

потенциал квантовых технологий в современных спутниковых сетях, открывая путь к следующему поколению безопасной и эффективной связи. Хотя проблемы, такие как атмосферные возмущения и технические сложности, сохраняются, дальнейшее развитие квантовых технологий и стратегий оптимизации в реальном времени дает надежду на их преодоление. Будущие исследования должны быть сосредоточены на совершенствовании квантовых протоколов и решении проблем внедрения, чтобы в полной мере реализовать преимущества квантовой запутанности в системах спутниковой связи.

Ключевые слова: коммуникационные сигналы, атмосферные помехи, квантовая связь, модели прогнозирования, деградация сигнала, исправление ошибок.

Information about the authors

Kalamkas Astemessova – PhD, Associate Professor, Head of the Department of General Physics, Kazakh National Research Technical University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: naucha@mail.ru, k.astemessova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-6084>.

Malika Rymgaliyeva* – schoolgirl, International School of Astana, Astana, Kazakhstan; e-mail: rymgalievamalika67@gmail.com.

Авторлар туралы мәліметтер

Каламкас Сериковна Астемесова – PhD, қауымдастырылған профессор, физика кафедрасының меңгерушісі, К.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан; e-mail: naucha@mail.ru, k.astemessova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-6084>.

Малика Думанқызы Рымғалиева* – білім алушысы, Астана қаласының Халықаралық мектеп, Астана, Қазақстан; e-mail: rymgalievamalika67@gmail.com.

Сведения об авторах

Каламкас Сериковна Астемесова – PhD, ассоциированный профессор, заведующий кафедры общей физики, Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан; e-mail: naucha@mail.ru, k.astemessova@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-6084>.

Малика Думанқызы Рымғалиева* – обучающаяся, Международная школа г. Астана, Астана, Казахстан; e-mail: rymgalievamalika67@gmail.com.

Received 26.03.2025

Revised 29.04.2025

Accepted 30.04.2025

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2\(18\)-48](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-48)

MPHTI: 44.31.31.



А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев*

Алматинский Университет Энергетики и Связи им. Г. Даукеева,
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Байтурсынова 126/1

*e-mail: d.bondartsev@au.es.kz

ПРИРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ КАК НОВЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Аннотация: Разработано оборудование полигона для исследования теплообмена в природных покрытиях. Создана поточная линия для нанесения покрытий. В качестве природных материалов выбраны кварциты, граниты и тешениты. Создан термоинструмент с детонационной струей и разработана технология получения порошков дроблением в замкнутом объеме. Горелка имеет автоматическое устройство для управления режимом работы. Порошки готовились в формах из эллиптических поверхностей с различным эксцентриситетом. Технология увеличивает выход порошка класса $(0\div 2)\times 10^{-3}$ м и повышает степень упрочнения порошка. Автоматическое устройство устанавливает оптимальное расстояние до покрытия, формирует оптимальное пятно растекания струи. Технология предусматривает выброс воды на покрытие. Поперечная скорость участка воспламенения спинового детонационного факела определяется из наклона к образующей спирального следа. Имеет место стабилизация горения за счет торможения на покрытии. Исследования с помощью голографической интерферометрии показало, что оно полезно для прогнозирования разрушения покрытия. Покрытия с тремя тепловыми источниками представляет собой экран, поглощающий волны факела термоинструмента. Покрытие

обеспечивает эрозионную стойкость. Спиновой детонационный факел за счет частичного расплавления частиц покрытия значительно снижает разрушение частиц по границам раздела покрытия.

Ключевые слова: теплообмен, природные материалы, покрытия, термоинструмент, напыление.

Введение

Весьма актуально проводить научные исследования теплообмена в капиллярно-пористых природных материалах. В качестве таких материалов выбираются горные породы, к примеру туфы [1], мраморы [2], кварциты [3], граниты [4], тешениты [5], бентониты [6]. Из них изготавливаются порошки и наносятся напылением на подложку.

Актуальным является изучение прогресса в механизмах реализации охлаждения поверхностей распылением (струйным способом) [7]. Рассмотрены способы улучшения характеристик путем чередования видов применяемой жидкости, изменением схемы потока, параметров воздуха и воды, расстояния между соплом и поверхностью, применение струйно-инжекционного метода. Однако требуется исследовать воздействие струйного охлаждения на теплообмен в капиллярно-пористых покрытиях [8] и капиллярно-пористых структурах [5], особенно его влияние на природные материалы. Авторами [9] рассмотрен теплообмен в пористых покрытиях, в которых действуют термонапряжения. Разработаны условия действия термических напряжений σ для предельного состояния поверхности. Предложенная модель учитывает термомеханические свойства покрытия. Установлена сложная зависимость теплообмена и напряжений для разных диаметров покрытия. Однако авторами [9] не описано влияние теплообмена и напряжений в покрытиях, не создана методика расчета.

В работах [10] даны исследования теплообмена в различных изотропных и анизотропных покрытиях, конструкций специальных покрытий с целью увеличения их критических потоков. Но не рассмотрены интегрированные системы охлаждения, включающие порошковые нанесения напыления и капиллярно-пористые структуры с кипением охладителя. В энергетических технологиях перспективны двумерные наноматериалы [11] как интенсификаторы теплообмена (2-D материалы). Они могут создаваться в виде пленок, композитов, наножидкостей, материалов на основе графена. Интересны теплопередающие способности при процессах испарения, кипения и конденсации, особенно для тепловых труб.

Однако авторы [11] указывают на определенные трудности при выборе двумерных материалов, требуется дополнительные исследования для их активного применения нами исследуемых капиллярно-пористых покрытий и капиллярно-пористых структур.

В данной работе предлагается создать технологию изготовления и нанесения напылением порошков природных материалов (факелы, дробление материалов) и изучить механизм разрушения. Необходимо провести исследования напыления порошка тешенита, гранита с целью образования природного покрытия термоинструментом и эксплуатации покрытия для различных удельных тепловых нагрузках q , включая предельные $q_{\text{пред}}$, и степени перегрева покрытия ΔT , $\Delta T_{\text{кр}}$.

Материалы и методы

Для газотурбинных установок (ГТУ) эффективно применять детонационное сжигание топлива. Здесь возникает необходимость создания надежного метода детонационного сжигания форсированных режимов работы камеры сгорания с эффективной системой охлаждения. На рисунке 1 представлено оборудование полигона для нанесения покрытий термическим способом: 1 – кислородная рампа с редуктором; 2 – батарея кислородных баллонов; 3 – баллон с углекислым газом; 4 – баллон со сжатым воздухом (азотом); 5 – емкость для воды; 6 – пульт управления; 7 – баллон с керосином; 8 – баллон со сжатым воздухом (азотом); 9 – термоинструмент; 10 – автоматическое пусковое устройство, вынесенное из термоинструмента; 11 – аккумулятор, 12 – магистраль с кислородом; 13 – магистраль с керосином; 14 – магистраль с углекислым газом; магистраль с водой.

Термоинструмент для напыления нанесением порошка покрытия представлен на рисунке 2, позволяет производить напыление пульсирующей двухфазной детонационной высокотемпературной струей.

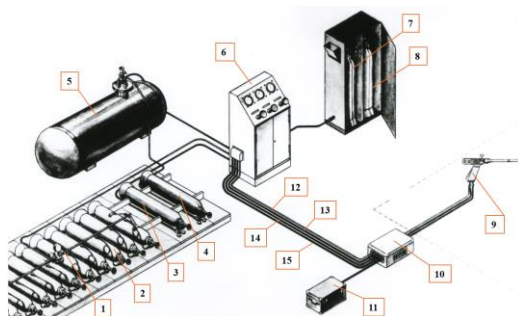


Рисунок 1 – Оборудование полигона для нанесения напыления покрытий термическим способом, с помощью вытеснительной схемы [8] питания термоинструмента

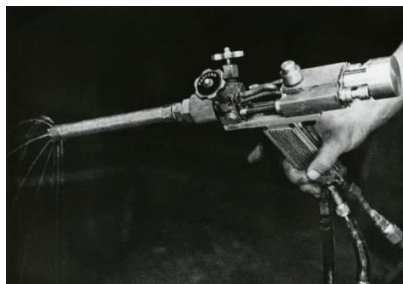


Рисунок 2 – Термоинструмент с встроенным автоматическим устройством

Термоинструмент для нанесения напыления покрытий представляет из себя горелку ракетного типа, за счет автоматического устройства имеется возможность управлять режимами создания покрытий, изменяя мощность горелки и длину факела L . Контролируется качество покрытия и экономится расход горючего и окислителя. Вязкие и высокопористые материалы (например туф [8]) напылялись с оплавлением покрытия. Схема горелки (термоинструмента) представлена в работе [5].

На рисунке 3 представлена производственная линия с четырьмя огнеструйными горелками ракетного типа (термоинструментами), которые предназначены для нанесения покрытий с использованием природных материалов.



Рисунок 3 – Производственная линия для нанесения покрытий.
В масштабе вынесена огнеструйная горелка ракетного типа

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. Порошки из природного материала (кварциты, граниты, тешениты, мраморы, туфы) приготавливались после обработки массива горелкой ракетного типа [8].

Другой способ получения порошков заключался в приготовлении специальных форм из необходимого материала и их взрывания, что позволяло применять упрочняющие технологии для создания покрытий. С этой целью производились исследования моделей из песчано-цементной смеси. Порошком служили частицы минеральной среды (кварцит, гранит, тешенит).

Для проведения экспериментов по влиянию эксцентриситет эллиптических цилиндров на качество дробления выбирались две модели представленные на рисунке 4: модель №1: $\varepsilon = 0.74$; модель №2: $\varepsilon = 0.47$.

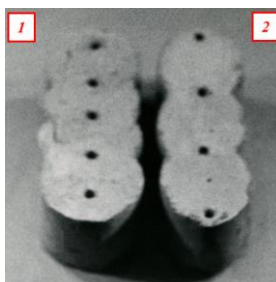


Рисунок 4 – Общий вид моделей:

1 – модель с эксцентриситетом 0.74; 2 – модель с эксцентриситетом 0.47

Распределения по фракциям массы моделей № 1 и № 2 представлено на рисунке 5. Результаты ситового анализа гранулометрического состава показали, что для модели №1 выход класса $(0\div 2)\times 10^{-3}$ м дает 27.2%, а для модели №2 – 18.2%. Данная технология позволяет увеличивать степень упрочнения порошка.

Эксцентриситет эллипса: $\varepsilon = \frac{c}{a}$, где $2c$ – расстояние между фокусами; $2a$ – длина большой оси. Высота эллиптических цилиндров $h = 95\times 10^{-3}$ м. Для напыления порошка частицы отбирались по крупности: 0.1×10^{-3} м – 3.1%; 0.25×10^{-3} м – 4.2%; 0.5×10^{-3} м – 7.3%.

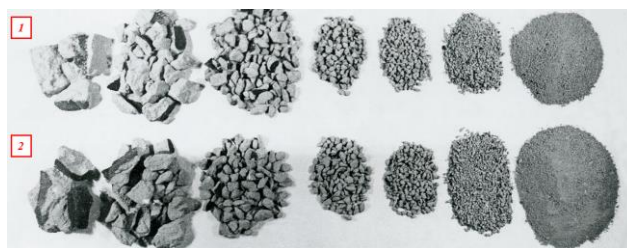


Рисунок 5 – Общий вид распределения по фракциям массы моделей №1 и №2

Упрочняющая технология производства порошков получается за счет разрушения энергии взрыва в фокусе эллиптического цилиндра на энергию сжатых газов и энергию волны. Происходит синергический эффект суммирования этих энергий в каждом из фокусов цилиндра. Термические напряжения сжатия частиц порошка возрастали до двух раз [8].

Результаты

Использованы детонационные высокотемпературные пульсирующие двухфазные факелы керосино-кислородного термоинструмента, позволяющие дожигать горючее на поверхности покрытия с $\alpha = 0.6\div 0.8$. Это позволяет существенно увеличить удельные тепловые потоки q при небольшом перегреве ΔT покрытия, которые могут быть до шести раз выше по сравнению с обычным процессом сжигания. Максимальные q на покрытии достигали величины $(2\div 15)\times 10^6$ Вт/м². На рисунке 6 показано, ствол горелки 1 при взаимодействии детонационного факела 3 с поверхностью 4. Автоматическая система управления устанавливает оптимальное расстояние струи от среза сопла до покрытия. Формируется оптимальное пятно растекания струи с установкой угла оси горелки к покрытию. Выброс струй воды 2 имеет технологическое значение для формирования покрытия.

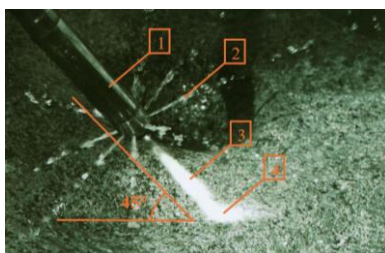


Рисунок 6 – Взаимодействие детонационного факела 3 с гранитной поверхностью 4

Поперечная скорость участка воспламенения спиновой детонационного факела (рис. 6) определяется из наклона к образующей спирального следа. Поскольку угол наклона близок к 45 градусам, то поперечная скорость вдвое превышает скорость звука в газовой струе. Процесс дожигания горючего (керосина) протекает устойчиво на покрытии, непрерывно и наблюдается за ударной волной, а периодичность воспламенения связана с отрывом горения газа от фронта ударной волны.

В целом, стабилизация горения пульсирующих волн имеет место за счет торможения газа на капиллярно-пористом покрытии в виде сверхзвукового потока смеси, аналогично процессам в ударных трубах. На рисунке 7 представлена структура затопленной струи вдоль абсциссы z , истекающей из сопла с критическим диаметром 4×10^{-3} м. Зарегистрировано явление спиновой детонации в конце факела струи. На рисунке приняты обозначения: 1 – ствол горелки; 2 – выброс струй воды; 3 – диаметр струи на срезе сопла, $d_a = 2r_a$, м; 4 – критический диаметр сопла; 5 – спиновая детонация. Струя истекала с высоким уровнем шума и резкими звуковыми колебаниями. Охлаждающаяся вода струйками отводится из калибратора термоинструмента с целью обеспечения технологии напыления. Из исследованных горных пород гранит имеет низкое значение $\lambda = (2.2 \div 4.1) \text{ Вт/(м} \times \text{К)}$, а значение $\alpha = (0.6 \div 0.9) \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

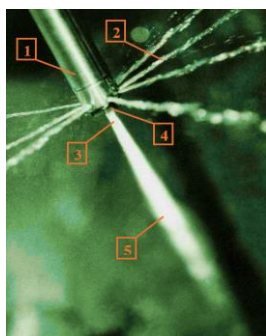


Рисунок 7 – Вариант спиновой детонации струи в конце факела термоинструмента 5.

Если будут иметь иные случаи, то можно воспользоваться быстрым охлаждением покрытия, которое быстро будут затвердевать с получением реакционно-отверждаемых покрытий (рис. 8).

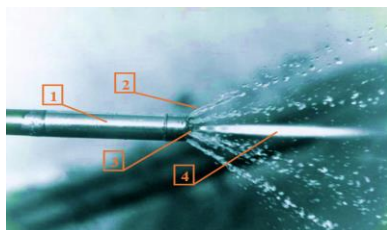


Рисунок 8 – Детонационный факел термоинструмента 4

На рисунке 8 представлен детонационный факел термоинструмента: 1 – ствол горелки; 2 – выброс струй воды; 3 – диаметр критического сечения сопла, d_k , м; 4 – детонационный факел. Смесь керосин-кислород. Система охлаждения – комбинированная.

Обсуждение

Ранее в работе [5] был выполнен эксперимент с применением голографии и скоростной киносъемки, в работе [8] были представлены голографический стенд, схема стенда для получения голографических интерферограмм и схема съемочного стенда СКС-1М. В результате проведенного эксперимента были получены интерферограммы которые позволили обнаружить на поверхности покрытиях трещины, не просматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы. Оценка действия напряжений покрытий уменьшает вероятность возникновения трещин при создании устройств и позволяет управлять развитием опасных трещин. Покрытие с тремя тепловыми источниками представляет собой экран, который поглощает ударные и детонационные волны факела термоинструмента. Для предельного состояния природных покрытий из минеральных сред (рис. 9, 10) при определенных размерах δ частиц и времени

поддачи удельного теплового потока решающую роль в разрушении покрытия имеют напряжения сжатия. Более того, различные методы термического напыления (атмосферно-плазменный процесс; высокоскоростной кислородо-топливный, высокоскоростной воздушно-топливный) дают различную микроструктуру и отношение напряжения сжатия, растяжения и сдвига к деформации. Это связано с прочностью сцепления между частицами минеральной среды, т.к. полностью или частично расплавление частицы порошка металлов ударяются и затвердевают на подложке, а степень сцепления между частицами металлов может составлять всего 20÷80 % площади поверхности границ частицы. Создаваемое термическим способом капиллярно-пористое покрытие будет всегда анизотропно, что имеет преимущества в процессе охлаждения. Для термического напыления металлов и сплавов стремятся к максимальному расплавлению частицы, что положительно влияет на коррозионную способность капиллярно-пористого покрытия. Для частиц минеральной среды проблема кавитационного эрозионного износа капиллярно-пористых покрытий не является основной.

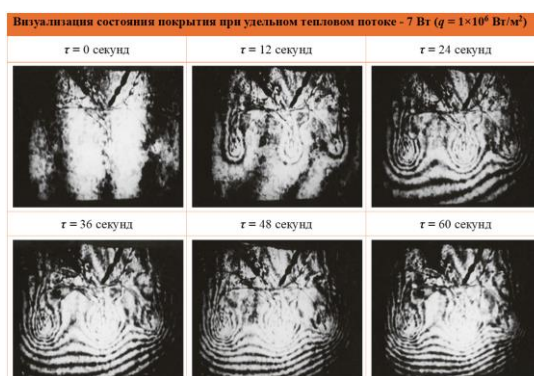


Рисунок 9 – Фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из тешенита

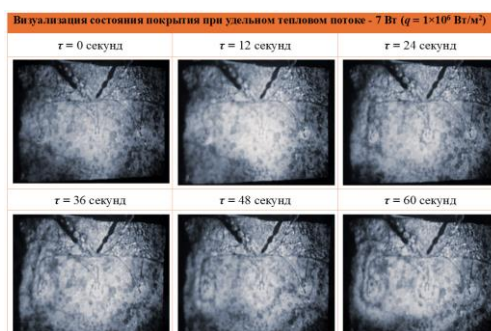


Рисунок 10 – Фотоснимки голографических интерферограмм покрытия из гранита

Предельная область работы тепловых нагрузок для поддерживаемого перегрева покрытия $\Delta T = T_{ст} - T_n = (20 \div 75) \text{ K}$, дает следующие величины: для тешенитных покрытий – $(2.2 \div 4) \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$; для гранитных покрытий – $(4 \div 6.2) \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$; для кварцевых [8] покрытий – $(6.2 \div 15) \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$.

Полученные области q значительно превосходят такие высокофорсированные системы, как кипение в тонких пленках [12] и в большом объёме [13], кипение в сетчатых фитилях тепловых труб [14, 15].

Заключение

Создан термоинструмент, имеющий спиновую структуру детонационного факела, дожигаемого на поверхности природного покрытия. Применен способ образования порошков с помощью управления энергией волны и газов в фокусах эллиптических цилиндров, что позволило провести упрочнение природного материала и повысить выход мелких фракций в диапазоне гранулометрического состава $(0 \div 2) \times 10^{-3} \text{ м}$. Выделена точка отчета в виде остаточной деформации в материале, обнаружена сеть мелких трещин, которые не исчезали при снятии тепловой нагрузки и наблюдались на поверхности. Это позволяет иметь прогноз поведения материалов в случае диссипации энергии у вершины большой трещины и предсказывать состояние прочности. Нелинейность подчеркивает, что к упругому поведению материала добавляется его пластичность, а этот факт мог быть зафиксирован только оптическими методами исследования.

Список литературы

1. Ting Z. Insights into natural tuff as a building material: Effects of natural joints on fracture fractal characteristics and energy evolution of rocks under impact load / Z. Ting // Engineering Failure Analysis. – 2024. – Vol. 163. – P. 108584. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108584>.
2. Yan Z. Investigation on mechanical behaviors and energy characteristics of deep-buried marble in a hydraulic tunnel in Southwest China / Z. Yan // Transportation Geotechnics. – 2024. – Vol. 47. – P. 101270. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101270>.
3. Wei C. An Investigation into the Compressive Strength, Permeability and Microstructure of Quartzite-Rock-Sand Mortar / C. Wei // Fluid Dynamics and Materials Processing. – 2024. – Vol. 20, № 4. – P. 859-872. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2023.029310>.
4. Ramadji C. Influence of Granite Powder on Physico-Mechanical and Durability Properties of Mortar / C. Ramadji // Materials. – 2020. – Vol. 13. – P. 5406. <https://doi.org/10.3390/ma13235406>.
5. Boiling crisis in porous structures / A.A. Genbach et al // Energy. – 2022. – Vol. 259. – P. 125076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>.
6. Askalany, A.A. High potential of employing bentonite in adsorption cooling systems driven by low-grade heat source temperatures / A.A. Askalany // Energy. – 2017. – Vol. 141. – P. 782e91. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.171>.
7. Jena M. Spray Impingement Cooling of Metal Surfaces: a Review on Progressing Mechanisms / M. Jena // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70. – P. 573-594. <https://doi.org/10.1134/S0040601523080050>.
8. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces / A.A. Genbach et al // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2025. – Vol. 20. – P. 46. <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5>.
9. Nian X. Effects of chloride ion concentration on porous surfaces and boiling heat transfer performance of porous surfaces / X. Nian // Energy. – 2024. – Vol. 294. – P. 130818. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130818>.
10. Junsheng H. Coupling zinc oxide nanopatterns with low-power acoustics for synergistic two-phase cooling enhancement / H. Junsheng // Chemical Engineering Journal. – 2025. – Vol. 508. – P. 161081. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161081>.
11. Dmitriev A.S. Prospects for the Use of Two-Dimensional Nanomaterials in Energy Technologies (Review) / A.S. Dmitriev, A.V. Klimenko // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70. – P. 551-572. <https://doi.org/10.1134/S0040601523080013>.
12. Jamialahmadi M. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures / M. Jamialahmadi // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51, № 9. – P. 2482-2493. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052>.
13. Xinghui W. An experimental study on the fractal characteristics of the effective pore structure in granite by thermal treatment / W. Xinghui // Case Studies in Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 45. – P. 102921. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102921>.
14. Kimihide O. Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe / O. Kimihide, N. Hosei // International Journal of Thermal Sciences. – 2019. – Vol. 140. – P. 530-538. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.008>.
15. Min Y. Analytical study of impact of the wick's fractal parameters on the heat transfer capacity of a novel micro-channel loop heat pipe / Y. Min // Energy. – 2018. – Vol. 158. – P. 746-759. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.075>.

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев*

Ғ. Даукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Байтурсынұлы көшесі 126/1
*e-mail: d.bondartsev@aes.kz

ЖАҢА ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ЖАБЫНДАР РЕТІНДЕГІ ТАБИҒИ МАТЕРИАЛДАР

Табиғи жабындардағы жылу алмасуды зерттеу үшін полигон жабдығы әзірленді. Жабын жағу үшін ағынды желі жасалды. Табиғи материалдар ретінде кварциттер, граниттер және тешениттер таңдалған. Детонациялық ағысы бар термоинструмент жасалды және ұнтақтарды тұйық көлемде ұсақтап алу технологиясы әзірленді. Оттықтың жұмыс режимін басқаруға арналған автоматты құрылғысы болады. Ұнтақтар эксцентриситеті әртүрлі эллиптикалық беттерден

жасалған пішінде дайындалған. Технология сыныбының ұнтақ шығымын $(0\div 2)\times 10^{-3}$ арттырады және ұнтақты нығайту дәрежесін арттырады. Автоматты құрылғы жабынға дейінгі оңтайлы қашықтықты белгілейді, ағыстың ағуының оңтайлы дағын қалыптастырады. Технология жабынға су шығаруды көздейді. Спіндік детонациялық алаудың жану учаскесінің көлденең жылдамдығы пайда болатын спиральды ізге көлбеу арқылы анықталады. Жабында тежеу есебінен жануды тұрақтандыру орын алады. Голографиялық интерферометрияның көмегімен жүргізілген зерттеулер оның жабынның бұзылуын болжау үшін пайдалы екенін көрсетті. Үш жылу көзі бар жабын термоқұрал алауының толқынын сіңіретін экран болып табылады. Жабын эрозиялық төзімділікті қамтамасыз етеді. Арқалық детонациялық алау жабын бөлшектерінің ішінара еруі есебінен жабынды бөлу шекаралары бойынша бөлшектердің бұзылуын едәуір төмендетеді.

Түйін сөздер: жылу алмасу, табиғи материалдар, жабындар, термоинструмент, тозаңдандыру.

A.A. Genbach, D.Yu. Bondartsev*

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynov str., 126/1

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

NATURAL MATERIALS AS NEW HIGH-TEMPERATURE COATINGS

The equipment of the polygon for the study of heat transfer in natural coatings was developed. A flow line for coating application was created. Quartzites, granites and teshenites were chosen as natural materials. A thermal tool with detonation jet was created and the technology of powder production by crushing in a closed volume was developed. The burner has an automatic device for controlling the mode of operation. Powders were prepared in molds made of elliptical surfaces with different eccentricity. The technology increases the powder yield of $(0\div 2)\times 10^{-3}$ m class and increases the degree of powder hardening. The automatic device sets the optimal distance to the coating, forms the optimal spot of the jet spreading. The technology provides for water ejection onto the coating. The transverse velocity of the ignition area of the spin detonation plume is determined from the inclination to the spiral trace. There is stabilization of combustion due to braking on the coating. Studies using holographic interferometry have shown that it is useful in predicting coating failure. The coatings with three heat sources is a screen that absorbs the heat tool torch waves. The coating provides erosion resistance. Spin detonation torch due to partial melting of coating particles significantly reduces particle fracture at coating interfaces.

Key words: heat transfer, natural materials, coatings, thermal tools, spraying.

Сведения об авторах

Александр Алексеевич Генбач – д.т.н., профессор кафедры «Теплоэнергетика и физика», НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даякеева», e-mail: a.genbach@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>.

Давид Юрьевич Бондарцев* – PhD, проф. преподаватель кафедры «Теплоэнергетика и физика», НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даякеева», e-mail: d.bondartsev@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>.

Авторлар туралы мәліметтер

Александр Алексеевич Генбач – т.ғ.д., проф. каф. «Жылу энергетикасы және физика», «Г. Даякеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті», e-mail: a.genbach@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>.

Давид Юрьевич Бондарцев* – PhD, проф. оқытушы каф. «Жылу энергетикасы және физика», «Г. Даякеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс Университеті», e-mail: d.bondartsev@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>.

Information about the authors

Alexander Genbach – d.t.s., prof. dep. «Thermal Power and Physics», «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev», e-mail: a.genbach@aes.kz, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>.

David Bondartsev – PhD, prof. lecturer dep. «Thermal Power and Physics», «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications n.a. G. Daukeev», e-mail: d.bondartsev@aes.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>.

Поступила в редакцию 27.05.2025

Поступила после доработки 03.06.2025

Принята к публикации 04.06.2025