

## НАУЧНАЯ МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛОЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.А. Генбач<sup>1</sup>

Д.Ю. Бондарцев<sup>1,2</sup>

d.bondartsev@saem.kz

<sup>1</sup> Алматинский университет энергетики и связи,  
Алматы, Республика Казахстан

<sup>2</sup> АО «Трест Средаэнергомонтаж», Алматы, Республика Казахстан

---

### Аннотация

Проведены исследования предельных тепловых потоков в металлических и пористых структурах с плохой теплопроводностью, работающих при совместном действии гравитационных и капиллярных сил и охлаждающих различные устройства тепловых энергетических установок. Описан механизм разрушения металлических парогенирующих поверхностей и покрытий малой пористости с плохой теплопроводностью, выполненных из естественных минеральных сред (гранита). Выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникания температурных возмущений. Капиллярно-пористые системы имеют высокую интенсивность, большую теплопередающую способность, надежность, компактность. Показано, что максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия, для покрытий из гранита составляет  $(0,25 \dots 0,3) \cdot 10^{-2}$  м. Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с размерами более  $0,3 \cdot 10^{-2}$  м для больших тепловых потоков и малого времени подачи, экранируются кривой плавления, а в случае малых тепловых потоков и интервалов времени — кривой растяжения. Исследования направлены на создание пористых покрытий в системах охлаждения

### Ключевые слова

*Кризис теплопередачи, капиллярно-пористая система, тепловые энергетические установки, паровой пузырь, капиллярные и массовые силы, управление теплопередачей, капиллярно-пористые покрытия, естественные минеральные среды*

Поступила 17.01.2018

© Автор(ы), 2019

---

**Введение.** Успешное применение капиллярно-пористых материалов в технике способствует созданию на их основе различных устройств, например повышающих интенсивности теплоотводящих систем и форсирования протекающих в них процессов [1–3]. Использование пористых

материалов помимо систем охлаждения позволяет создавать агрегаты, в которых решаются проблемы взрывобезопасности, охраны труда и долговечности [4–6]. Этому способствует возможность управлять процессами парообразования за счет избытка жидкости в пористых 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, исключающих попадание масла в охлаждающую воду и воды в систему подшипников [10], лабиринтных уплотнений [11] и других устройств. Основные области практического применения капиллярно-пористых систем приведены в [3, 5, 8–11].

Внедрение оборудования и технологических процессов в энергетике должно проводиться, прежде всего, с эколого-экономических позиций. Предлагаемые разработки капиллярно-пористых систем будут способствовать проведению процессов, существенно улучшающих и сохраняющих природную среду.

Капиллярно-пористые системы позволяют достичь экономии топлива, сырья, воздуха, воды, теплоты, повысить надежность охлаждения и взрывопожаробезопасность работы оборудования, способствовать высокоэффективному разрушению горных пород, бетонов, металлов, уменьшить низкотемпературную коррозию поверхностей, сократить загрязнение 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. На основе проведенного исследования капиллярно-пористых систем разработаны новые технические решения для улучшения эксплуатационных характеристик ТЭУ применительно к мощным энергоблокам ТЭС.

В работе [12] выполнен сравнительный анализ методов расчета теплоотдачи по кипению воды с недогревом в вертикальных каналах, причем в сочетании с очаговой коррозией оболочек твэлов ядерных реакторов [13, 14]. Однако исследование теплообмена на регулярной структурированной поверхности не проводилось.

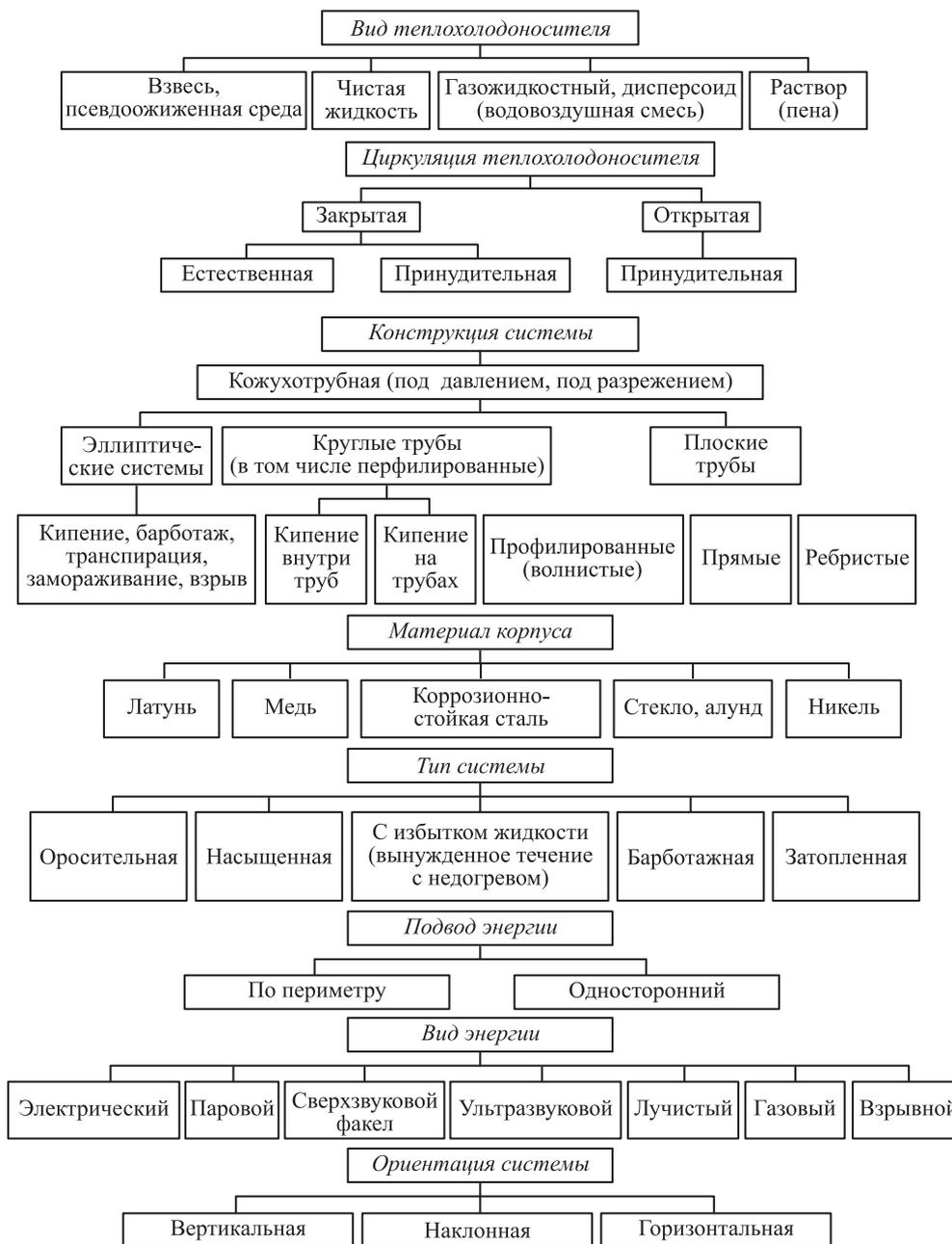
По мнению авторов работ [15, 16], кипение на пористых поверхностях может влиять на развитие коррозии из-за эрозионного воздействия на поверхность теплообмена при схлопывании пузырей пара в недогретой жидкости. Поэтому требуется исследовать парообразование жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле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

Оценка интенсивности теплообмена при кипении жидкости в большом объеме и тонких пленках на гладкой поверхности показала их равные возможности [12–14] при высоких тепловых потоках и 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 значения предельных (критических) нагреток, приводящих к разрушению поверхностей нагрева.

На рис. 1 приведена схема методики 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 и его циркуляции, определить геометрию и материал аппаратов и интенсификаторов теплообмена, учесть условия и ориентацию работы системы под давлением или разрежением, подвод и вид энергии, ориентацию системы. Результаты экспериментов и методика расчета тепло- и массообмена в капиллярно-пористых системах в соответствии с рис. 1 приведены в [17–21].

Исследование различных факторов, влияющих на теплообмен в структурах, показывает, что особый интерес вызывают предельные (критические) состояния поверхности нагрева, когда система способна переносить максимальные потоки энергии и веществ. Однако в этом случае необходимо 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: использование чистой жидкости, циркулирующей по принудительной схеме в закрытых эллиптических теплообменниках под давлением в перфорированных и профилированных поверхностях на-



**Рис. 1.** Схема методики исследования влияния различных факторов на теплообмен в капиллярно-пористых системах ТЭУ

грева, выполненных из коррозионно-стойкой стали. Система работает с избытком жидкости, а наличие массовых сил обеспечивает вынужденное течение теплоносителя с недогревом. Энергия подводится к вертикально расположенной поверхности по периметру сверхзвуковым высокотемпературным пульсирующим вращающимся факелом [1, 3, 11, 19].

**Экспериментальный метод исследования кризиса теплопередачи и предельного состояния теплообменной поверхности, покрытой капиллярно-пористой средой.** Разработаны экспериментальные установки, которые позволяют исследовать интегральные характеристики теплопередачи: удельные тепловые потоки  $q$  вплоть до критических; расходы жидкости  $m_{ж}$  и пара  $m_{п}$ ; распределение температурного поля по высоте и длине теплообменной поверхности.

Исследования проводятся в капиллярно-пористой системе охлаждения, которая может работать по принципу замкнутой испарительно-конденсационной схемы либо быть разомкнутой. Изучаются различные условия теплообмена: способ подвода охладителя; степень прижатия капиллярно-пористой структуры; способность подпитки структуры из микроартерий 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).

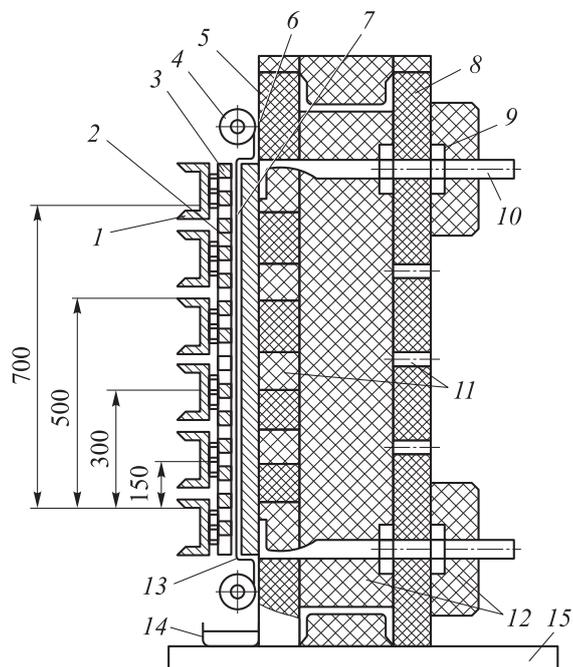
Для исследования механизма теплообмена привлекаются методы голографии, а также обобщение подобных и аналогичных явлений [1, 3, 11, 20, 21]. Управление теплообменом проводится за счет эллиптических систем, путем комбинированного действия капиллярных и массовых сил [1, 3]. Изучение теплообмена носит практический характер при создании различных тепловых энергоустановок: пароохладителей паровых котлов, пористых покрытий из плохотеплопроводного материала, уплотнений и ряда других энергоустановок [1, 3, 7, 10, 19].

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

Возможна наибольшая погрешность:  $\pm 0,6$  % (при измерении тока);  $\pm 1$  % (из-за падения напряжения);  $\pm 1,6$  % (по мощности);  $\pm 3$  % (при определении расхода жидкости ротаметрами).

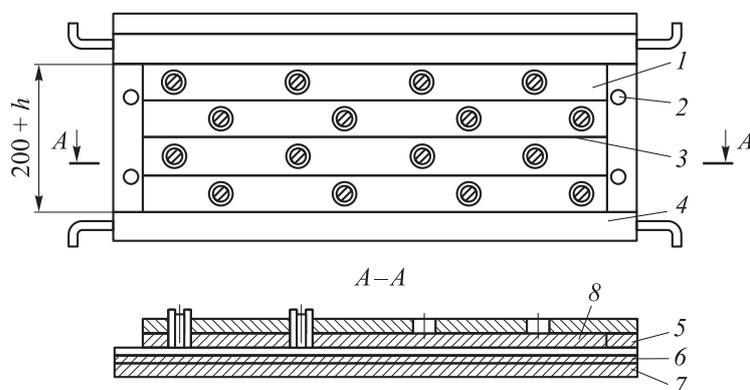
Невязка баланса по теплоте, подведенной током и отведенной циркуляционной и избыточной водой, при учете потерь теплоты через изоляцию не превышала  $\pm 12$  %, а по циркуляционной воде не более  $\pm 11$  %. Расхождение материального баланса между расходом охлаждающей жидкости, расходом слива и конденсата составляет не больше  $\pm 10$  %. Методика измерений и обработка опытных данных приведена в [2, 4].

Для исследования кризиса кипения также собирали установки, выполненные в виде огнеструйной горелки ракетного типа. Схема экспериментальной установки и условия проведения опытов приведены в [3].



**Рис. 2.** Поперечный разрез плоской экспериментальной установки:

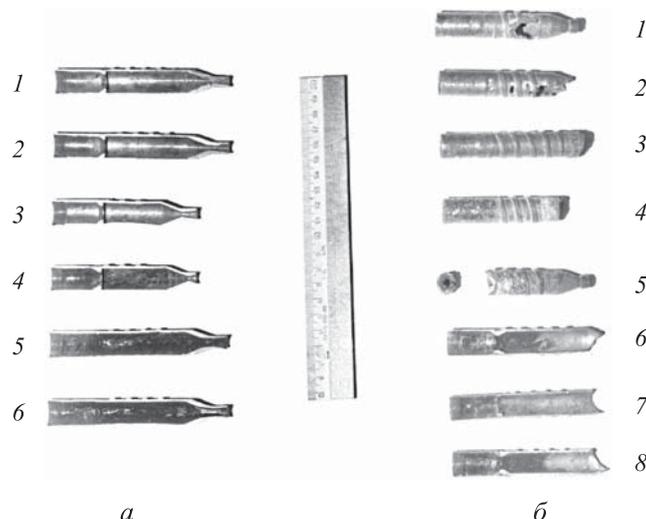
1 — прижимная планка; 2 — капиллярно-пористая структура; 3 — перфорированная прижимная пластина; 4 — трубчатая артерия; 5 — асбоцементная плита; 6 — нагреватель; 7 — изоляция; 8 — плита; 9 — прижимная гайка; 10 — электрод; 11 — окна; 12 — теплоизоляция; 13 — охлаждаемая стенка; 14 — сборник; 15 — подставка



**Рис. 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 — микроартерия

Камеры сгорания и сверхзвуковые сопла охлаждались капиллярно-пористой и водяной системами (рис. 4). Термореактивная горелка также использовалась для исследования предельного состояния капиллярно-

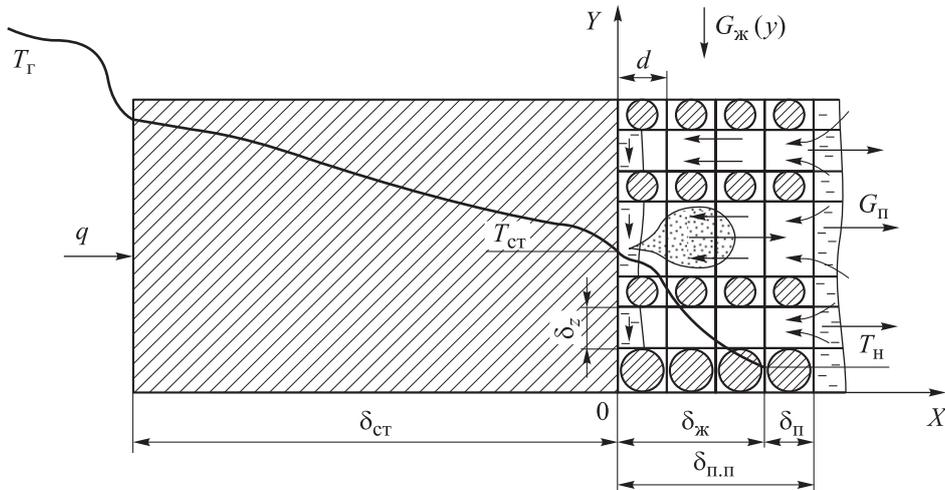


**Рис. 4.** Разрушенные камеры сгорания и сверхзвуковые сопла горелки:  
*a* — сопла выполнены без утолщения стенки; 1–4 — до эксплуатации; 5, 6 — после 40 ч эксплуатации (разрушены дефлекторные кольца и увеличены сечения сопел); 1, 2, 5, 6 —  $\alpha = 0,8$ ; 3, 4 —  $\alpha = 0,6$ ; 4 — камеры сгорания с укороченным соплом (обеспечивали проведение детонационного режима горения); система охлаждения — водяная ( $q_{кр. сеч} = 1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\bar{W} = 10$  м/с); *б* — сопла выполнены с утолщением стенки; 1–8 —  $\alpha = 0,6-0,65$  (разрушение произошло в результате прорыва газов в водяную систему охлаждения при разгерметизации уплотнений); 5 — камера сгорания с оплавленным завихрителем; система охлаждения — капиллярно-пористая ( $q_{кр. сеч} = 1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>)

пористых покрытий, выполненных из естественных минеральных сред (гранитные, кварцевые и тешенитные покрытия). Тепловое воздействие осуществлялось сверхзвуковым (до 2000 м/с) высокотемпературным (до 2500 °С) пульсирующим факелом (см. рис. 1, вид энергии). Разрушенные камеры сгорания приведены на рис. 4.

**Модель капиллярно-пористой структуры системы охлаждения.** Модель капиллярно-пористого покрытия, нанесенного на охлаждаемую поверхность теплонагруженного элемента энергоустановок, показана на рис. 5. При наступлении кризиса кипения возникает предельное состояние поверхности нагрева и происходит разрушение последней вместе с покрытиями. Такая схема позволяет моделировать трещины хрупких покрытий и пластических пористых структур.

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



**Рис. 5.** Физическая модель процессов тепломассопереноса в пористой структуре, покрывающей охлаждаемую поверхность:

прямые линии — движение жидкости; волнистые линии — движение пара;

$q$  — тепловой поток;  $T_{Г}$ ,  $T_{СТ}$ ,  $T_{Н}$  — температура газов, стенки, насыщения;  $G_{Ж}(y)$ ,

$G_{П}$  — расход жидкости и пара;  $\delta_{СТ}$ ,  $\delta_{П.П}$ ,  $\delta_{Ж}$ ,  $\delta_{П}$  — толщина парогенерирующей поверхности, пористого покрытия, жидкости и пара;  $b_z$ ,  $d$  — ширина ячеек пористого покрытия и диаметр зерен

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 запишем в виде

$$\begin{aligned} \alpha_{СТ} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad T = 0, \tau < 0; \\ \lambda_{СТ} \frac{\partial T}{\partial z} &= q, \quad z = +h; \\ \lambda_{СТ} \frac{\partial T}{\partial z} &= 0, \quad z = -h. \end{aligned} \tag{1}$$

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

$$T\left(\frac{z}{h}; \tau\right) = q \left\{ \frac{M}{2(c\lambda g)_{СТ}} \tau + \frac{3z^2}{h^2} + \frac{6z}{h-1} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \times \right.$$

$$\times \exp \left[ -n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\lambda g)_{\text{ст}}} \tau \right] \cos \frac{n\pi}{2} \left( \frac{z}{h} + 1 \right) \Bigg\}, \quad (2)$$

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

Зная распределение температуры в пластине, находим термические напряжения растяжения и сжатия, возникающие в некоторый момент времени  $\tau$  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 плосконапряженном состоянии:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\alpha E}{(1-\nu)} T \left( \frac{z}{h}; \tau \right) + \frac{1}{(1-\nu)2h} \int_{-h}^{+h} \alpha E T \left( \frac{z}{h}; \tau \right) dz, \quad (3)$$

где первый член — составляющая напряжения сжатия, а второй — растяжения.

**Решение уравнения (1).** Задавая предельные значения напряжений сжатия и растяжения для горной породы (пористых покрытий из естественной минеральной среды) и металла, получаем зависимость теплового потока, требуемого для разрушения, от времени подачи и глубины проникания. Кроме того, приравнявая температуры на поверхности пластины к температуре плавления породы и металла, находим удельные тепловые потоки, необходимые для расплавления поверхностного слоя за разные промежутки времени их действия:

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

— плавление поверхности;

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

— создание предельных напряжений сжатия;

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

— создание предельных напряжений растяжения, где  $M = \lambda_{\text{ст}}/h$  — параметр;  $n$  — целые положительные числа.

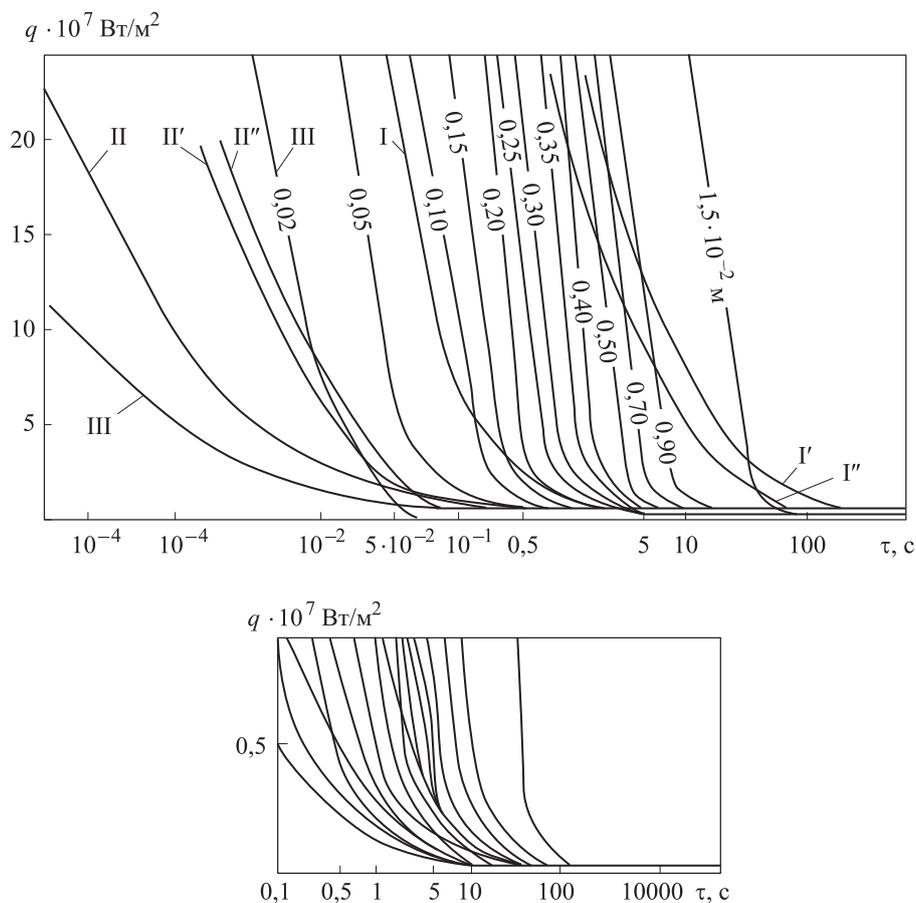
Зависимости величин  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  от времени  $\tau$  при фиксированных значениях размера частицы  $\delta$  для покрытия, либо глубины проникания температурных возмущений для металла, рассчитывались на ПК, применительно к пластине, выполненной из кварца, гранита и металла (медь и коррозионно-стойкая сталь).

**Механизм и расчет предельного состояния поверхности теплообмена. Анализ экспериментальных данных.** Результаты расчетов приведены на рис. 6–9. Максимальный размер частиц, отрывающихся под действием сил сжатия, для покрытий из гранита составляет  $(0,25\dots 0,3) \cdot 10^{-2}$  м, что согласуется с результатами, полученными скоростной киносъемкой (рис. 10). Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с размером  $\delta > 0,3 \cdot 10^2$  м для больших тепловых потоков и малых  $\tau$ , экранируются кривой плавления, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени — кривой растяжения.

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения представляется эпюрами напряжений внутри пластины для различных интервалов времени от начала рассматриваемого процесса. При малых  $\tau$ , порядка  $10^{-1}$  с, возникают только напряжения сжатия. Начиная с  $\tau \approx 1$  с, в некоторой области  $\Delta = (h-z_i)$  до  $0,3 \cdot 10^{-2}$  м, напряжение сжатия переходит в напряжение растяжения за весьма короткий промежуток времени, причем для разных интервалов времени они находятся на разной глубине от поверхности пластины.

Верхним пределом устойчивого разрушения покрытия из кварца является значение  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, из гранита — до  $0,5 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, а нижним пределом, когда еще наблюдается отрыв частиц под действием термических напряжений сжатия, —  $0,25 \cdot 10^7$  и  $0,05 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> соответственно.

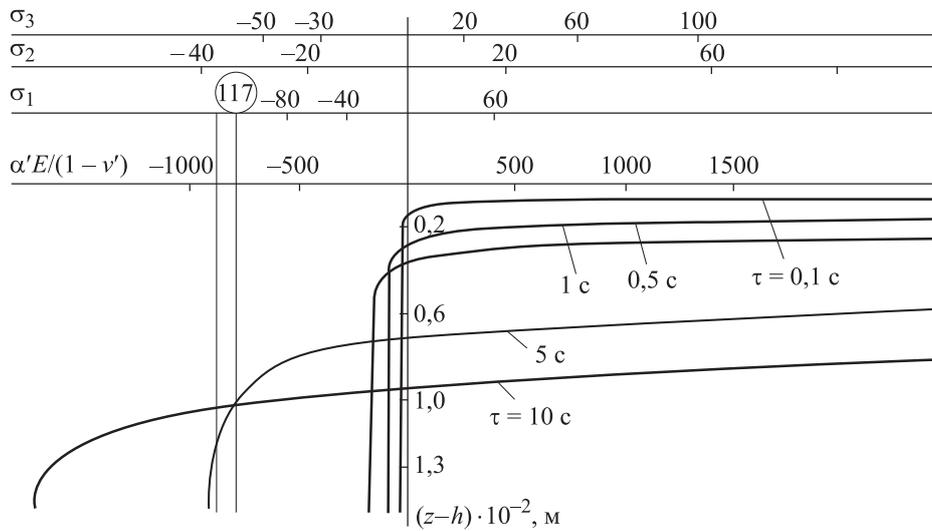
Разрушение анизотропной среды под действием направленного нагрева основано на неравномерном расширении ее составляющих (кристаллов). Нагреваемый слой породы покрытия, увеличиваясь в объеме, начинает оказывать давление на соседние менее нагретые слои. Поскольку расширению во всех других направлениях препятствует реакция прогретых слоев, порода начинает свободно расширяться с открытой стороны и в силу своей перенапряженности отделяется и откалывается.



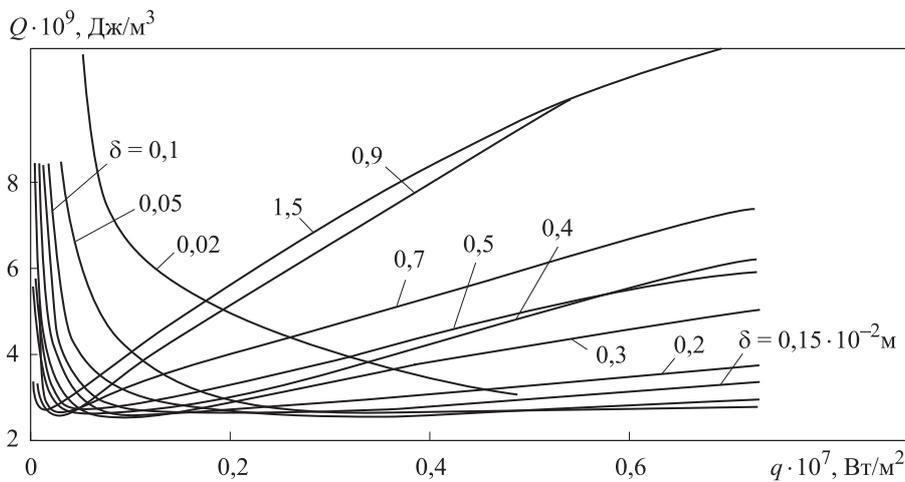
**Рис. 6.** Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия III гранитного покрытия, от времени действия  $\tau$  для отрывающихся частиц различной толщины  $\delta$ :

I — напряжения растяжения, достаточные для разрушения (I', I'' — медь и коррозионно-стойкая сталь,  $h = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м); II — оплавление поверхности (II', II'' — медь и коррозионно-стойкая сталь,  $h = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м)

Если полости вакансий могут превращаться в дислокации, то облучаемое покрытие приобретает пластические свойства и не разрушается под действием факела. Таковы все металлы. Это свойство имеют также и некоторые породы. Проведено тестирование с парогенерирующими металлическими поверхностями нагрева в момент кризиса кипения [2]. В металлах кристаллы разрушаются под действием напряжений. Процесс разрушения состоит из стадий зарождения трещин и их развития. В результате термического воздействия зарождаются микротрещины в области концентраторов напряжений (включений, неоднородностей, трещин). Высокие внутренние напряжения также могут возникать вследствие

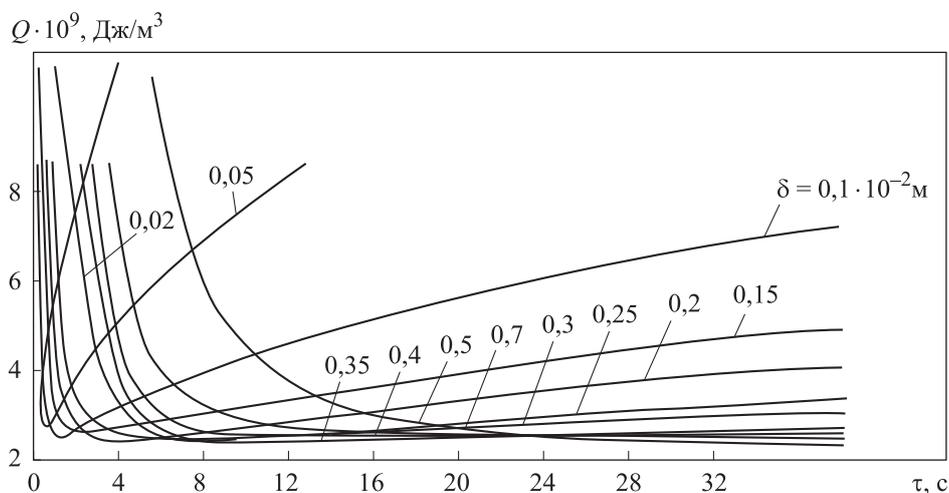


**Рис. 7.** Эпюры напряжений по толщине граничной пластины при различных тепловых потоках и времени их действия:  
 $q_1 = q_2 = 0,142 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ;  $q_3 = 0,075 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$

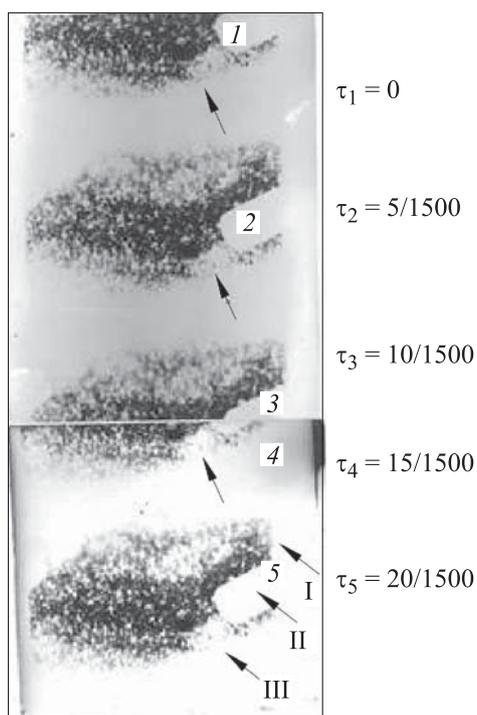


**Рис. 8.** Изменение удельной энергии разрушения  $Q$  гранитного покрытия в зависимости от  $q$  для различных  $\delta$ ;  $Q = q\tau / \delta$

неоднородного протекания пластической деформации, после чего возникает хрупкое разрушение. Пластическая деформация при этом рассматривается как первопричина разрушения, хотя она может задерживать рост трещин. В основе разрушения, с одной стороны, лежат разрывы связей, обусловленные тепловыми флуктуациями, а с другой, разрушение есть кинетический термоактивационный процесс, в основе которого лежит перемещение вакансий к трещинам, рост которых определяет кинетику разрушения.



**Рис. 9.** Изменение удельной энергии разрушения  $Q$  гранитного покрытия в зависимости от  $\tau$  для различных  $\delta$



**Рис. 10.** Кинограмма полета (шелухи размером  $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м) при разрушении частицы гранитного покрытия горелкой ракетного типа ( $q = 1,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>):

I — капиллярно-пористое покрытие; II — ствол горелки, из которого истекает сверхзвуковой высокотемпературный пульсирующий детонационный поток газов;  
III — частица, оторванная от покрытия

**Заключение.** На основе проведенных исследований в случае облучения факелом керосино-кислородной горелки пористого покрытия на рабочем участке выявлено, что тепловая нагрузка  $q$  составляет до  $4 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, это соответствует тепловой нагрузке покрытий  $q = 0,4 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>. Механизм разрушения металлов принципиально отличается от механизма разрушения покрытий из горных пород. Несмотря на это, на основе аналогии определены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникания температурных возмущений, что позволяет избежать кризиса кипения в системе охлаждения и обеспечить оптимальный подбор пористых покрытий малой пористости и теплопроводности. В перспективе требуются исследования других пористых природных материалов.

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

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Methods of monitoring energy processes. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 273–286.  
DOI: 10.1016/0894-1777(94)00061-C
- [2] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat transfer in a porous system in the presence of both capillary and gravity forces. *Thermal Engineering*, 1993, vol. 40, no. 7, pp. 551–554.
- [3] Поляев В.М., Генбач А.Н., 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. *Proc. 2nd World Conf. 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 высших учебных заведений. Машиностроение*, 1991, № 4-6, с. 73–77.
- [6] Генбач А.А., Бакытжанов И.Б. Защита от землетрясений фундаментов ТЭС с помощью пористых геозкранов. *Поиск*, 2012, № 1, с. 289–297.
- [7] Генбач А.А., Данильченко И. Пористый пароохладитель паровых котлов. *Промышленность Казахстана*, 2012, № 1, с. 72–75.
- [8] Генбач А.А., Олжабаева К.С. Визуализация термического воздействия на пористый материал в ТЭУ ЭС. *Вестник Национальной инженерной академии РК*, 2012, № 3, с. 63–67.
- [9] Генбач А.А., Исламов Ф.А. Исследование сопловых канавок в энергоустановках. *Вестник КазНТУ*, 2013, № 3, с. 245–248.

- [10] Генбач А.А., Исламов Ф.А. Моделирование процесса задевания ротора турбины. *Вестник КазНТУ*, 2013, № 6, с. 235–240.
- [11] Поляев В.М., Генбач А.А. Управление теплообменом в пористой структуре. *Известия РАН. Энергетика и транспорт*, 1992, т. 38, № 6, с. 105–110.
- [12] Jamialahmadi M., Müller-Steinhagen H., Abdollahi A., et al. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2008, vol. 51, no. 9-10, pp. 2482–2493. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052
- [13] Ose Y., Kunugi T. Numerical study on subcooled pool boiling. *Progr. Nucl. Sci. Tech.*, 2011, no. 2, pp. 125–129.
- [14] Krepper E., Končar B., Egorov Y. CFD modeling subcooled boiling — concept, validation and application to fuel assembly design. *Nucl. Eng. Des.*, 2007, vol. 237, no. 7, pp. 716–731. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2006.10.023
- [15] Овсянник А.В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей. Гомель, ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012.
- [16] Alekseik O.S., Kravets V.Yu. Physical model of boiling on porous structure in the limited space. *EEJET*, 2013, vol. 4, no. 8, pp. 26–31.
- [17] Поляев В.М., Генбач А.А. Анализ законов трения и теплообмена в пористой структуре. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1991, № 4, с. 86–96.
- [18] Поляев В.М., Генбач А.А., Бочарова И.Н. Влияние давления на интенсивность теплообмена в пористой системе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1992, № 4–6, с. 68–72.
- [19] Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы. *Известия высших учебных заведений. 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*, 2017, vol. 21, no. 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*, 2016, vol. 20, no. 5, pp. 1777–1789. DOI: 10.2298/TSCI150602166G

**Генбач Александр Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые энергетические установки (ТЭУ)» Алматинского университета энергетики и связи (Республика Казахстан, 050013, Алматы, ул. Байтурсынова, д. 126).

**Бондарцев Давид Юрьевич** — докторант кафедры «Тепловые энергетические установки (ТЭУ)» Алматинского университета энергетики и связи (Республика Казахстан, 050013, Алматы, ул. Байтурсынова, д. 126); ведущий инженер отдела производственного планирования и контроля АО «Грест Средаэнергоустановка» (Республика Казахстан, 050004, Алматы, пр-т Абылай хана, д. 56).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Научная методика создания капиллярно-пористых систем охлаждения для элементов теплоэнергооборудования электростанций. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 3, с. 89–106. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-89-106

**SCIENCE-BASED PROCEDURE FOR DESIGNING TUBULAR POROUS COOLING SYSTEMS FOR THERMAL POWER PLANT EQUIPMENT COMPONENTS**

**A.A. Genbach<sup>1</sup>**

**D.Yu. Bondartsev<sup>1,2</sup>**

d.bondartsev@saem.kz

<sup>1</sup> **Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan**

<sup>2</sup> **Trust Sredazenergomontazh JSC, Almaty, Republic of Kazakhstan**

**Abstract**

We investigated critical heat flux phenomena in metallic and porous structures characterised by low thermal conductivity. These structures are used to cool various thermal power plant equipment; their operation involves both gravity and capillary forces. The paper describes the failure mechanism in metallic steam generator surfaces and poorly thermally conductive low-porosity coatings made of natural mineral media (such as granite). We determined how heat flows depend on their duration and penetration depth of thermal disturbance. Tubular porous systems are less bulky and feature high intensity, higher thermal conductivity and reliability. We show that for granite coatings the maximum thickness of the particles detached due to compression forces is  $(0.25...0.3) \cdot 10^{-2}$  m. The compression curve sections that govern detachment of particles larger than  $0.3 \cdot 10^{-2}$  m are shadowed by the melt curve for high heat flows and short exposure times and by the tension curve in the case of low heat flows and short periods of time. The investigation should help us to design porous coatings usable in cooling systems

**Keywords**

*Departure from nucleate boiling, tubular porous system, thermal power plants, steam bubble, capillary and bulk forces, heat transfer control, tubular porous coatings, natural mineral media*

Received 17.01.2018

© Author(s), 2019

**REFERENCES**

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Methods of monitoring energy processes. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 1995, vol. 10, no. 3, pp. 273–286. DOI: 10.1016/0894-1777(94)00061-C

- [2] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat transfer in a porous system in the presence of both capillary and gravity forces. *Thermal Engineering*, 1993, vol. 40, no. 7, pp. 551–554.
- [3] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Limiting state of a surface during thermal activity. *High Temp.*, 1991, vol. 29, no. 5, pp. 729–739.
- [4] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of heat transfer in a porous cooling system. *Proc. 2nd World Conf. Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. Dubrovnik, Yugoslavia, 1991, pp. 639–644.
- [5] Polyayev V.M., Genbach A.A., Minashkin D.V. Processes in the porous elliptic heat exchanger. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 1991, no. 4-6, pp. 73–77 (in Russ.).
- [6] Genbach A.A., Bakytzhanov I.B. Protecting TPP bases from earthquakes with the help of porous geo screens. *Poisk*, 2012, no. 1, pp. 289–297 (in Russ.).
- [7] Genbach A.A., Daniľchenko I. Porous desuperheater steam boilers. *Promyshlennost' Kazakhstana* [Industry of Kazakhstan], 2012, no. 1, pp. 72–75 (in Russ.).
- [8] Genbach A.A., Olzhabaeva K.S. Visualization of thermal effect on porous material in thermal energy installations of ES power plants. *Vestnik Natsional'noy inzhenernoy akademii RK* [Bulletin of the National Engineering Academy of the Republic of Kazakhstan], 2012, no. 3, pp. 63–67 (in Russ.).
- [9] Genbach A.A., Islamov F.A. Research of the nozzle fillets in electrical installations. *Vestnik KazNTU*, 2013, no. 3, pp. 245–248 (in Russ.).
- [10] Genbach A.A., Islamov F.A. Modeling process of turbine rotor hardening. *Vestnik KazNTU*, 2013, no. 6, pp. 235–240 (in Russ.).
- [11] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control on heat transfer in porous structures. *Izvestiya RAN. Energetika i transport*, 1992, vol. 38, no. 6, pp. 105–110 (in Russ.).
- [12] Jamialahmadi M., Müller-Steinhagen H., Abdollahi A., et al. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2008, vol. 51, no. 9-10, pp. 2482–2493. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052
- [13] Ose Y., Kunugi T. Numerical study on subcooled pool boiling. *Progr. Nucl. Sci. Tech.*, 2011, no. 2, pp. 125–129.
- [14] Krepper E., Končar B., Egorov Y. CFD modeling subcooled boiling — concept, validation and application to fuel assembly design. *Nucl. Eng. Des.*, 2007, vol. 237, no. 7, pp. 716–731. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2006.10.023
- [15] Ovsyannik A.V. Modelirovanie protsessov teploobmena pri kipenii zhidkostey [Modelling of processes of heat exchange at boiling liquids]. Gomel', Sukhoi State Technical University of Gomel Publ., 2012.
- [16] Alekseik O.S., Kravets V.Yu. Physical model of boiling on porous structure in the limited space. *EEJET*, 2013, vol. 4, no. 8, pp. 26–31.
- [17] Polyayev V.M., Genbach A.A. Analysis of friction and heat exchange laws in porous structure. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 1991, no. 4, pp. 86–96 (in Russ.).

- [18] Polyayev V.M., Genbach A.A., Bocharova I.N. Vliyanie davleniya na intensivnost' teploobmena v poristoy sisteme. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 1992, no. 4–6, pp. 68–72 (in Russ.).
- [19] Polyayev V.M., Genbach A.A. Application field of porous system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energetika*, 1991, no. 12, pp. 97–101 (in Russ.).
- [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*, 2017, vol. 21, no. 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*, 2016, vol. 20, no. 5, pp. 1777–1789. DOI: 10.2298/TSCI150602166G

**Genbach A.A.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Thermal Power Plants, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (Baytursynova ul. 126, Almaty, 050013 Republic of Kazakhstan).

**Bondartsev D.Yu.** — Postdoctoral Fellow, Department of Thermal Power Plants, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (Baytursynova ul. 126, Almaty, 050013 Republic of Kazakhstan); Leading Engineer, Trust Sredaz-energomontazh JSC (Ablai Khan prospekt 56, Almaty, 050004 Republic of Kazakhstan).

**Please cite this article in English as:**

Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Science-based procedure for designing tubular porous cooling systems for thermal power plant equipment components. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 3, pp. 89–106 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-89-106

---

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
press@bmstu.ru  
<http://baumanpress.ru>

---

Подписано в печать 05.06.2019

Формат 70 × 108/16

Усл.-печ. л. 9,3

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
baumanprint@gmail.com