

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 11. С. 512–523  
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 11, pp. 512–523

Научная статья  
УДК 621.165 (621.45.038)  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184263>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/GVTOUH>

## Исследование теплозащитных покрытий из природных материалов

А.А. Генбач<sup>1</sup>, Д.Ю. Бондарцев<sup>2✉</sup>, Ш.А. Пиралишвили<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Алматинский Университет Энергетики и Связи имени Г. Даукеева, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Рыбинский Государственный Авиационный Технический Университет имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Российская Федерация

<sup>2</sup>[d.bondartsev@aves.kz](mailto:d.bondartsev@aves.kz)✉

**Аннотация.** Проведены исследования теплопередачи для систем охлаждения с покрытиями из природных материалов, в зависимости от параметров детонационного факела термоинструмента и теплофизических свойств природных материалов. Покрытия показали высокую надежность по сравнению с другими форсированными системами. Максимальные удельные тепловые потоки на покрытия – (от 2 до  $15 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) и частота колебания до 200 Гц. Установлены в модели и путем эксперимента термодинамические характеристики кислородно-керосиновых термоинструментов для генерации ими сверхзвуковых высокотемпературных детонационных факелов при напылении покрытий из природных материалов, получен гранулометрический состав материалов, подобраны гидродинамические режимы работы горелок (способ сжигания топлива, длина струи, угол наклона струи). Установлены время полета частиц, оптимальная толщина покрытий, диаметр порошка, предельные напряжения сжатия и растяжения покрытия. Получены зависимости перемещений для покрытий при тепловом воздействии, что важно для диагностики и прогнозирования установок и продления ресурса.

**Ключевые слова:** природные материалы, покрытия, горелка, сопло, камера сгорания, скоростная киносъемка, интерферометрия

**Для цитирования.** Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Пиралишвили Ш.А. Исследование теплозащитных покрытий из природных материалов // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 11. С. 512–523. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184263>

Original article

## Study of heat protective coatings natural materials

A.A. Genbach<sup>1</sup>, D.Yu. Bondartsev<sup>2✉</sup>, Sh.A. Piralishvili<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Soloviev, Rybinsk, Russian Federation

<sup>2</sup>[d.bondartsev@aves.kz](mailto:d.bondartsev@aves.kz)✉

**Abstract.** Heat transfer studies have been conducted for cooling systems with coatings made of natural materials, depending on the parameters of the detonation flame of a thermal tool and the thermophysical

properties of natural materials. The conditions for creation of combustion chambers, nozzles, thermal tools and the principles of spraying the material on the heating surface have been determined. The studies are designed to provide thermal protection of the surface of power plants by cooling them against destruction. Cooling systems with porous coatings of mineral media powders (quartzites, granites, teschenites, tuffs, marbles) had been developed, which were applied on a metal surface at temperatures up to  $(2500\div 3000)^\circ\text{C}$  and flow rates up to 2500 m/s by hot flames emanating from combustion chambers and nozzles. A power supply circuit for thermal tool has been developed, and the holography and high-speed filming method has been used in the studies. The cost impact per one thermal tool is at least 200–300 dollars and the coolant consumption in the cooling system is drastically reduced, which has an environmental impact. The phenomenon of spin detonation of a flame at an oxidant excess coefficient of less than one has been recorded; the spraying process was intensified by 2 to 6 times. The coatings have shown high reliability compared to other boosted systems. The maximum specific heat flows on the coating are (from 2 to  $15\times 10^6$  W/m<sup>2</sup>) and the oscillation frequency is up to 200 Hz. The position of the flame to the impact surface (structure, braking spot, distance of the burner to the coating) is fixed for the melting mode and without it. The overheating range of the coating was  $(20\div 75)$  K. The thermodynamic characteristics of oxygen-kerosene thermal tools for generating supersonic hot detonation flames when sprayed in a coating made of natural materials have been established in the model and experimentally; the granulometric composition of materials has been obtained; the hydrodynamic operating modes of the burners have been selected (fuel combustion method, jet length, jet angle). The flight time of the particles, the optimal thickness of the coatings, the diameter of the powder, and the limiting compression and tensile stresses of the coating have been determined. Dependences of displacements for coatings under thermal influence have been obtained, which is important for diagnostics and forecasting of plants and prolongation of service life.

**Keywords:** natural materials, coatings, burner, nozzle, combustion chamber, high-speed filming, interferometry

**For citation.** Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Piralishvili Sh.A. Study of heat protective coatings natural materials. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 11, pp. 512–523. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=184263>

## 1. Введение

В эффективных системах охлаждения целесообразно организовать процессы кипения жидкости. Однако при высоких  $q$  возможен кризис с разрушением поверхности [1, 2]. Подобные исследования теплообмена и прочности в капиллярно-пористых структурах, выполнены более чем в 50 трудах под руководством доктора технических наук, профессора кафедры Э-1 МГТУ им. Баумана Поляева Владимира Михайловича, часть из которых приводятся в литературе.

Поэтому нами исследуются пористые поверхности с микро- и нано-размерами. Они работают с более высокими тепловыми нагрузками [3]. Наноразмерные и микромасштабные пористые поверхности представлены нами в виде сетчатых структур с покрытиями из природных минеральных сред. Они имеют преимущества объ-

единения этих поверхностей, что дает эффективную технологию их изготовления и позволяет увеличивать пределы отвода тепловых нагрузок и контролировать предельное состояние системы охлаждения.

Актуально повышение эффективности охлаждения камер сгорания турбин различными охладителями для повышения  $\eta$  машин и циклов [4–5]. Рассматриваются водяные, воздушные и паровые охладители. Нами предлагаются новые естественные (природные) покрытия, которые в большей степени увеличивают  $\eta$  цикла [6].

Изучался теплообмен в пористых покрытиях, находящихся в напряженном состоянии [7]. Даны условия действия термических напряжений  $\sigma$  для критического состояния с целью управления теплотеплопередачей.

Такое поведение теплообмена и деформации в пористых покрытиях начало исследоваться

в наших работах [6, 8]. Предложенная модель учитывает модуль упругости, коэффициент Пуассона и структуру горной породы. Становится понятным, что связь теплообмена и напряжения для разного размера пор материалов является сложной и немонотонной.

Однако авторами [7] не выявлен механизм, влияющий на процессы теплообмена и деформации в пористых покрытиях, и не дана методика расчета.

В работах [9–14] рассматривается теплообмен в однородных и неоднородных покрытиях, в специальных фитилях для увеличения отбора  $q$ .

Авторы [15] проводят анализ расчета теплоотдачи по кипению воды с недогревом. Они моделируют очаговую коррозию оболочек твэлов ядерных реакторов как аналог покрытия. Однако не исследован недогрев на кризис.

Многие авторы описывают исследования влияния параметров пористого покрытия, таких как толщина [16–18], пористость и размер частиц, из которых изготовлена структура [19], геометрия структуры [20] на процессы кипения. Имеются исследования влияния внешних условий на интенсивность кипения, давления в системе [21] и ориентации поверхности [22–23], в том числе изучаются специальные покрытия разных конструкций.

Однако во всех перечисленных работах [2–5, 7, 9–23] не рассматривается действие капиллярных и массовых сил ( $\Delta P_g$ ,  $\Delta P_{g+кап.}$ ), а также нет связи между динамикой пузырей и кривой кипения в пористой среде, что нами исследуется в работах [6, 24].

В литературе нанесение напыления покрытий рассматривается с точки зрения машиностроительных и металлургических процессов и проблем [25–28].

Однако уделено мало внимания теплоэнергетическим задачам, особенно напылению природных покрытий с помощью сверхзвуковых высокотемпературных способов в сочетании с явлением детонационных и ударных волн.

Требуется построить единую модель термоупругостных предельных тепловых нагрузок, которая определит для предельного состояния материала термические напряжения, тепловые потоки плавления, сжатия и растяжения, время пребывания частиц напыляемого порошка, размеры порошка и толщину покрытия, что нами изучается в [24].

В то же время весьма мало уделено внимания процессам нанесения напыления порошков естественных минеральных сред из крепких горных пород. В литературе рассматриваются напыления материалов и их сплавов, соединений металлоидного типа и оксидных покрытий [26].

Имеющиеся тепловые сверхзвуковые горелки представляют собой, главным образом, плазмотроны с электрической дугой весьма большой мощности ( $> 40\div 50$  кВт) и работающие при высоких температурах ( $> (3\div 4)\times 10^3$  до  $10^5$  К) и требующие эффективной тепловой защиты самой подложки [27].

Не рассмотрены комбинированные системы охлаждения, включающие порошковое напыление и капиллярно-пористые структуры с кипением жидкости, в том числе использование струйных способов подачи охладителя с кипением на поверхности охлаждения (нагрева), т.е. с учетом скорости и недогрева потока.

Нами внедряются элементы охлаждения для различных тепловых энергоустановок (выбор геометрии и материал аппаратов, подвод и вид энергии). Представлена область применения новой системы [8], что требует дальнейших исследований новых систем охлаждения с покрытиями из природных материалов.

## 2. Экспериментальное исследование процесса нанесения напыления покрытий

Для проведения детонационного режима работы термоинструмента применяется специальное оформление сверхзвуковых сопел с укороченной диффузорной частью. Система охлаждения горелок весьма эффективна и позволяет увеличить ресурс камер сгорания (с 100–150 до 500–600 часов).

**2.1. Инструмент для напыления покрытия** (см. рис. 1, 2) позволяет производить напыление огневым методом сверхзвуковой детонационной высокотемпературной струей.



**Рис. 1.** Установка выполненная в виде горелки 1. Камера сгорания охлаждается покрытиями 2 (кварц, гранит, тешенит); 3 – козух [6]

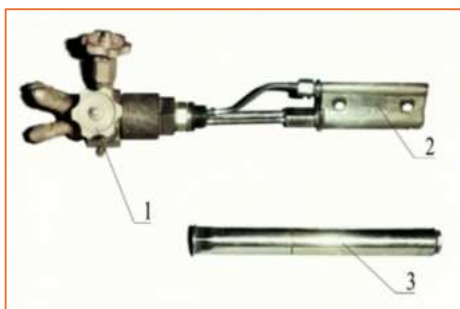


Рис. 2. Установка для автоматизированной линии. Обозначения приведены на рис. 1

Порошком служили частицы минеральной среды (кварцит, гранит, тешенит). Покрываются на металлическую поверхность при температуре до  $2500\text{--}3000\text{ }^{\circ}\text{C}$  и скорости потока до  $2500\text{ м/с}$ .

На рис. 3 представлена автоматизированная производственная поточная линия, включающая четыре детонационные горелки.



Рис. 3. Огневой бокс поточной линии с четырьмя машинными керосино-кислородными термоинструментами, работающие в автоматическом режиме, для напыления изделий природными материалами

Нанесение напыления порошками производилось на крупногабаритных изделиях, таких как валы диаметром  $1\text{ м}$  и длиной  $4,8\text{ м}$ , металлические трубы для теплосетей (наружное покрытие), шары и бегуны.

**2.2. Условия проведения эксперимента.** Для проведения эксперимента с термоинструментом собиралась схема питания горелки (рис. 4): 1 – коллектор; 2 – манометр; 3 – запорный вентиль коллектора; 4 – запорный вентиль отбора кислорода; 5 – рамповый редуктор; 6 – кислородный баллон; 7 – воздушный баллон; 8 – редуктор давления; 9 – трехходовой вентиль; 10 – запор-

ный вентиль, 11 – водяной отстойник; 12 – водяной шланг; 13 – воздушный баллон; 14 – керосиновый баллон; 15 – запорный вентиль; 16 – керосиновый отстойник; 17 – керосиновый шланг; 18 – пробка; 19 – термоинструмент; 20 – кислородный шланг; 21, 25 – запорные вентили и командные редукторы; 22, 26 – обратные клапаны, 23, 27 – фильтры; 24 – шланг обратной связи.

Тепловые потоки  $q$  струи горелки измерялись датчиком из медного цилиндра, которому с торца подводится тепловой поток струи горелки, а с другой – торец цилиндра охлаждается тепловой трубой.

Боковая поверхность цилиндра теплоизолирована керамикой на основе диоксида циркония. В цилиндре размещаются две хромель-алюмелевые термопары. Цилиндр крепился к неподвижной охлаждаемой преграде (покрытию), имеющей площадь, большую пятна торможения струи и охлаждаемой тепловой трубой.

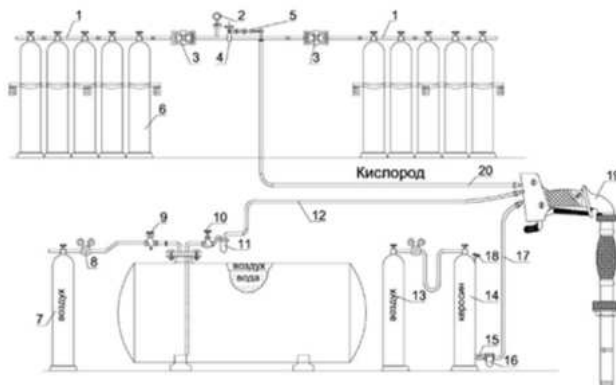


Рис. 4. Вытеснительная схема питания термоинструмента

Для определения удельных тепловых потоков  $q$  на оси струи и в пятне торможения (на покрытии) по радиусу  $r$  измерялся расход  $G$ , давление  $P$  и температуры  $T$  охладителя с целью сведения теплового баланса. Также измерялись расход, давление горючего и охладителя и внутрикамерное давление [24].

**2.3. Образцы природных материалов.** Материалы образцов выполнены из естественных минеральных сред (рис. 5). Изучались напряжения и деформации в образцах, причем в качестве источника энергии использовались три медные спирали. Удельные тепловые потоки составляли  $(0,25\div 4,2)\times 10^6\text{ Вт/м}^2$ . Для исследования покрытий использовался метод голографической интерферометрии, стенд представлен в работе [6].

Природный материал	Вид материала	Диаметр шпюра, м	Глубина сверления, м	Особенности материала
Гранит Образец №1		$6 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-3}$	Кристаллическая порода, образовавшаяся из магмы внутри земной коры. Имеет характерные крупные кристаллы и обладает высокой прочностью и стойкостью к износу.
Гранит Образец №2		$6 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-3}$	
Туф Образец №3		$6 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-3}$	Пористая горная порода, образовавшаяся из осадков, которые содержат мелкие фрагменты горных пород и минералов. Легкий и пористый.
Туф Образец №4		$6 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-3}$	
Мрамор Образец №5		$6 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-3}$	Метаморфическая порода, образовавшаяся из известняка под воздействием высокого давления и температуры. Имеет характерные узоры и текстуры.

Рис. 5. Природные материалы

### 3. Результаты эксперимента по нанесению покрытий напылением

На рис. 6 показана структура струи, истекающей из горелки ракетного типа (термоинструмента). Зарегистрировано явление спиновой детонации сверхзвуковой высокотемпературной многофазной струи. Струя предназначена для нанесения напыления покрытия на металлическую подложку крепчайшими минеральными средами (порошки гранита, кварцита, тешенита, порфирита, туфа, мрамора). Факел оригинальной формы, сильно вздутый.

Коэффициент избытка окислителя  $\alpha < 1$ , окислитель дополнительно подводится на преграду и от 2-х до 6 раз интенсифицирует процесс напыления частиц. Частицы в виде порошка поступают из бункера, эжектируемые струей.

На рис. 7 представлены частицы гранита, полученные при обработке массива термоинструментом:  $G_k = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $G_{\text{кер.}} = 10 \text{ кг/ч}$ ,  $P_k = 1,4 \div 1,5 \text{ МПа}$ ,  $d_k = 4 \times 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\alpha_k = 0,8$ ,  $T_a = 2780 \text{ К}$ ,  $W_a = 2410 \text{ м/с}$ . Для напыления порошка на металлическую подложку (нержавеющая сталь) частицы отбирались по крупности:  $0,1 \times 10^{-3} \text{ м}$  (2,9 %);  $0,25 \times 10^{-3} \text{ м}$  (3,8 %);  $0,5 \times 10^{-3} \text{ м}$  (7,1 %).



Рис. 6. Истечение струи из сопла термоинструмента (см. рис. 3) для напыления: 1 – сильное вздутие факела за счет спиновой детонации сверхзвуковой высокотемпературной струи

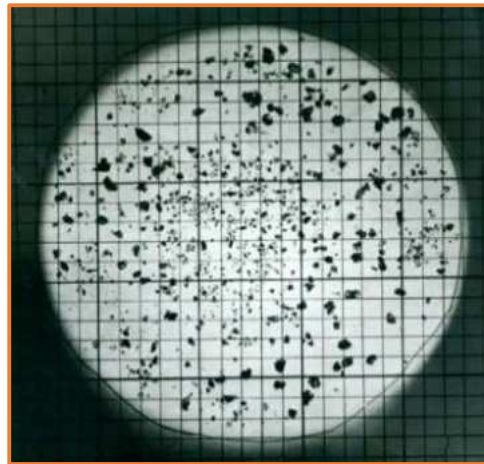


Рис. 7. Гранулометрический состав «шелухи», полученный при обработке Курдайского гранита керосино-кислородной горелкой

### 3.1. Пути управления процессом нанесения напыления покрытия на металлическую подложку

*Способ сжигания топлива.* Дожигание топлива (керосин, бензин) на преграде (покрытии). Коэффициент избытка окислителя  $\alpha < 1$ , сопло горелки – укороченное, процесс сжигания – детонационный. Процесс дожигания может интенсифицироваться до двух-шести раз. Окислитель добавляется струей на покрытие, горючее в струе – с избытком. Максимальные удельные потоки на преграде: от  $(2 \text{ до } 15) \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$  (рис. 8). Режим нанесения без оплавления порошка. Схема дожигания построена с помощью наблюдения за процессом оптическими методами (голография, лазер ЛГ-38 и скоростная киносъемка СКС-1М).

Для давления газа в камере сгорания горелки 0,5 МПа частота колебания давления в камере составляет  $\approx (500 \div 600) \text{ Гц}$ , а на покрытии (преграде) снижается до 200 Гц. Это позволяет иметь наиболее интенсивный процесс напыления покрытия и до минимума снизить возможный процесс его разрушения.

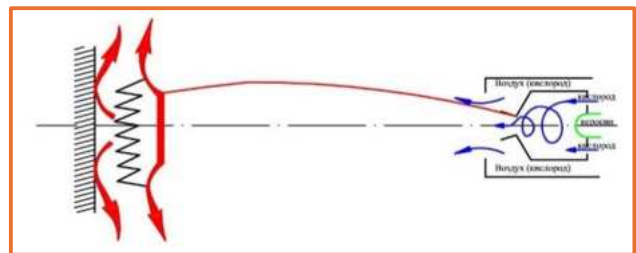


Рис. 8. Детонационное дожигание топлива (керосин) на поверхности покрытия из природного материала (гранита) и подложки из нержавеющей стали

Регулирование длиной струи горелки, истекающей из сопла. Безразмерная длина струи  $\bar{z} = \frac{z}{r_a}$ . За максимальное значение коэффициента теплоотдачи от струи к покрытию для одного из режимов примем  $\alpha_1 = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Тогда имеем:

Таблица 1. Зависимость  $\alpha/\alpha_1$  от  $\bar{z}$

$\alpha/\alpha_1$	0,8	1	0,7	0,4	0,3
$\bar{z}$	0	10÷30	40	50	60

Для  $P_{к.с.} = 1 \text{ МПа}$ ,  $z = (0÷0,16) \text{ м}$ ,  $T = (3000÷850) \text{ }^\circ\text{С}$ ,  $T_{ст.}^* = 3000 \text{ }^\circ\text{С}$  – температура торможения (на покрытии),  $t_{п} = 300 \text{ }^\circ\text{С}$  – температура в конце свободной струи,  $r_a = 3 \times 10^{-3} \text{ м}$  (радиус струи на срезе сопла),  $r_c = 10 \times 10^{-3} \text{ м}$  (радиус струи).

Из табл. 1 следует, что по длине участка «боек» 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  $z$ .

Регулирование углом наклона струи к покрытию.

Таблица 2. Зависимость  $\alpha/\alpha_{90^\circ}$  от  $\beta$

$\alpha/\alpha_{90^\circ}$	1	1,1	1	0,8	0,5	0,35	0,3	0,25
$\beta, \text{ град.}$	90	80 – 75	60	50	30	20	10	0

В табл. 2 принято:  $\alpha_{90^\circ} = 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ;  $T_{ст.}^* = 3000 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $t_{п} = 300 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $P_z = 1 \text{ МПа}$ .

Характеристики термоинструментов и параметры напыляемых порошков минеральных сред. Зависимости тепловых нагрузок для естественной минеральной среды (гранит), представлены на рис. 9.

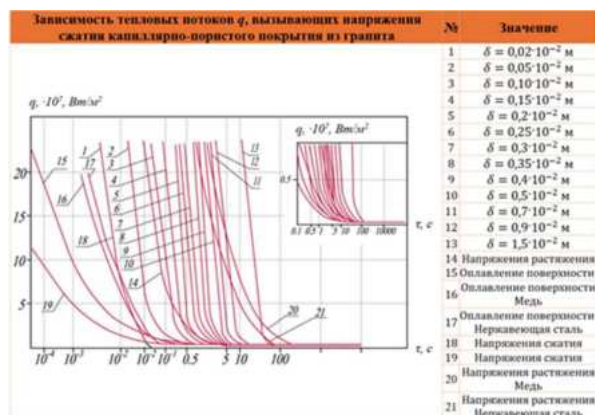


Рис. 9. Предельные области тепловых нагрузок для покрытия из гранита

Для времени полета частиц гранитного порошка  $\tau = 9 \times 10^{-2} \text{ с}$  толщина покрытий находилась в интервале  $\delta = (0,2÷0,5) \times 10^{-3} \text{ м}$ , диаметр порошка  $d = (20÷100) \times 10^{-6} \text{ м}$ . Предельные напряжения растяжения, МПа, соответственно для покрытий из кварца, гранита и тешенита составляли: 4; 21; 8.

**3.2. Регулирование мощностью и видом горелок.** Для керосино-кислородных горелок термоинструмента имеем следующие характеристики: расход кислорода  $G_k$  для давления  $P_k = 1,2÷1,5 \text{ МПа}$ ,  $\text{м}^3/\text{ч} = 15÷18$ ; расход керосина  $G_{кер.}$  для давления  $P_k = 1,3÷1,5 \text{ МПа}$ ,  $\text{кг}/\text{ч} = 10÷12$ ; критический диаметр сопла  $d_k$ ,  $10^{-3} \text{ м} = 4÷5$ ; диаметр камеры сгорания  $d_{к.с.}$ ,  $10^{-3} \text{ м} = 14$ . Газодинамические параметры струй на выходе из сопла сведены в табл. 3.

Таблица 3. Газодинамические параметры струй на выходе из сопла

$\alpha$	$P_k = 1,5 \text{ МПа}$	
	$T_a, \text{ К}$	$W_a, \text{ м/с}$
0,7	2670	2420
0,8	2780	2410
0,9	2830	2400
1	2810	2320

На рис. 10 показана техника и технология работы термоинструмента с  $d_k = (4÷5) \times 10^{-3} \text{ м}$ ,  $d_{к.с.} = 14 \times 10^{-3} \text{ м}$  с гранитной поверхностью воздействия. Видна структура факела, радиус растекания струи (пятно торможения), расстояния от среза сопла (выходной части) горелки до покрытия.



Рис. 10. Положение детонационного сверхзвукового факела

Отвод охлаждающей воды от поверхности воздействия в виде струй производится по технологическим соображениям нанесения защитного покрытия. Защитный экран предназначен для предохранения рабочего-оператора термоинструмента. Удельные тепловые потоки  $q$  на поверхности покрытия составляли  $(5÷12) \text{ МВт}/\text{м}^2$  для  $r = 0$  и  $l = (4÷12) \times 10^{-2} \text{ м}$ ;  $(2÷5) \text{ МВт}/\text{м}^2$  для  $r = 4 \times 10^{-2} \text{ м}$  и  $l = (4÷12) \times 10^{-2} \text{ м}$ .

Распределение  $q(r)$ :

$$q(r) = q_{\max} \times \exp(-1000 \times r^2), \text{ Вт/м}^2.$$

Для более мощной горелки с  $d_{\text{к.}} = 6 \times 10^{-3}$  м,  $d_{\text{к.с.}} = 18 \times 10^{-3}$  м:  $G_{\text{к}}$  для  $P_{\text{к}} = 1,8$  МПа, м<sup>3</sup>/ч – 30÷55;  $G_{\text{кер.}}$  для  $P_{\text{к.}} = (1,8-2)$  МПа, кг/ч – 14÷18, имеем  $q(r=0) = (6\div 13)$  МВт/м<sup>2</sup>.

Величину тепловых потоков  $q$  можно уменьшить на порядок при переходе на другой вид горелок: бензо(керосино)-воздушные. Такие горелки применяются для нанесения напыления покрытий минеральной среды с меньшим значением крепости, чем у кварца или гранита, например тешенита, порфирита или мрамора.

Для создания покрытий из естественных и искусственных минеральных сред (вулканические продукты извержения, золы и шлаки промышленных предприятий в металлургии и на электростанциях, туфы) применялся метод плавления. Использовался более мощный термоинструмент со сдвоенной горелкой с  $d_{\text{к.}} = 5 \times 10^{-3}$  м (рис. 11).



Рис. 11. Мощный термоинструмент со сдвоенной горелкой с  $d_{\text{к.}} = 5 \times 10^{-3}$  м для создания покрытий из вязких и пористых ( $\epsilon = 30\%$ ) природных материалов (продукты извержения вулканов, зола, шлак, туф) методом плавления

Исследованные теплотехнические характеристики покрытий из природного материала относятся к высокоинтенсивным системам охлаждения. Сравнение показывает на преимущества с кипением в объеме [13, 16–21], тонких пленках [15] и в тепловых трубах [10–12].

Пределные области тепловых нагрузок для естественных минеральных сред, не имеющих оплавления поверхности, для тешенитных, гранитных и кварцевых покрытий имеют следующие значения:  $q_{\text{теш.}} = (1,8\div 4) \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>,  $q_{\text{гр.}} = (4\div 6,2) \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и  $q_{\text{кв.}} = (6,2\div 15) \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Диапазон перегрева поверхности покрытия и насыщенного пара находился в пределах (20÷75) К.

#### 4. Результаты по голографическим интерферограммам деформаций в покрытиях

Результаты нами приводятся в работе [24]. В данной работе рассмотрим интерференционные картины пористых покрытий на рис. 12, 13, 14, выполненных из туфа, гранита и мрамора.

Интерферограммы позволили обнаружить на поверхности покрытий трещины, не просматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы. В дополнении с фотоупругостью проводится аналогия с глубинными процессами. Знание закона распределения деформаций в покрытии позволяет уменьшить вероятность возникновения разрушительных трещин. Градиент перемещений величины деформаций для одного теплового источника имеет наибольшее значение в области нагревателя радиусом до  $10 \times 10^{-3}$  м и возрастает с увеличением  $\tau$ .

#### Состояние поверхности через каждые 6 секунд, тепловой поток - 15 Вт ( $q = 2,1 \times 10^6$ Вт/м<sup>2</sup>)

$\tau = 6$ секунд	$\tau = 12$ секунд	$\tau = 18$ секунд	$\tau = 24$ секунд	$\tau = 30$ секунд
$\tau = 36$ секунд	$\tau = 42$ секунд	$\tau = 48$ секунд	$\tau = 54$ секунд	$\tau = 60$ секунд

Рис. 12. Голографические интерферограммы покрытия из туфа



Рис. 13. Голографические интерферограммы покрытия из гранита

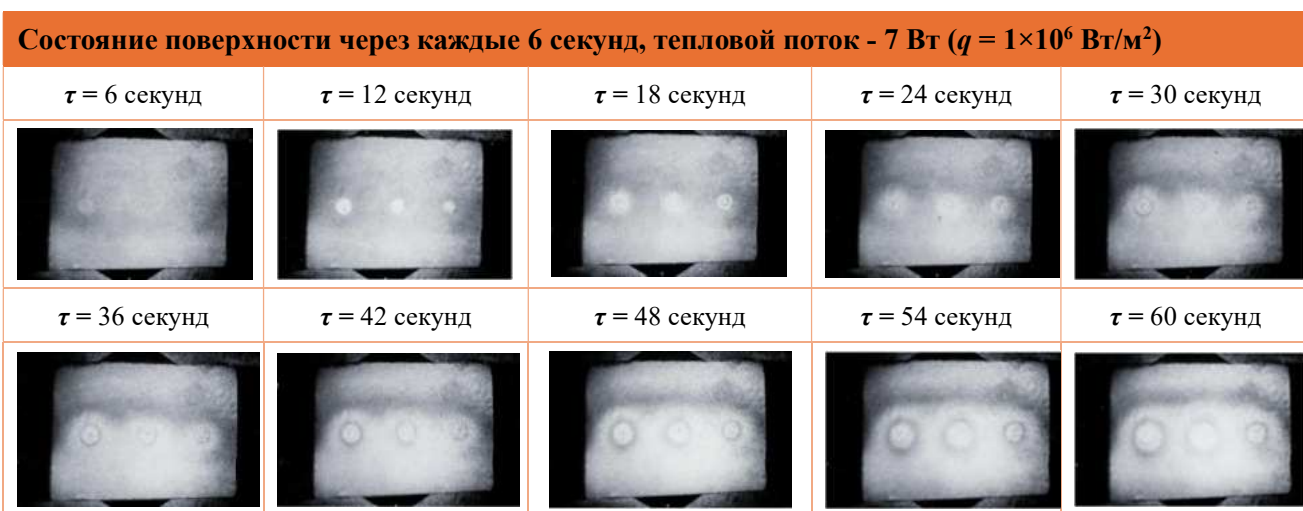


Рис. 14. Голографические интерферограммы покрытия из мрамора

В случае трех одновременно действующих источников тепла (см. рис. 12–14), каждый из них создает независимое поле перемещений, которое с ростом времени нагрева  $t$  приводит к суперпозиции на поверхности покрытия (см. рис. 15–16).

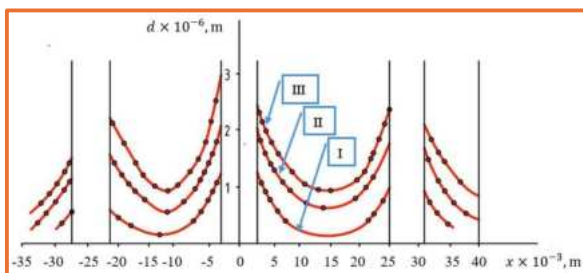


Рис. 15. Зависимость перемещений по плоскости центров трех тепловых источников [ $(y = 0)$ : I –  $t = 15$  с; II –  $t = 25$  с; III –  $t = 30$  с; угол –  $38^{\circ} 55'$ ] поверхности покрытия из туфа для различного  $q$  (см. рис. 12)

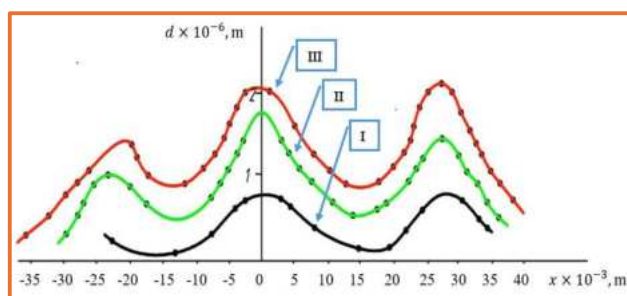


Рис. 16. Зависимость перемещений по плоскости, параллельной плоскости центров тепловых источников [ $(y = 6 \times 10^{-3}$  м), поверхности покрытия из туфа для различного  $q$  (см. рис. 12) (остальные обозначения см. на рис. 15)

Исследование имеет практическое значение для диагностики и прогнозирования энергоустановок и продления их ресурса работы.



**5. Модель взаимодействия осесимметричной сверхзвуковой детонационной струи газов термометра по нормали с поверхностью капиллярно-пористого покрытия**

Рассмотрим взаимодействие сверхзвуковой струи термометра с преградой в зоне торможения (окрестность критической точки). Струя расположена ортогонально (перпендикулярно) к поверхности покрытия.

Запишем для «стандартных условий» уравнение теплопередачи [29] в ламинарном пограничном слое при продольном обтекании пластины

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

где  $Re_x = W_\infty \times \frac{x}{\nu}$ ,  $W_\infty = W_0$ .

Локальная теплопередача при продольном обтекании пластины в турбулентном пограничном слое [30]

$$Nu_x = K_2 \times Re_x^{0,8} \times Pr^{0,43}, \quad (2)$$

где  $T_{ст.} = const$ ;  $10^5 < Re_x < 10^7$ .

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

Теплофизические свойства газа принимаются при средней температуре между  $T_\infty$  и  $T_{ст.}$ ; чаще в моделях за определяющую температуру выбирается температура невозмущенного потока  $T_\infty$ , либо  $T_{ст.}$ ;  $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$  – критерий Прандтля;  $Nu_x$  – число Нуссельта

$$Nu_x = \alpha_x \times \frac{x}{\lambda}.$$

Перепишем число  $Nu_x$  и критерий  $Re_x$  в более удобной форме для анализа.

Критерий Рейнольдса

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

Число Нуссельта:

$$Nu_x = \frac{q(x) \times x}{\lambda_x \times (Ta_{ст.} - T_{ст.})}.$$

Рассчитаем температуру  $Ta_{ст.}$

$$Ta_{ст.} = Tr_\infty, \text{ К}, \quad (3)$$

где  $Tr_\infty$  – температура восстановления, равная:

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

$T_\infty$  – термодинамическая температура невозмущенного потока (это такая температура, кото-

рую показал бы термометр, перемещающийся вместе с потоком с одинаковой с ним скоростью). Для  $Pr = 1$

$$T_{0\infty} = T_\infty + r \times \frac{W_\infty^2}{2Cp_\infty}, \text{ К}, \quad (5)$$

$Ta_{ст.}$  – температура самого покрытия или адиабатная температура стенки. При  $Pr < 1$ ,  $Ta_{ст.} < T_{0\infty}$ .

Коэффициент восстановления

$$r = \frac{Ta_{ст.} - T_\infty}{T_{0\infty} - T_\infty}. \quad (6)$$

Для ламинарных слоев

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

Термодинамическая температура  $T_\infty$  равна

$$T_\infty = \frac{\alpha_\infty^2}{K \times R}, \text{ К}. \quad (8)$$

Температура торможения:

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

Температура восстановления равна:

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

где  $K = \frac{Cp}{Cv}$ .

**5.1. Расчет удельных тепловых потоков  $q_{ст.}$**

Тепловой поток омываемого высокоскоростным потоком газа, определяется как

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

Если  $Pr \neq 1$ , то

$$Ta_{ст.} = Tr_\infty, \quad (12)$$

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

Если  $Pr = 1$ , то

$$Ta_{ст.} = T_{0\infty}, \quad (13)$$

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

Для детонационного сверхзвукового факела эксперименты нами проводились с применением микронасадки для измерения полного и статического давлений и датчика теплового потока для измерения  $q(x)$ ,  $\alpha_x$ ,  $M_x$  и  $\rho_0 W_0$  в растекающейся струе.

Числа Маха  $M = \frac{W_a}{a} = 2,3$ .

Степень нерасчетности истечения (см. рис. 17)

$$n_a = \frac{P_e}{P_b} = 0,8.$$




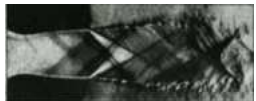
Отношение давлений	Структура сверхзвуковой струи
$\frac{P_e}{P_b} = 0,4$	
$\frac{P_e}{P_b} = 0,6$	
$\frac{P_e}{P_b} = 0,8$	
$\frac{P_e}{P_b} = 1,5$	

Рис. 17. Процесс истечения сверхзвуковой струи из сопла термоминструмента при различных давлениях

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

$$Re_a = \frac{W_a \times d_a}{\nu_a},$$

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

В окрестностях критической точки (на покрытии) предполагается ламинарный режим течения, так как число  $Re_x$  не высокое и действует отрицательный градиент давления. Однако число  $Nu_x$  согласно эксперименту в (5÷6) раз выше, чем дает ламинарная теория (формула (1)). Возможно, проявляется детонационный эффект проникновения в ламинарный пограничный слой турбулентных пульсаций из внешнего течения. При  $Re_x \geq 4 \times 10^5$  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  $Re_x < 4 \times 10^5$ ,  $K'_1 = (5 \div 6) \times K_1$  и для  $10^6 \geq Re_x \geq 4 \times 10^5$ ,  $K'_2 = 0,95 \times K_2$ .

## 6. Выводы

В данной работе на основе проделанных работ [6, 8, 24] акцент был сделан на природные материалы и их применение для нанесения покрытий на элементы энергооборудования. Основные выводы по проделанной работе следующие:

1. Показано на интерферограммах, что зависимости перемещений для пористых покрытий

при тепловых нагрузках полезны для прогнозирования оборудования (сопла и камеры сгорания).

2. Система охлаждения содержит покрытие из природного материала, созданное высокотемпературными струями, которые препятствуют разрушению оборудования, и подбирается в зависимости от вида материала покрытия и поверхности подложки.

3. Интерферограммы показывают концентрацию деформаций в покрытии при тепловых нагрузках в эксперименте до  $2,1 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

4. Капиллярно-пористая система охлаждения показала высокую эффективность вплоть до критического состояния металла камер сгорания и сопел ( $1 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>).

5. Построена модель взаимодействия осесимметричной сверхзвуковой детонационной струи газов термоминструмента по нормали к покрытию.

6. Коэффициенты теплоотдачи согласно эксперименту в (5...6) раз выше, чем дает ламинарная теория и на несколько процентов ниже, чем для закона турбулентного теплообмена.

7. Определена степень нерасчетности истечения для различных давлений.

8. Разработанные поверхности в виде покрытий и сетчатых структур дают положительный эффект за счет преимущества совместных технологий их изготовления, расширением отводимых тепловых нагрузок и управления состоянием покрытий.

## Список источников

1. Поляев В.М., Кичатов Б.В. Кипение жидкости на поверхностях с пористыми покрытиями // Инженерно-физический журнал. 2000. Т. 73. №2. С. 260–266.
2. Wang W., et al. Cooling performance analysis of steam cooled gas turbine nozzle guide vane // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013;62:668–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.080>
3. Shoukat A.K., et al. Design, fabrication and nucleate pool-boiling heat transfer performance of hybrid micro-nano scale 2-D modulated porous surfaces // Applied Thermal Engineering. 2019; 153:168–180. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.133>
4. Wang W. Efficiency study of a gas turbine guide vane with a newly designed combined cooling structure // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015; 80:217–226. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.024>
5. Yang X., et al. Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019;140:25–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109>

6. Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Пиралишвили Ш.А. Кризис теплообмена и предельный перенос энергии в капиллярно-пористых покрытиях энергоустановок // Прикладная физика и математика. 2019. № 5. С. 3–15. doi: 10.25791/pfim.05.2019.921
7. Lei G., et al. The convective heat transfer of fractal porous media under stress condition // International Journal of Thermal Sciences. 2019;137:55–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.017>
8. Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы // Известия высших учебных заведений. Энергетика. 1991. № 12. С. 97–101.
9. Mori S., et al. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media // International Journal of Multiphase Flow. 2009;35:946–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003>
10. Mieczyslaw E., et al. Peculiarities of boiling heat transfer on capillary-porous coverings // International Journal of Thermal Sciences. 2004;43(5):431–442. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2003.10.002>
11. Odagiri K., et al. Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe // International Journal of Thermal Sciences. 2019;140:530–538. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.008>
12. Xianbing J., et al. Pool boiling heat transfer on uniform and non-uniform porous coating surfaces // Experimental Thermal and Fluid Science. 2013;48:198–212. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.03.002>
13. Chang Y.H., et al. Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works // Applied Thermal Engineering. 2019;154:284–293. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.092>
14. Chuang T.J., et al. 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. 2019;163:114358. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114358>
15. Jamialahmadi M., et al. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008;51(9–10):2482–2493. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052>
16. Mohammad S.A., et al. Enhanced boiling of saturated water on copper coated heating tubes // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2008; 47(1):159–167. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.07.021>
17. Li C., et al. Evaporation/Boiling in Thin Capillary Wicks (I) – Wick Thickness Effects // Journal of Heat Transfer. 2006; 128(12):1312–1319. <https://doi.org/10.1115/1.2349507>
18. Hanlon M.A., et al. Evaporation Heat Transfer in Sintered Porous Media // Journal of Heat Transfer. 2003; 125(4): 644–652. <https://doi.org/10.1115/1.1560145>
19. Li C., et al. Evaporation Boiling in Thin Capillary Wicks (II) – Effects of Volumetric Porosity and Mesh Size // Journal of Heat Transfer. 2006;128(12):1320–1328. <https://doi.org/10.1115/1.2349508>
20. Das A.K., et al. Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling // Applied Thermal Engineering. 2009;29(17–18):3643–3653. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.06.020>
21. Mehmet A., et al. Enhancement of pool boiling critical heat flux in dielectric liquids by microporous coatings // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007; 50(5–6):997–1009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.005>
22. Mohammad S.S., et al. Subcooled flow boiling CHF enhancement with porous surface coatings // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007;50(17–18): 3649–3657. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.011>
23. Forrest E., et al. Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010;53(1–3):58–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.008>
24. Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю., Шелгинский А.Я. Исследование наноразмерных и микромасштабных структурированных поверхностей охлаждения теплоэнергоустановок // Надежность и безопасность энергетики. 2022. Т. 15. № 1. С. 38–44. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2022-15-1-38-44>
25. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
26. Балдаева Л.Х. (ред.). Газотермическое напыление. М.: Изд-во Маркет ДС, 2007. 344 с.
27. Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов. К.: Наукова думка, 1987. 545 с.
28. Хасун А., Моригаки О., Степин В.С., (ред.), Шестеркин Н.Г., (ред.). Наплавка и напыление, М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
29. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоиздат, 1985. 320 с.
30. Авдеевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А., Кошкин В.К. (ред.). Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике. М.: Машиностроение, 1975. 624 с.

### References

1. Polyaev VM, Kichatov BV. Boiling of a liquid on surfaces with porous coatings // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2000;73:253–258. <https://doi.org/10.1007/BF02681726>
2. Wang W., et al. Cooling performance analysis of steam cooled gas turbine nozzle guide vane // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2013;62:668–679. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.080>
3. Shoukat A.K., et al. Design, fabrication and nucleate pool-boiling heat transfer performance of hybrid micro-nano scale 2-D modulated porous surfaces // *Applied Thermal Engineering*. 2019; 153:168–180. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.133>

4. Wang W. Efficiency study of a gas turbine guide vane with a newly designed combined cooling structure // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015; 80:217–226. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.024>
5. Yang X., et al. Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019;140:25–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109>
6. Genbach AA, Bondartsev DYu, Piralishvili ShA. Heat exchange crisis and limiting energy transfer in capillary-porous coatings of power units // *Applied Physics and Mathematics*. 2019;5:3–15. (In Russ.). doi: 10.25791/pfim.05.2019.921
7. Lei G., et al. The convective heat transfer of fractal porous media under stress condition // *International Journal of Thermal Sciences*. 2019;137:55–63. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.017>
8. Polyayev VM, Genbach AA. Areas of application of porous system // *Izvestia of higher educational institutions. Energetics*. 1991;12:97–101. (In Russ.).
9. Mori S., et al. Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media // *International Journal of Multiphase Flow*. 2009;35:946–951. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.05.003>
10. Mieczyslaw E., et al. Peculiarities of boiling heat transfer on capillary-porous coverings // *International Journal of Thermal Sciences*. 2004;43(5):431–442. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2003.10.002>
11. Odagiri K., et al. Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe // *International Journal of Thermal Sciences*. 2019;140:530–538. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.008>
12. Xianbing J., et al. Pool boiling heat transfer on uniform and non-uniform porous coating surfaces // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2013;48:198–212. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.03.002>
13. Chang Y.H., et al. Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works // *Applied Thermal Engineering*. 2019;154:284–293. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.092>
14. Chuang T.J., et al. 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*. 2019;163:114358. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114358>
15. Jamialahmadi M., et al. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008;51(9–10):2482–2493. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052>
16. Mohammad S.A., et al. Enhanced boiling of saturated water on copper coated heating tubes // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2008; 47(1):159–167. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.07.021>
17. Li C., et al. Evaporation/Boiling in Thin Capillary Wicks (I) – Wick Thickness Effects // *Journal of Heat Transfer*. 2006;128(12):1312–1319. <https://doi.org/10.1115/1.2349507>
18. Hanlon M.A., et al. Evaporation Heat Transfer in Sintered Porous Media // *Journal of Heat Transfer*. 2003; 125(4): 644–652. <https://doi.org/10.1115/1.1560145>
19. Li C., et al. Evaporation Boiling in Thin Capillary Wicks (II) -Effects of Volumetric Porosity and Mesh Size // *Journal of Heat Transfer*. 2006;128(12):1320–1328. <https://doi.org/10.1115/1.2349508>
20. Das A.K., et al. Performance of different structured surfaces in nucleate pool boiling // *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(17–18):3643–3653. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.06.020>
21. Mehmet A., et al. Enhancement of pool boiling critical heat flux in dielectric liquids by microporous coatings // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(5–6):997–1009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.005>
22. Mohammad S.S., et al. Subcooled flow boiling CHF enhancement with porous surface coatings // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(17–18): 3649–3657. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.011>
23. Forrest E., et al. Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53(1–3):58–67. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.10.008>
24. Genbach AA, Bondartsev DYu, Shelginsky AY. Investigation of nanoscale and microscale structured cooling surfaces of thermal power plants // *Safety and Reliability of Power Industry*. 2022;15(1):38–44. (in Russ.). <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2022-15-1-38-44>
25. Kudinov V.V., Bobrov G.V. *Spray coating. Theory, technology and equipment*. Moscow: Metallurgy, 1992. 432 p. (in Russ.).
26. Baldaeva L.H. (ed.). *Gas-thermal spraying*. Moscow: Market DS, 2007. 344 p. (in Russ.).
27. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N. *Gas-thermal coatings from powder materials*. Kiev: Naukova Dumka, 1987. 545 p. (in Russ.).
28. Hasun A, Morigaki O, Stepin VS, (ed.), Shesterkin NG, (ed.). *Cladding and spraying*. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 240 p. (in Russ.).
29. Kutateladze S.S., Leontiev A.I. *Heat and mass transfer and friction in turbulent boundary layer*. Moscow: Energoizdat, 1985. 320 p. (in Russ.).
30. Avduyevsky VS, Galitseisky BM, Glebov GA, Koshkin VK (ed.). *Fundamentals of Heat Transfer in Aviation and Rocket Equipment*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 624 p. (in Russ.).