длина струи $\bar{z} = \frac{z}{r_a}$, где z – абсцисса струи (от среза сопла до преграды); r_a – радиус струи на срезе сопла. За максимальное значение коэффициента теплоотдачи от струи к покрытию для одного из режимов примем $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Текущим значением является коэффициент теплоотдачи конвекций α от пограничного слоя газа в пятне растекания струи к поверхности покрытия. Тогда имеем следующие значения, указанные в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость от α/α_1 от $\bar{z}$.

a/a_1	0.8	1	0.7	0.4	0.3
	0	10ч30	40	50	60

Для Рк.с. = 1 МПа, $z = (0 \div 0,16)$ м, $T = (3000 \div 850)$ 0С, $T_{\text{ст}}^* = 3000$ 0С – температура торможения (на покрытии), $t_p = 300$ 0С – температура в конце свободной струи, $r_a = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $r_c = 10 \cdot 10^{-3}$ м (радиус струи).

Из таблицы 1 следует, что по длине участка «бочек» струи теплообмен уменьшается, поскольку пограничный слой газа неустойчивый, происходит частичный отрыв его от поверхности нагрева в результате резкого колебания давления в потоке за волной при встрече струи с покрытием этим участком. Уменьшается скорость и температура газа по длине z .

Результаты и обсуждение.

Тепловой поток омываемого высокоскоростным потоком газа, определяется как:

$$q_{\text{ст}} = \alpha \cdot (Ta_{\text{ст}} - T_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2. \quad (11)$$

$$\text{Если } Pr \neq 1 \text{ то} \quad (12)$$

$$Ta_{\text{ст}} = T_{r\infty},$$

$$\text{и } q_{\text{ст}} = \alpha \cdot (T_{r\infty} - T_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2$$

$$\text{Если } Pr = 1, \text{ то} \quad (13)$$

$$Ta_{\text{ст}} = T_{0\infty}$$

$$\text{и } q_{\text{ст}} = \alpha \cdot (T_{0\infty} - T_{\text{ст}}), \text{ Вт/м}^2.$$

Для детонационного сверхзвукового факела эксперименты нами проводились с применением микронасадки для измерения полного и статического давлений и датчика теплового потока для измерения $q(x)$ ах, Mx и p_0 W_0 в растекающейся струе.

$$\text{Числа Маха } M = \frac{W_a}{a} = 2.3.$$

Однако число Nu_x согласно эксперименту в $(5 \div 6)$ раз выше, чем дает ламинарная теория (формула (1)). Возможно, проявляется детонационный

эффект проникновения в ламинарный пограничный слой турбулентных пульсаций из внешнего течения.

При $Re_x \geq 4 \cdot 10^5$ точки располагаются ниже линии согласно формуле (2), т.е. закона турбулентного теплообмена для дозвуковых течений.

Таким образом, для «стандартных условий» теплообмена $K_1 = 0,323$ и $K_2 = 0,0296$. В случае детонационной сверхзвуковой волны, имеем для $Re_x < 4 \cdot 10^5$, $K'_1 = (5 + 6) \cdot K_1$ и для $10^6 \geq Re_x \geq 4 \cdot 10^5$, $K'_2 = 0,95 \cdot K_2$.

Число рассчитывалось по параметрам газа на срезе сопла (индекс «а»):

$$Re_a = \frac{w_a \cdot d_a}{\nu_a},$$

где $Re = 1 \cdot 10^6$; $\bar{l} = \frac{l}{d_a} = 3$.

Степень нерасчетности истечения (см. рис. 1) $Re = 1 \cdot 10^6$; $\bar{l} = \frac{l}{d_a} = 3$.

Отношение давлений	Структура сверхзвуковой струи
$\frac{P_e}{P_b} = 0.4$	
$\frac{P_e}{P_b} = 0.6$	
$\frac{P_e}{P_b} = 0.8$	
$\frac{P_e}{P_b} = 1.5$	

Рисунок 1 – Процесс истечения сверхзвуковой струи из сопла термоинструмента при различных давлениях

В окрестностях критической точки (на покрытии) предполагается ламинарный режим течения, так как число не высокое и действует отрицательный градиент давления.

Выводы

Предложенные системы охлаждения демонстрируют высокую эффективность в защите устройств и покрытий от разрушительного воздействия детонационных высокотемпературных струй. Капиллярно-пористые конструкции охлаждения горелок обеспечивают надежную работу даже при экстремальных тепловых потоках ($2 \cdot 10^6$ Вт/м²), что подтверждается результатами измерений и оптических наблюдений.

Применение наноразмерных покрытий из природных минеральных сред позволяет увеличить критические тепловые нагрузки ($2 \cdot 10^6 \div 2 \cdot 10^7$) Вт/м² и повысить устойчивость покрытий. Эти решения особенно важны при модернизации промышленных объектов, где значительное сокращение расхода охладителя, что способствует повышению экологичности процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Shoukat, A. K., Nurettin, S., Muammer, K. Design, fabrication and nucleate pool-boiling heat transfer performance of hybrid micro-nano scale 2-D modulated porous surfaces. Applied Thermal Engineering. – Volume 153, 5 May 2019, P. 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.133>

2 Gang, L., Weirong, L., Qingzhi, W. The convective heat transfer of fractal porous media under stress condition. International Journal of Thermal Sciences. – Volume 137, March 2019, P. 55–63. – <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.017>

3 Chuang, T. J., Chang, Y. H., Ferng, Y. M. Investigating effects of heating orientations on nucleate boiling heat transfer, bubble dynamics, and wall heat flux partition boiling model for pool boiling. Applied Thermal Engineering. – Volume 163, 25 December 2019, 114358. – <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114358>

4 Kimihide, O., Hosei, N. Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe. International Journal of Thermal Sciences. – Volume 140, June 2019, P. 530–538. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.008>

5Riadh, B., Vincent, P. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. Energy. – Volume 111, 15 September 2016, P. 402–413. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.102>

7 **Seong, W. M., et at.** A novel coolant cooling method for enhancing the performance of the gas turbine combined cycle. *Energy*. – Volume 160, 1 October 2018, P. 625-634. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.035>

8 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloiev, H. I., Genbach, N. A.** Boiling crisis in porous structures. *Energy*: 2022, 259, 125076. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>

9 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Iliev, I. K., Georgiev, A.G.** Scientific method of creation of ecologically clean capillary-porous systems of cooling of power equipment elements of power plants on the example of gas turbines. *Energy*: 2020, 199, 117458. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117458>

10 **Xing, Y., et at.** Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 140, September 2019, P. 25–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109>

11 **Jiin-Yuh, J.** A study of 3-D numerical simulation and comparison with experimental results on turbulent flow of venting flue gas using thermoelectric generator modules and plate fin heat sink. *Energy*. Volume 53, 1 May 2013, P. 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.010>

Поступило в редакцию 04.08.24

Поступило с исправлениями 11.10.24

Принято в печать 04.12.24

A. A. Genbach¹, D.Yu. Bondartsev^{2}, N. A. Genbach³, E. A. Genbach⁴,
^{1,2,3,4}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty*

Received 04.08.24

Received in revised form 11.10.24

Accepted for publication 04.12.24

COOLING SYSTEM WITH NATURAL MATERIALS COATINGS

Studies on the maximum heating loads for cooling systems with natural materials coatings have been carried out. The conditions for spraying the material onto the heating surface, as well as the design principles for nozzles and combustion chambers, have been established. In the area of the steam generating surface limiting state, shielded from burnout by cooling, these investigations are practically significant. Cooling systems with porous coatings have been developed, which make it possible to exclude the fractures development in the chambers and nozzles coatings due to thermodynamic and acoustic screens from three heating sources,

and devices for spraying coatings with detonation high-temperature flares emanating from nozzles and combustion chambers that are cooled by capillary-porous coatings. High-speed film and the holography technology were used during the investigation. Heat streams, temperatures, flow rates, and pressures of liquid and gas flows were measured. Thermodynamic characteristics of oxygen-kerosene burners for the generation of supersonic high-temperature detonation flares by spraying coatings from powders of natural materials are established, the granulometric composition of materials is obtained, hydrodynamic modes of operation of burners in the range of specific heat fluxes are selected ($2 \cdot 10^6 \div 2 \cdot 10^7$) W/m² from the jet torch into the coating. The oxidizer excess rate varied between $0,3 \div 0,8$; the jet torch temperature was $(3000 \div 850)$ °C; the jet length was $(0 \div 0,16)$ m; the jet radius was $(3 \div 10) \cdot 10^{-3}$ m; the burner axis angle to the coating was $(90 \div 0)$ deg.

Keywords: natural materials, coatings, combustion chamber, nozzle, burner (heating tool), holography

А. А. Генбач^{*1}, Д. Ю. Бондарцев², Н. А. Генбач³, Е. А. Генбач⁴

^{1,2,3,4}Ғұмарбек Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

04.08.24 ж. баспаға түсті.

11.10.24 ж. түзетулерімен түсті.

04.12.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАРДАН ЖАСАЛҒАН ЖАБЫНЫ БАР САЛҚЫНДАТУ ЖҮЙЕСІ

Табиғи материалдардан жасалған жабындармен салқындату жүйелері үшін шекті жылу жүктемелеріне зерттеулер жүргізілді. Жану камераларын, шүмектерді құрастыру қағидаттары және материалдың қыздыру бетіне тозаңдану шарттары айқындалған. Зерттеулер күйіп кетуден салқындатумен қорғалатын бу өндіретін беттің шекті жай-күйі саласында практикалық мәнге ие. Үш жылу көзінен тұратын термодинамикалық және акустикалық экрандар есебінен камералар мен шүмектер жабындарындағы жарықтардың дамуын болдырмауға мүмкіндік беретін кеуекті жабындысы бар салқындату жүйелері және капиллярлы-кеуекті салқындатылатын жану камералары мен шүмектерден ағатын детонациялық жоғары температуралы алаулармен жабындарды тозаңдандыруды

жүргізуге арналған құрылғылар әзірленді жабындармен. Зерттеулерде голография және жылдамдық кинопенкасы әдісі қолданылды. Жылу ағындары, температура, шығыстар, сұйықтық және газ ағындарының қысымы өлшенді. Оттегі-керосин жанарғыларының термодинамикалық сипаттамалары табиғи материалдардың ұнтақтарынан жабындарды тозаңдату кезінде олардың дыбыстан жоғары жоғары температуралы детонациялық алау шығаруы үшін белгіленді, материалдардың гранулометриялық құрамы алынды, меншікті жылу ағындарының диапазонында ($2 \cdot 106 \div 2 \cdot 107$) Вт жанарғылар жұмысының гидродинамикалық режимдері таңдалды/м² ағыс алауынан жабуга. Артық тотықтырғыш коэффициенті $0,3 \div 0,8$ шегінде өзгерді; реактивті факелдің температурасы ($3000 \div 850$) °C; ағынның ұзындығы ($0 \div 0,16$) м; ағынның радиусы ($3 \div 10$) · 10-3 м; оттық осінің жабынға бұрышы ($90 \div 0$) град.

Кілтті сөздер: эксперименттік қондырғылар, көрсету, фотокамера, лазер, энергия жабдығы

Теруге 04.12.2024 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс №4317

Сдано в набор 04.12.2024 г. Подписано в печать 30.12.2024 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4317

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz