

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

ISSN 2224-5227

Volume 5, Number 315 (2017), 45 – 52

A.A. Genbatch¹, D.Yu. Bondartsev²¹Doctor of technical sciences, professor AUPET;²doctoral student AUPET, leading engineer

JS «Trest Sredazenergomontazh»

d.bondartsev@saem.kz**DEVELOPMENT OF THERMAL METHODS AND DEVICES FOR
THERMAL MECHANICAL EQUIPMENT OF POWER PLANTS
AND THE SCIENTIFIC METHODOLOGY FOR THEIR CREATION**

Abstract. The methods and devices for power plants and the creation of a scientific methodology have been developed. 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 heat and power plants are carried out. Based on the solution of the problem of thermo-elasticity and experimental data, the mechanism of destruction of metal steam-generating surfaces and poorly-heat-conducting coatings of small 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. The results of calculations and experiments showed that the maximum thickness of the particles that break off under the action of compression forces for granite coatings is $(0.25 \div 0.3) * 10^{-2}$ m. Sections of compression curves that determine the separation of particles with dimensions greater than $0.3 * 10^{-2}$ m for large heat fluxes and short delivery times are screened by the melting curve, and in the case of small heat fluxes and significant time intervals, the expansion curve. The research is aimed at the creation of porous cooling systems from well- and poorly-thermally conductive materials.

Key words: heat exchange, porous structure, thermal power plants.

УДК 536.248.2

А.А. Генбач¹, Д.Ю. Бондарцев²¹доктор технических наук, профессор АУЭС;²докторант АУЭС, ведущий инженер

АО «Трест Средазэнергомонтаж»

**РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВЫХ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ
ДЛЯ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И НАУЧНАЯ МЕТОДИКА ИХ СОЗДАНИЯ**

Аннотация. Разработаны способы и устройства для электростанций и 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 решения задачи термоупругости и опытных данных описан механизм разрушения металлических парогенерирующих поверхностей и плохотеплопроводных покрытий малой пористости, выполненных из естественных минеральных сред (гранит). 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. Результаты расчетов и эксперимента показали, что максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия для покрытий из

гранита составляет $(0,25 \div 0,3) \cdot 10^{-2}$ 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 значительных интервалов времени – кривой растяжения. Исследования направлены на создание пористых систем охлаждения из хорошо – и плохо- теплопроводных материалов.

Ключевые слова: теплообмен, пористая структура, ТЭС.

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 [2,4]. Этому способствовала возможность управлять процессами парообразования за счет избытка жидкости в порах и капиллярных структурах, создаваемого совместными действиями капиллярных и массовых сил [5-7].

В тепловых энергетических установках (ТЭУ) капиллярно-пористые материалы используются для охлаждения высокофорсированных детонационных горелочных устройств [8], создания пароохладителей в паровых котлах [9], маслоохладителей, исключаящие попадания масла в охлаждающую воду и воды в систему подшипников [10], лабиринтных уплотнений [11], и в других устройствах [12].

Основные области практического применения капиллярно-пористых систем нами защищены патентами и авторскими свидетельствами на изобретение [2,4,6-12].

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

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. [4,12]

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 [6,7].

На основе проведенного исследования капиллярно-пористых систем нами разработаны новые технические решения для улучшения эксплуатационных характеристик ТЭУ применительно к мощным энергоблокам ТЭС.

Для повышения надежности, экономичности и маневренности котельных установок и улучшения охраны окружающей среды предлагаются следующие технические решения [2,4,6-9,12]:

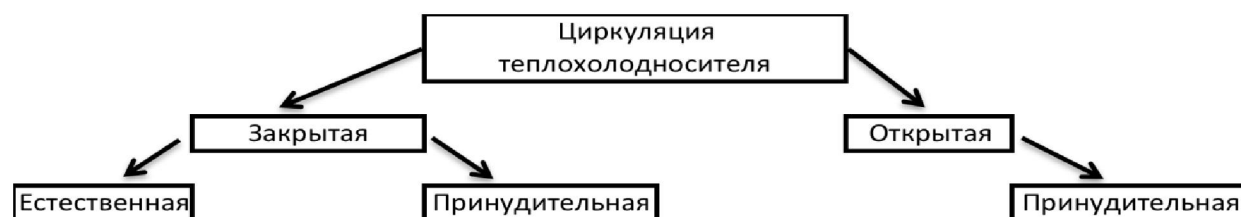
1. Устройство в топочных камерах тепловых труб для снижения образования оксидов азота;
2. Барабаны котлов и пароохладителей с пористыми образованиями для уменьшения циклических напряжений в стенках;
3. «Хвостовые» поверхности нагрева котлов, выполненные в виде пористых элементов для борьбы с низкотемпературной коррозией ;
4. В топливно-транспортных цехах применять управляемые пористые системы пылеподавления и пожаротушения;
5. В вагоноопрокидывателях и бункерах устанавливать пористые концентраторы для борьбы с зависанием топлива (подобные концентраторы позволяют отпугивать мальков рыб ценных пород);
6. Пылегазоочистку дымовых газов производить пористой управляемой системой не требующей регенерации;

7. Топливные горелки охлаждать пористыми элементами;
8. Экранные трубы снабжать пористыми структурами для расширения теплопередающих возможностей;
9. Термореактивными горелками вести резку котельных шлаков;
10. Проводить детонационное сжигание топлива в пористой среде;
11. Утилизировать теплоту уходящих газов тепловыми трубами;
12. Проводить теплообмен и гидродинамику двухфазных потоков в пористых структурах, в элементах, узлах и трактах котельного агрегата;
13. Осуществлять процессы гидродинамики в пористых барботажных системах;
14. Сепарировать пар в пористых структурах;
15. Проводить шумоглушение в газоходах и на сбросах паропроводах пористыми системами;
16. Осуществлять ускорение пуска и останова паровых котлов за счет снижения малоциклового усталости и ползучести пористыми системами;
17. Интенсифицировать теплообмен тепловыми трубами в топках с кипящим слоем;
18. Организовать низкотемпературные до – и сверхзвуковые многофазные вращающиеся пульсирующие потоки в топках с пористыми элементами;
19. Охлаждать крепления, опоры, подвески, заслонки и другие узлы в котельном агрегате капиллярно-пористыми структурами;

На рисунке 1 (см. Рис 1) представлена методика исследования капиллярно-пористых систем применительно к различным элементам ТЭУ. Системы отличаются тем, что имеют преимущественно гравитационный подвод жидкости и по интенсивности теплопередачи занимают промежуточное положение между тонкоплёночными 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 теплоносителя, учесть вид его циркуляции, определить геометрию и материал аппаратов и интенсификаторов теплообмена, с учетом условия работы системы (под давлением или разрежением), подводом и видом энергии и ориентацией системы. Обобщение экспериментальных результатов и методика расчета тепло- и массообмена в капиллярно-пористых системах в соответствии с Рис.1 представлены в [2,3,5-8].

Исследование различных факторов, влияющих на теплообмен в капиллярно-пористых структурах, показывает, что особый интерес вызывают предельные состояния поверхности нагрева, когда система способна переносить минимальные потоки энергии и вещества. Однако в этом случае требуется знать величины тепловых потоков и термических напряжений с целью обеспечить надежную и долговечную работу установки. Так, следуя Рис.1, можно получить максимальный перепад 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 обеспечивают вынужденные течения теплоносителя с недогревом. Энергия подводится к вертикально расположенной поверхности по периметру сверхзвуковым высокотемпературным пульсирующим вращающимся факелом.

Для определения предельных тепловых потоков и напряжений решается задача термоупругости [2,7,11] при граничных условиях второго рода для одномерного уравнения нестационарной теплопроводности.



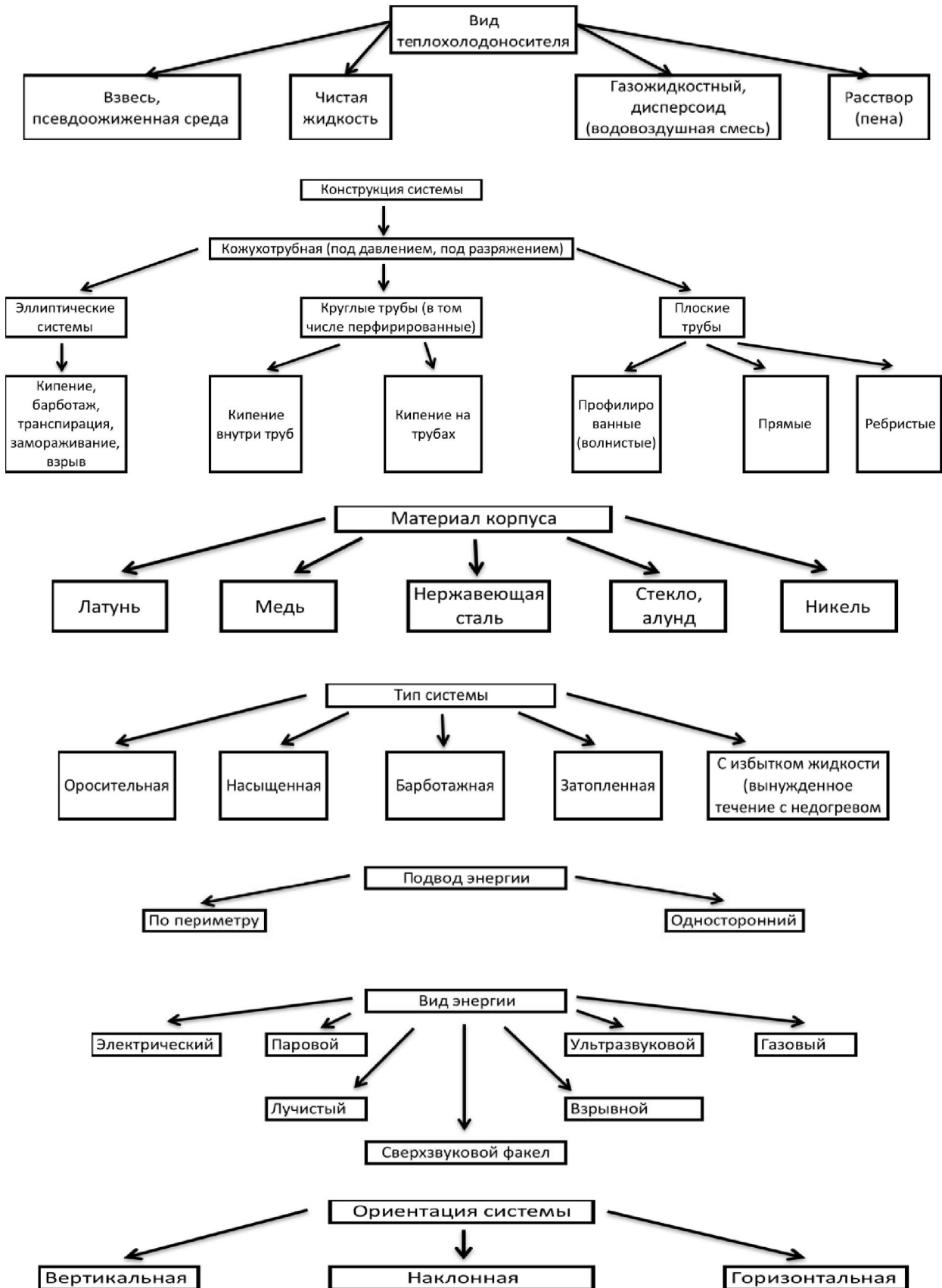


Рисунок 1 - Методика исследования различных факторов влияния на теплообмен капиллярно-пористых системах ТЭУ

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:

$$\alpha_{cm} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

$$T = 0 \quad \tau < 0$$

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

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

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

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

где $M = \frac{\lambda_{cm}}{h}$; 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 плосконапряженном состоянии.

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

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

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 [2,7]:

плавление поверхности

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

создание предельных напряжений сжатия

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

создания предельных напряжений растяжения

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

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).

В формулах приняты следующие обозначения:

q – удельный тепловой поток, Вт/м²; g – плотность, кг/м³; z – координата, м; T, t – температура, К; τ – время, с; δ – толщина, м; C – теплоемкость, кДж/кг*К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м*К; G – напряжение (Н/м²); α – коэффициент линейного растяжения, К⁻¹; E – модуль Юнга, Н/м²; ν – коэффициент Пуассона; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; кр – критический (предельный); пр. сж. – предельное состояние от сил сжатия; пр. раст. – предельное состояние от сил растяжения.

Результат расчетов представлены на Рис. 2,3. Максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия для покрытий из гранита, составляет $(0,25-0,3) \cdot 10^{-2}$ м, что согласуется с результатами, полученными скоростной киносъемкой (Рис.4). Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с размером $\delta > 0,3 \cdot 10^{-2}$ м для больших тепловых потоков и малых τ , экранируются кривой плавления, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени – кривой растяжения.

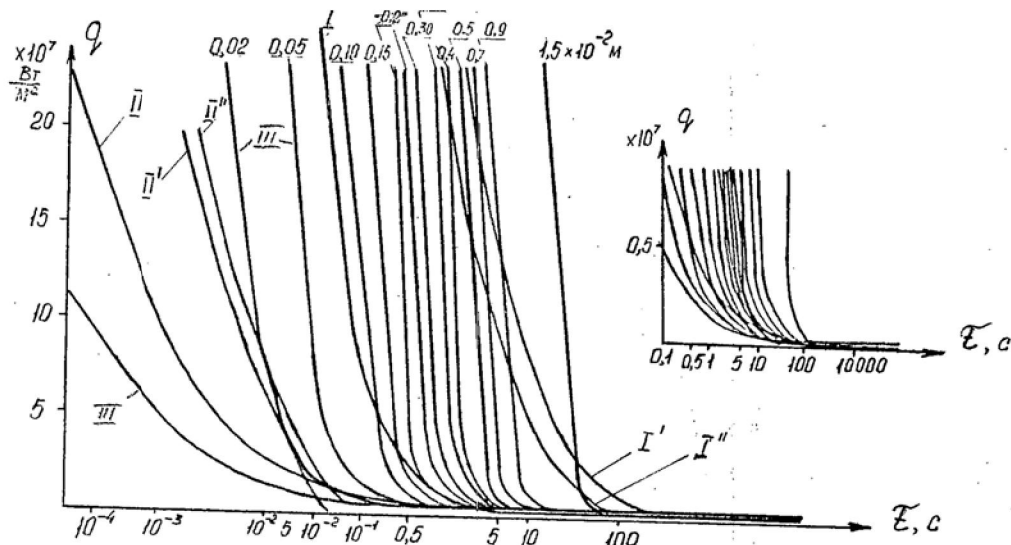


Рисунок 2 - Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия III гранитного покрытия в зависимости от времени действия τ для различной толщины δ отрывающихся частиц: I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения (I', I'' – медь и нержавеющая сталь, $h=0,1 \cdot 10^{-3}$ м); II – оплавление поверхности (II', II'' – медь и нержавеющая сталь, $h=0,1 \cdot 10^{-3}$ м)

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения представляют собой эпюры напряжений внутри пластины для различных интервалов времени от начала рассматриваемого процесса. При малых τ , 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, напряжения сжатия переходят в напряжения растяжения за весьма короткий промежуток времени, причем для различных интервалов времени они находятся на различной глубине от поверхности пластины. Верхним пределом устойчивого разрушения покрытия из кварца является 10^7 Вт/м², а из гранита – до $0,5 \cdot 10^7$ Вт/м², а нижним пределом, когда еще наблюдается отрыв частиц под действием термонапряжений сжатия – $0,25 \cdot 10^7$ Вт/м² и $0,05 \cdot 10^7$ Вт/м² 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. Так как расширению во всех других направлениях препятствует реакция непрогретых слоев, то порода начинает свободно расширяться с открытой стороны и в силу своей перенапряженности отделяется и откалывается.

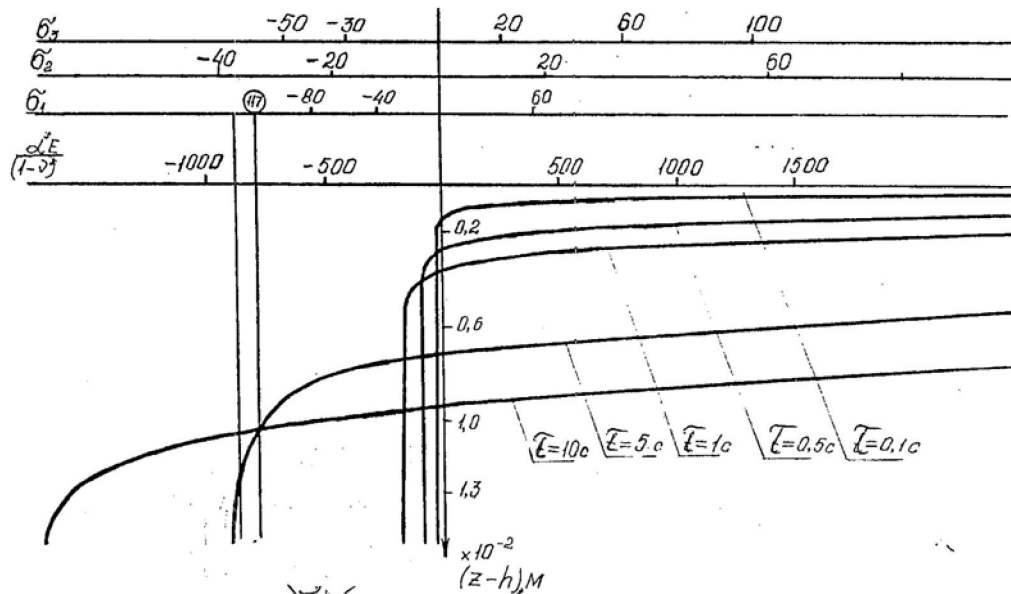


Рисунок 3 - Эпюры напряжений по толщине граничной пластины при различных тепловых потоках и времени их действия: $q_1=0,142 \cdot 10^7$ Вт/м²; $q_2=0,142 \cdot 10^7$ Вт/м²; $q_3=0,075 \cdot 10^7$ Вт/м²; П7 – предел прочности на растяжение: $\sigma = x \cdot 10^5$ Н/м², $E = x \cdot 10^5$ Н/м²

Если полости вакансий могут превращаться в дислокации, то обучаемое покрытие приобретает пластические свойства и не разрушается под действием факела. Таковые все металлы. Этим свойством обладают также и некоторые породы. Проведено тестирование с парогенерирующими металлическими поверхностями нагрева в момент кризиса кипения [2]. Для металлов кристаллы разрушаются при напряжениях до 10^{-5} В. Процесс разрушения состоит из стадий зарождения трещин и их развития. В результате термического воздействия зарождаются микротрещины в области концентраторов напряжений (включения, неоднородности, трещины). Высокие внутренние напряжения так же могут возникать вследствие 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.

На основе проведенных исследований в случае облучения факелом керосино-кислородной горелки пористого покрытия на рабочем участке имеем до $4 \cdot 10^7$ Вт/м², что соответствует q покрытий $0,4 \cdot 10^7$ Вт/м². Механизм разрушения металлов принципиально отличается от механизма разрушения покрытий из горных пород. Несмотря на это, на основе аналогии выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений, что позволяет избежать кризиса кипения в системе охлаждения и обеспечить оптимальный подбор пористых покрытий малой пористости и теплопроводности. В перспективе требуется исследования других пористых природных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Поляев В.М., Генбач А.А. Скорость роста паровых пузырей в пористых структурах // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. №10 – С. 56-61.
- [2] 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.
- [3] Polyayev V., Genbach A. Control of Heat Transfer in a porous cooling System // Second world conference of experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. – 1991. – Dubrovnik, Yugoslavia, 23 – 28, June. – p. 639 – 644.
- [4] Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы // Известия вузов. Энергетика. – 1991. № 12. – с. 97 – 101.
- [5] 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
- [6] Генбач А.Н., Генбач А.А. Капиллярно-пористые системы в промышленности // Деп. рук. ВИНТИ. 1988. №8 (202). С. 181. – (КазНИИНТИ. 1987. №2105).
- [7] Генбач А.А. Двухфазные кипящие потоки в пористых структурах // Деп. рук. ВИНТИ. – 1989. №12 (218). С.178. (КазНИИНТИ). 1989.№2812.
- [8] Генбач А.А., Гнатченко Ю.А. Система охлаждения теплонагруженного элемента детонационного горелочного устройства – камеры сгорания, диффузора и конфузора // Вестник КазНТУ. – Алматы, 2007. №4, (61), июль. –С. 87-91.
- [9] Генбач А.А., Данильченко И. Пористый пароохладитель паровых котлов // Промышленность Казахстана, № 1 (70), 2012. – с. 72 – 75.
- [10] 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.
- [11] Генбач А.А., Исламов Ф.А. Моделирование процесса задевания ротора турбины // Вестник КазНТУ, № 6 (100), 2013. – с. 235 – 240.
- [12] Генбач А.А., Генбач Н.А. Исследование капиллярно-пористых систем в тепловых энергетических установках электростанций // Вестник АУЭС. – 2011. №2 (13). – С. 57-62

А.А. Генбач¹, Д.Ю. Бондарцев²

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

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

ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ЖАСАУ ҒЫЛЫМИ ӘДІСІН ЖЫЛУ-МЕХАНИКАЛЫҚ ЖАБДЫҚТАРЫН ЖЫЛУ ӘДІСТЕРІ МЕН ҚҰРЫЛҒЫЛАР ӘЗІРЛЕУ

Түйін. Электрстанцияларының және ғылыми әдісін құру әдістері мен құрылғылар. Зерттеулер металл жылу ағынын шектеу және ауырып-термикалық ауырлық аралас әрекеттер мен капиллярлық күштердің астында жұмыс істейтін өткізгіш кеуекті құрылымын, сондай-ақ түрлі салқындату құрылғылары электр стансаларын қыздыру, термо-серпімді және эксперименттік деректер проблемаларын шешу негізінде, бу және төмен-кеуектілігі нашар жылу-өткізгіш жабыны металл беттерін қырып механизмі, табиғи минералды БАҚ-(гранит) жасалған, жылу наразылық іс-қимыл және ену тереңдігі уақытына жылу ағынын байланысты анықталған ұқсастығы құбылыстар негізінде. Капиллярлық тері тесігін жүйелер жоғары қарқындылығын, жоғары жылу беру мүмкіндігі, сенімділігін, жинақылығы көрсетеді. есептеулер және эксперименттік нәтижелері бөлшектердің максималды қалыңдығы гранит (0,25 ÷ 0,3)*10-2m жабынды қысу күштерінің әсерінен жұлынатын көрсетеді. штамм қисық - *скрининг ірі жылу ағынының және төмен жемшөп уақыт балқу қисығы және, шағын жылу ағынының және елеулі уақыт аралығында жағдайда үшін 10-2m 0,3-ден артық мөлшерін бөлшектердің жасағы анықтайтын Жер қысу қисықтар. және жаман-жылу материалдар - жақсы бір кеуекті салқындату жүйелерін құруға бағытталған ғылыми-зерттеу.

Тірек сөздер: жылуалмасу, кеуектік құрылым, жылу электрстанция.