

**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 2224-5227

Volume 3, Number 319 (2018), 125 – 132

A.A. Genbach¹, D.Yu. Bondartsev²¹Genbach A.A., Doctor of Engineering Science, Professor AUPET;²Bondartsev D.Yu., Postdoctoral student AUPET, leading engineer,

JS «Trest Sredazenergomontazh»

d.bondartsev@saem.kz**SCIENTIFIC METHOD OF CREATION CAPILLARY-POROUS
COOLING SYSTEMS FOR ELEMENTS
OF ENERGY BUILDING OF POWER STATIONS**

Abstract. To create a scientific methodology, studies of the ultimate heat fluxes in metallic and poorly heat-conducting porous structures operating under the combined action of gravitational and capillary forces and cooling various devices of thermal power plants have been carried out. On the basis of the problem of thermoelasticity and experimental data, the mechanism of destruction of metal vaporising surfaces and poorly heat-conducting coatings of low porosity made of natural mineral media (granite) is described. On the basis of the analogy of the phenomena, the dependences of the heat fluxes on the time of their action and the depth of penetration of temperature perturbations are revealed. Capillary - porous systems have high intensity, high heat transfer ability, reliability, compactness.

Keywords: heat transfer crisis; capillary-porous structure; heat and power installations.

УДК 536.248.2

А.А. Генбач¹, Д.Ю. Бондарцев²¹Генбач А.А., доктор технических наук, профессор АУЭС;²Бондарцев Д.Ю., докторант АУЭС, ведущий инженер,

АО «Трест Средаэнергоустановка»

**НАУЧНАЯ МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ
КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ
ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.**

Аннотация. Для создания научной методики проведены исследования предельных тепловых потоков в металлических и плохотеплопроводных пористых структурах, работающих при совместном действии гравитационных и капиллярных сил, и охлаждающих различные устройства теплоэнергоустановок. На основе задачи термоупругости и опытных данных описан механизм разрушения металлических парогенирирующих поверхностей и плохотеплопроводных покрытий малой пористости, выполненных из естественных минеральных сред (гранита). На основе аналогии явлений выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений. Капиллярно – пористые системы обладают высокой интенсивностью, большой теплопередающей способностью, надежностью, компактностью.

Ключевые слова: кризис теплопередачи; капиллярно-пористая структура; тепловые энергоустановки.

Введение. Успехи в применении капиллярно-пористых материалов в технике привлекали многих исследователей и изобретателей создавать на их основе различные устройства. Повышалась интенсивность теплоотводящих систем и форсировка протекающих в них процессов [1-3]. Использование пористых материалов помимо систем охлаждения позволяло создавать агрегаты, в которых решались проблемы взрывобезопасности, охраны труда и долговечности [4,6]. Этому способствовала возможность управлять процессами парообразования за счет избытка жидкости в порах и капиллярных структурах, создаваемого совместными действиями капиллярных и массовых сил [7-9].

В тепловых энергетических установках (ТЭУ) капиллярно-пористые материалы используются для охлаждения высокофорсированных детонационных горелочных устройств [3], создания

пароохладителей в паровых котлах [9], маслоохладителей, исключющие попадания масло в охлаждающую воду и воды в систему подшипников [10], лабиринтных уплотнений [11], и в других устройствах [10].

Основные области практического применения капиллярно-пористых систем представлены в [3,5,8-11].

Капиллярно-пористые системы позволяют достигнуть экономии топлива, сырья, воздуха, воды, тепла, повысить надежность охлаждения и взрывопожаробезопасность работы оборудования, способствовать высокоэффективному разрушению горных пород, бетонов, металлов, уменьшить низкотемпературную коррозию поверхностей, сократить загрязнению биосферы ядовитыми газами, пылью, теплом, ускорить решение проблем продовольственной программы, получить большой экономический и социальный эффекты в области экологии и охраны труда.

Основными преимуществами капиллярно-пористых систем являются высокая интенсивность, большая теплопередающая способность, надежность, компактность, простота в изготовлении и эксплуатации, они улучшают режимные и технологические показатели и имеют невысокие капитальные и эксплуатационные расходы.

Авторы [12] проводят сравнительный анализ методов расчета теплоотдачи по кипению воды с недогревом в вертикальных каналах, причем считают очаговую коррозию оболочек твэлов ядерных реакторов аналогом капиллярно-пористой структуры [13,14]. Однако исследования теплообмена по регулярной структурированной поверхности не проводилось.

По мнению авторов [15,16] поверхностное кипение на пористых поверхностях может влиять на развитие коррозии из-за эрозионного воздействия на поверхность теплообмена при схлопывании пузырей пара в недогретой жидкости. Поэтому требуется исследовать парообразование жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле капиллярных и массовых сил с учетом скорости и недогрева, которые создаются избытком жидкости.

Оценка интенсивности теплообмена для кипения жидкости в большом объеме и тонких пленках на гладкой поверхности показала на их равные возможности [12-14] при высоких тепловых потоках, и на более высокие показатели теплопередачи, чем у систем с капиллярно-пористым покрытием [15-16]. Требуется провести исследования теплопередающих возможностей капиллярно-пористых покрытий, работающих в поле капиллярных и массовых сил, и установить величины предельных (критических) нагрузок, приводящих к разрушению поверхностей нагрева.

На рисунке 1 представлена методика исследования капиллярно-пористых систем применительно к различным элементам энергоустановок. Системы отличаются тем, что имеют преимущественно гравитационный подвод жидкости и по интенсивности теплопередачи занимают промежуточное положение между тонкопленочными испарителями и пористыми испарителями с преимущественно капиллярным подводом жидкости (тепловыми трубами). Поэтому такие системы следует выделить в отдельный класс теплоотводящих систем.

Проведенные исследования позволяют дать рекомендации по выбору теплохолодоносителя, учесть вид его циркуляции, определить геометрию и материал аппаратов и интенсификаторов теплообмена, с учетом условий и ориентаций работы системы под давлением или разрежением, подводом и видом энергии, ориентации системы. Обобщение экспериментальных результатов и методика расчета тепло- и массообмена в капиллярно-пористых системах в соответствии с рисунком 1 представлены в [17-21].

Исследование различных факторов, влияющих на теплообмен в структурах, показывают, что особый интерес вызывают предельные (критические) состояния поверхности нагрева, когда система способна переносить максимальные потоки энергии и вещества. Однако в этом случае требуется знать величины тепловых потоков и термических напряжений с целью обеспечить надежную долговечную работу установки. Так можно получить максимальный перенос энергии и вещества для следующих условий: используется чистая жидкость, циркулирующая по принудительной схеме в закрытых эллиптических теплообменниках под давлением в перфорированных и профилированных поверхностях нагрева, выполненных из нержавеющей стали. Система работает с избытком жидкости, а наличие массовых сил обеспечивает вынужденное течение теплохолодоносителя с недогревом. Энергия подводится к вертикально расположенной поверхности по периметру сверхзвуковым высокотемпературным пульсирующим вращающимся факелом [1,3,11,19].

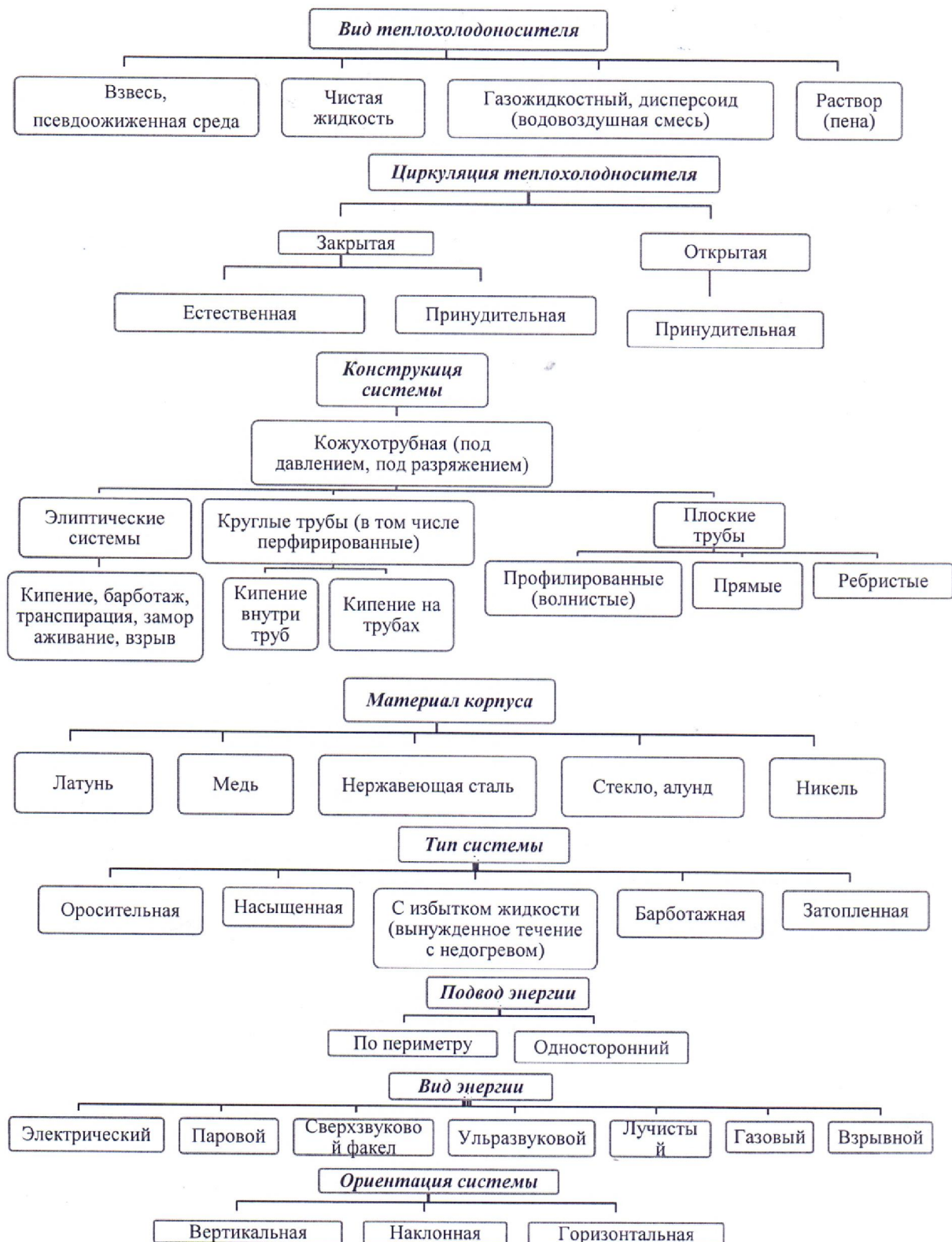


Рисунок 1 - Методика исследования различных факторов влияния на теплообмен в капиллярно-пористых системах ТЭУ

Экспериментальный метод. Исследования проводятся в капиллярно-пористой системе охлаждения, которая может работать по принципу замкнутой испарительно- конденсационной

схеме, либо быть разомкнутой. Изучаются различные условия теплообмена: способ подвода охладителя; степень прижатия капиллярно-пористой структуры; способность подпитки структуры из микро- артерий по высоте теплообменной поверхности; ориентация поверхности относительно гравитационных сил; геометрия: плоские, трубчатые и искривленные поверхности охлаждения; влияние давления вплоть до кризисных явлений с пережогом стенки (см. Рис 1).

Для исследования механизма теплообмена привлекаются методы голографии, обобщение подобных и аналогичных явлений [1,3,11,20,21]. Управление теплообменом проводится за счет эллиптических систем, путем комбинированного действия капиллярных и массовых сил [1,3].

Изучение теплообмена носит практический характер, предназначено для создания различных тепловых энергоустановок: пароохладителей паровых котлов, пористых покрытий из плохотеплопроводного материала, уплотнений в паровых турбинах и ряда других энергоустановок [1, 3, 7, 10, 19].

На рисунке 2 изображен поперечный разрез плоской экспериментальной установки с перфорированной прижимной пластиной 3 (Рис.3), трубчатыми артериями 4 и капиллярно-пористой структурой 2.

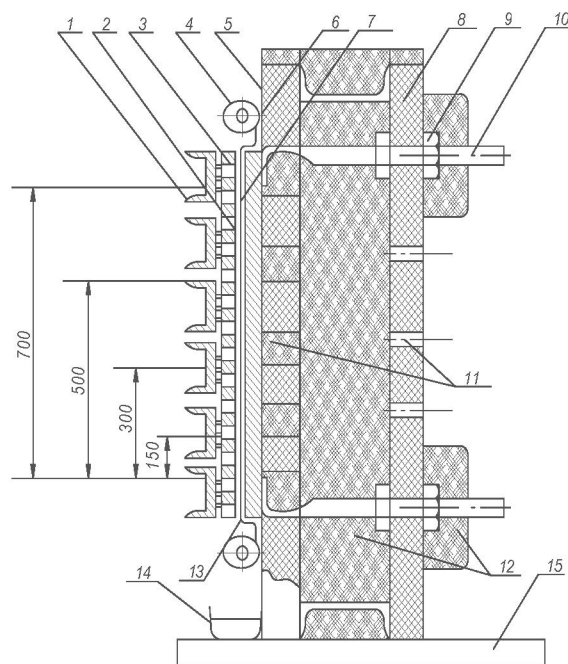


Рисунок 2 - Поперечный разрез плоской экспериментальной установки: 1 – прижимная планка, 2 – капиллярно-пористая структура, 3 – перфорированная прижимная пластина, 4 – трубчатая артерия, 5 – асбоцементная плита, 6 – нагреватель, 7 – изоляция, 8 – плита, 9 - прижимная гайка, 10 – электрод, 11 – окна, 12 – теплоизоляция, 13 – охлаждаемая стенка, 14 – сборник, 15 – подставка

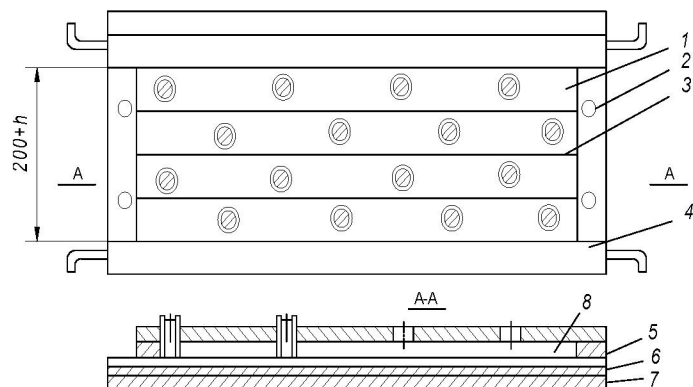


Рисунок 3 - Схема прижатия капиллярно-пористой структуры: 1 – пластины, 2 – прижимные винты, 3 – щели для выхода пара, 4 – подвод жидкости, 5 – прижимная перфорированная пластина, 6 – капиллярно-пористая структура, 7 – обогреваемая стенка, 8 – микро артерия

Наибольшая возможная погрешность:

- А) при измерении тока - $\pm 0,6\%$, падение напряжения - $\pm 1\%$, мощность - $\pm 1,6\%$,
 Б) при определении расхода жидкости ротаметрами - $\pm 3\%$.

Невязка баланса по подведенному током теплу и теплу, отведенному циркуляционной и избыточной воды с учетом потерь тепла через изоляцию, не превышали $\pm 12\%$, а по циркуляционной воде - $\pm 11\%$. Расхождение материального баланса между расходом охлаждающей жидкости, расхода слива и конденсата составляет не больше $\pm 10\%$.

Методика измерений и обработка опытных данных опубликована в работах [2,4]. Для исследования кризиса кипения нами так же собирались установки, выполненные в виде огнеструйной горелки ракетного типа. Схема экспериментальной установки и условия проведения опытов представлены в [3]. Камеры сгорания и сверхзвуковые сопла охлаждались капиллярно-пористой и водяной системой (Рис 4). Термореактивная горелка так же использовалась для исследования предельного состояния капиллярно-пористых покрытий, выполненных из естественных минеральных сред (гранитные, кварцевые и тешенитные покрытия). Тепловое воздействие осуществлялось сверхзвуковым (до 2000 м/с) высокотемпературным (до 2500°C) пульсирующим факелом (см. рис. 1, вид энергии). Результаты разрушенных камер сгорания показаны на рис 4.

Результаты кризиса теплопередачи в капиллярно-пористой системе охлаждения и их обсуждения.

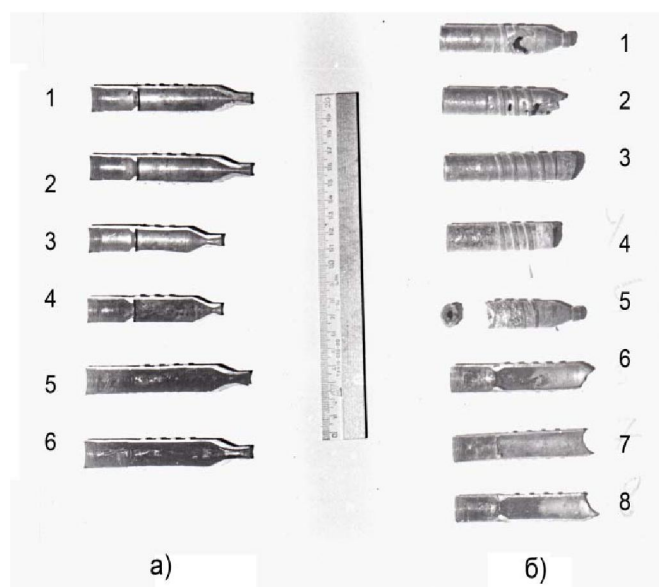


Рисунок 4 - Разрушенные камеры сгорания и сверхзвуковые сопла горелки:

- а) сопла выполнены без утолщения стенки: 1, 2, 3, 4 – до эксплуатации; 5, 6 – после 40 часов эксплуатации (разрушены дефлекторные кольца и увеличены сечения сопел); 1, 2, 5, 6 – $\alpha = 0,8$; 3, 4 – $\alpha = 0,6$;
 4 – камеры сгорания с укороченным соплом (обеспечивала проведение детонационного режима горения). Система охлаждения – водяная ($q_{кр.сеч.} = 1 \times 10^6$ Вт/м²; $\bar{W} = 10$ м/с)
 б) сопла выполнены с утолщением стенки: 1-8 – $\alpha = 0,6 \dots 0,65$; разрушение произошло в результате прорыва газов в водяную систему охлаждения при разгерметизации уплотнений; 5 – камера сгорания с оплавленным завихрителем. Система охлаждения – капиллярно-пористая ($q_{кр.сеч.} = 1 \times 10^6$ Вт/м²)

Модель капиллярно-пористого покрытия. Для определения предельных тепловых потоков и напряжений решается задача термоупругости [3,9,10] при граничных условиях второго рода для одномерного уравнения нестационарной теплопроводности.

Рассмотрим пластину толщиной $2h$. К поверхности $z=+h$, начиная с момента времени $\tau=0$, подводится постоянный удельный тепловой поток q . Нижняя поверхность $z=-h$ и боковые края пластины теплоизолированы.

Уравнения теплопроводности с граничными и начальными условиями запишется в виде:

$$\alpha_{ст} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad T = 0, \tau < 0 \quad (1)$$

$$\lambda_{ст} \frac{\partial T}{\partial z} = q, \quad z = +h$$

$$\lambda_{ст} \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad z = -h$$

Распределение температуры по толщине зависит от теплофизических свойств материала, величины теплового потока и времени его подача:

$$T\left(\frac{z}{h}; \tau\right) = q \left\{ \frac{M}{2(c\lambda g)_{ст}} \tau + \frac{3z^2 + 6z}{12M} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\lambda g)_{ст}} \tau\right] \cos \frac{n\pi}{2} \left(\frac{z}{h} + 1\right) \right\}, \quad (2)$$

где $M = \frac{\lambda_{ст}}{h}$; n – целые положительные числа.

Зная распределение температуры в пластине, находим термические напряжения растяжения и сжатия, возникающие в некоторый момент времени τ на различной глубине от поверхности $\delta_i = (h=z_i)$ при данном значении теплового потока q , поскольку пластина с переменной по толщине температурой находится в плоско напряженном состоянии.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\alpha E}{(1-\nu)} T\left(\frac{z}{h}; \tau\right) + \frac{1}{(1-\nu)2h} \int_{-h}^{+h} 2'ET\left(\frac{z}{h}; \tau\right) dz, \quad (3)$$

где первый член - составляющая напряжения сжатия, а второй – растяжения.

Решение уравнения (1).

Задаваясь предельными значениями напряжения сжатия и растяжения для горной породы (пористые покрытия из естественной минеральной среды) и металла, получаем зависимость теплового потока, требуемого для разрушения, от времени подачи и глубины проникновения. Кроме того, приравнявая температуры на поверхности пластины к температуре плавления породы и металла, находим значения удельных тепловых потоков, необходимых для расплавления поверхностного слоя за различный промежуток времени их действия:

плавление поверхности

$$q_1 = \frac{T_{пл.}}{\left\{ \frac{M}{2(c\lambda g)_{ст}} \tau + \frac{2}{3M} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\lambda g)_{ст}} \tau\right] \cos n\pi \right\}}; \quad (4)$$

создание предельных напряжений сжатия

$$q_2 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.сж.}}{\alpha E} \frac{1}{\frac{M}{2c\lambda g_{ст}} \tau + \frac{3z^2 + 6z}{12M} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4c\lambda g_{ст}} \tau\right] \cos \frac{n\pi}{2} \left(\frac{z}{h} + 1\right)} \quad (5)$$

создания предельных напряжений растяжения

$$q_3 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.раст.}}{\alpha E} \frac{1}{\frac{M}{2(c\lambda g)_{ст}} \tau} \quad (6)$$

где $M = \lambda_{ст}/h$ – параметр, n – целые положительные числа.

Зависимости величины q_1 , q_2 , q_3 от времени τ при фиксированных значениях размера частицы δ для покрытия, либо глубины проникновения температурных возмущений для металла, рассчитывались на ПК применительно к пластине, выполненным из кварца, гранита и металла (медь и нержавеющая сталь).

Заключение

На основе проведенных исследований в случае облучения факелом керосино-кислородной горелки пористого покрытия на рабочем участке имеем до 4×10^7 Вт/м², что соответствует q покрытий $0,4 \times 10^7$ Вт/м². Механизм разрушения металлов принципиально отличается от механизма разрушения покрытий из горных пород.

Разработана научная методика исследования и создания капиллярно-пористых систем охлаждения и покрытий для различных условий тепломассообмена в элементах энергооборудования.

Обозначения

m – расход, кг/с;	τ – время, с;
q – тепловая нагрузка, Вт/м ² ;	a – коэффициент теплопроводности, м ² /с;
h – высота, толщина пленки, м;	λ – коэффициенты теплопроводности, Вт/мК;
\bar{W} – средняя скорость, м/с;	C – теплоемкость, Дж/кгК;
α – коэффициент избытка воздуха;	ρ – плотность кг/м ³ ;
T – температура, К;	δ – толщина структуры (глубина распространения волны, размер частиц), м;
v – ширина ячейки сетки на просвет (гидравлический размер пор), м;	σ –напряжение;
G – удельный расход, кг/м ² с;	α – коэффициент линейного расширения, К ⁻¹ ;
d – размер (диаметр) зерен структуры, м;	ν – коэффициент Пуассона (поперечного сжатия);
x – координата (направление движения жидкости), м;	E – модуль Юнга (упругости), Па;
y – координата (направление движения жидкости), м;	Q – удельная энергия разрушения, Дж/м ³
z – координата, м;	

Индексы

ж, п – жидкость, пар; кр. сеч. – критическое сечение; г – горячий; ст. – стенка; г – гидравлический; н – насыщение; пл. – плавление (пленка); пр. сж. – предельное сжатие; пр. раст. – предельное растяжение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Polyayev, V.M. et al., *Methods of Monitoring Energy Processes, Experimental Thermal and Fluid Science, International of Thermodynamics. Experimental Heat Transfer, and Fluid Mechanics. Avenue of the Americas, New York, USA, 1995, Vol. 10, pp. 273-286.*
- [2] Polyayev, V.M., Genbach A.A., *Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces, Thermal Engineering, 40 (1993), 7, pp. 551-554.*
- [3] Поляев В.М., Генбач А.А., Генбач А.А. Предельные состояния поверхности при термическом воздействии // Теплофизика высоких температур. – 1991. Т.29, № 5. – С. 923-934.
- [4] Polyayev, V.M., Genbach A.A., *Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System. Proceedings, 2nd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Dubrovnik, Yugoslavia, 1991, pp. 639-644.*
- [5] Поляев В.М., Генбач А.А., Минашкин Д.В. Процессы в пористом электрическом теплообменнике // Известия вузов. Машиностроение. – 1991. - № 4 – 6. – с. 73 – 77.
- [6] Генбач А.А., Бакытжанов И.Б. Защита от землетрясений фундаментов ТЭС с помощью пористых геоэкранов // Поиск, МОН РК, № 1 (2), 2012. – с. 289 – 298.
- [7] Генбач А.А., Данильченко И. Пористый пароохладитель паровых котлов // Промышленность Казахстана, № 1 (70), 2012. – с. 72 – 75.
- [8] Генбач А.А., Олжабаева К.С. Визуализация термического воздействия на пористой материал в ТЭУ ЭС // Вестник Национальной инженерной академии РК, № 3 (45), 2012. – с. 63 – 67.
- [9] Генбач А.А., Исламов Ф.А. Исследование присопловой галтели в энергоустановках // Вестник КазНТУ, № 3 (97), 2013. – с. 245 – 248.

- [10]Генбач А.А., Байбекова В.О. Моделирование теплообмена в пористой системе охлаждения подшипника турбины. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2017; 60 (6): 558-570.
- [11]Поляев В.М., Генбач А.А. Управление теплообменов в пористой структуре // *Известия Российской академии наук. Энергетика и транспорт* – 1992. Т 38. №6 – с. 105-110 .
- [12]Jamialahmadi M., et al., *Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures*, Intern. J Heat Mass Transfer. 51 (2008), 9-10, pp. 2482-2493.
- [13]Ose Y., Kunugi T., *Numerical Study on Subcooled Pool Boiling*, Progr. In Nucl. Sci. and Technology 2, (2011), pp. 125-129.
- [14]Krepper E., et al., *CFD Modeling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design*, Nucl. Eng. and Design, 237 (2007), 7, pp. 716-731.
- [15]Ovsyanik A.V., *Modelling of Processes of Heat Exchange at Boiling Liquids* (in Russian), Gomel State Technical University named after P.O., Sukhoy, Gomel, Belarus, 2012.
- [16]Aleksieik, O.S., Kravets V.Yu., *Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space*, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 64 (2013), 4/8, pp. 26-31.
- [17]Поляев В.М., Генбач А.А., Анализ законов трения и теплообмена в пористой структуре // *Вестник МГТУ, серия Машиностроение*. – 1991.- с. 86 – 96.
- [18]Поляев В.М., Генбач А.А., Бочарова И.Н. Влияние давления на интенсивность теплообмена в пористой системе. // *Известия вузов. Машиностроение*. – 1992. - № 4 – 6. – С. 68 -72.
- [19]Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы // *Известия вузов. Энергетика*. – 1991. № 12. – с. 97 – 101.
- [20]Genbach A.A., Jamankylova N.O., Bakic Vukman V. *The processes of Vaporization in the Porous Structures Working With The Excess of Liquid*, Thermal Science: Year 2017, Vol. 21, №1A, pp. 363-373. DOI:10.2298/TSCI160326313G.
- [21]Genbach A.A., Olzhabayeva K.S., Iliev I.K., *Boiling Process in oil Coolers on Porous Elements*, Thermal Science: Year 2016, Vol.20. № 5, pp. 1777-1789. DOI:10.2298/TSCI150602166G.

А.А. Генбач¹, Д.Ю. Бондарцев²

¹Генбач А.А., техникалық ғылым докторы, профессор АЭЖБУ;

²Бондарцев Д.Ю., докторант АЭЖБУ, бас инженер,
АО «Трест Средаэнергоустановка»

ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕСІ ҚУАТТЫЛЫҚ-БІР ЖАБДЫҚ ЖҮЙЕСІ ЭНЕРГИЯ ҚҰРЫЛЫСЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚҰРЫЛЫСЫНЫҢ ЭЛЕМЕНТІ

Аннотация. Ғылыми-зерттеу әдістерін жасау үшін гравитациялық және капиллярлық силдермен жұмыс істейтін металл және платформациялық поршенді құрылымдардағы жылу құятын жылу көздерін зерттеу және жылу қондырғыларының түрлі салқындатқыш құрылғыларын зерттеу жұмыстары жүргізілді. Негізінен минералдық ортадан (гранит) шығарылған металды парогенерирующих сырықтардан шығарылатын механизмдер мен оптикалық деректерді табу механизмі қажет. Осындай ұқсастықтар негізінде жылу алмастырулардың өздігінен өтетін температуралық және жылжымалы жылу алмастырулардың шығу тәсілдерін анықтайды. Бұл жүйе жоғары қарқындылықпен, үлкен жылумен, сенімділікпен ерекшеленеді.

Түйін сөздер: жылу тасымалдау дағдарысы; капиллярлық-кеуекті құрылым.