

FRI-9.3-1-THPE-03

LIMIT THERMAL FLUXES AND THERMAL STRESSES IN POROUS COATINGS OF A HEAT-ENERGY INSTALLATION

Prof. Alexander Genbach, DSC

Department of Heat Engineering Installations,
Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Kazakhstan
Tel.: +7(705)2089521
E-mail: natalja-genbach@rambler.ru

David Yu. Bondarcev, PhD Student

Department of of Heat and Power Installations,
AUPET, Republic of Kazakhstan
Tel.: +7(701)5323661
E-mail: d.bondartsev@saem.kz

Prof. Iliya K. Iliev, PhD

Department of Heat, Hydraulics and Environmental Engineering,
“Angel Kanchev” Univesity of Ruse, Bulgaria
Phone: +359887306898
E-mail: iki@uni-ruse.bg

***Abstract:** The methods and devices for power plants and the creation of scientific methods have been developed. Investigations of the limiting 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 are carried out. Based on the solution of the problem of thermoelasticity 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 disturbances 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 coatings from granite is $(0,25 \div 0,3) \times 10^{-2}$ m. Sections of compression curves that determine the separation of particles with dimensions greater than $0,3 \times 10^{-2}$ 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-heat-conducting materials.*

***Keywords:** Heat exchange, Porous structure, Voltage, Cooling system, Thermal power plants.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Успехите в използването на капилярно-порести материали в техниката са привлекли много изследователи и изобретатели да създадат на тяхна основа различни инсталации. Като тенденция се очертаваше повишаване на интензивността на топлоотвеждащите системи и форсирането на протичащите в тях процеси. [Поляев В., Генбач А.А., 1990; Поляев В., Генбач А.Н., Генбач АА, 1991; Polyayev V., Genbach A., 1991)]. Използването на порести материали, покрай охладителните системи, позволи създаването на агрегати, в които се решават проблемите с взривобезопасността, охраната на труда и удължения ресурс (Поляев В., Генбач А.Н., Генбач АА, 1991, Поляев В., Генбач А.А., 1991).

Внедряването на оборудване и технологични процеси в енергетиката изисква съобразяване с екологически и икономически критерии. Предлаганите от авторите разработки на капилярно-порести системи ще способстват за подобряването състоянието на околната среда.

Капилярно-порестите системи позволяват: постигането на икономия на горива, суровини, въздух, вода, топлина; повишаването на надеждността на охлаждането и взривобезопасността на работа на оборудването; способстването за високоефективно разрушаване на руди, бетон, метал; намаляването на ниско-температурната корозия на повърхностите; съкращаването на замърсяването на биосферата от отровни газове, прах, топлина; ускоряване решаването на проблемите по продоволствените програми; получаването на голям икономически и социален ефект в областта на охраната на околната среда (Поляев В., Генбач А.А., 1991, Генбач А.Н., Генбач АА, 2011).

Предимства на капилярно-порестите системи са: високата интензивност, висока топлопредаваща способност, надеждност, компактност, простота на изготвяне и експлоатация. Капилярно-порестите системи подобряват режимните и технологични показатели и имат сравнително ниски капитални и експлоатационни разходи (Генбач А.Н., Генбач АА, 1987, Генбач АА, 1989).

Основните области на практическо използване на капилярно-порестите системи за защитени с национални патенти на изобретение (Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А., 1991, Генбач А.Н., Генбач АА, 1987; Генбач АА, 1989; . Генбач А.А., Гнатченко Ю.А., 2007; Генбач А.А., Данильченко И., 2012; Генбач А.А., Олжабаева К.С. 2012; Генбач А.А., Исламов Ф.А., 2013; Генбач А.А., Генбач Н.А., 2011).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Теоретична част

На основата на проведено изследване на капилярно-пореста система са разработени нови технически решения за подобряване на експлоатационните характеристики на топло-енергетическа инсталация, които могат да се използват за големи блокове на ТЕЦ.

Изследвани са капилярно-порести системи с цел използването им в различни елементи на топло-енергетически инсталации. Системите се отличават с преобладаващо гравитационно подаване на течността, а по интензивност на топлопредаването заемат междинно положение между тънкослоестите и порестите изпарители, които имат предимно капилярно подаване на течността (топлинни тръби). Затова такива системи следва да бъдат отделени в отделен клас като топлоотвеждащи системи. Проведените изследвания позволяват да се направят препоръки по избора на топло-студоносител, да се отчете вида на неговата циркулация, да се определи геометрията и материала на апарата и интензификаторите на топлообмена, като се отчетат условията на работа на системата (под налягане или под разреждане), подвеждането и вида на енергията както и ориентацията на системата.

Обобщаването на експерименталните резултати и метода на изчисляване на топло-и масообмена в капилярно-порестите системи са представени в работи [5-8,13].

Изследването на различните фактори, влияещи на топлообмена в капилярно-порестите структури, показват, че особен интерес предизвикват пределните състояния на нагревните повърхности, когато системата е способна да пренася минимални потоци енергия и вещество. Обаче, в този случай е необходимо да знаем стойността на топлинния поток и термичните напрежения с оглед обезпечаване на надеждна и продължителна работа на инсталацията.

Максимален пад на енергията и веществото може да се получи при следните условия: при използване на чиста течност, циркулираща по принудена схема в затворени елиптични топлообменници под налягане в перфорирани и профилирани нагревни повърхности, изработени от неръждаема стомана.

Системите работят с излишък на течност, а наличието на масови сили осигуряват принудено движение на топло-студоносителя е недогриване. Енергията се подвежда към вертикална повърхност по периметъра със свръхзвуков високотемпературен пулсиращ въртящ се факел.

За определянето на пределните топлинни потоци и напрежения се решава задачата за термичната еластичност [2,7,11] при гранични условия от втори род за едномерно уравнение на нестационарна топлопроводност.

Ще разгледаме плоча с дебелина $2h$. Към повърхността $z = +h$, започвайки от момента $\tau = 0$, се подвежда постоянен специфичен топлинен поток q . Долната повърхност $z = -h$ и страничните краища са топлинно изолирани.

Уравнението на топлопроводността с гранични и начални условия могат да се запишат в следния вид:

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

$$\lambda_{ст} \frac{\partial T}{\partial z} = q, z = +h; \quad (2)$$

$$\lambda_{ст} \frac{\partial T}{\partial z} = 0, z = -h. \quad (3)$$

Разпределението на температурата по дебелината зависи от топлофизичните свойства на материала, стойността на топлинния поток и времето на неговото подаване:

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

където $M = \frac{\lambda_{ст}}{h}$; n – цели положителни числа.

Познавайки разпределението на температурата в плочата, определяме термичните напрежения на разпъване и свиване, които възникват в определен момент от времето τ на различна дълбочина от повърхността $\delta_i = (h=z_i)$ при дадената стойност на топлинния поток q , доколкото плочата с променлива температура по дебелината се намира в плоско-напрегнато състояние.

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = -\frac{\alpha E}{(1-\nu)} T\left(\frac{z}{h}; \tau\right) + \frac{1}{(1-\nu)2h} \int_{-h}^{+h} 2'ET\left(\frac{z}{h}; \tau\right) dz, \quad (5)$$

където първият член- представлява напрежение на свиване, а втората, съответно на разтегляне.

Като задаваме пределни стойности на напрежението на свиване и разтегляне за скали (порести покрития от естествена минерална среда) и метал, получаваме зависимостта на топлинния поток, необходим за разрушаването, от времето на подаване и дълбочината на проникване. Освен това, приравнявайки температурите на повърхността на плочата към температурата на топене на скалата и метала, намираме стойностите на специфичните топлинни потоци, необходими за разтопяването на повърхностния слой за различни промеждутъци от времето на тяхното действие [2,7].

Топене на повърхност:

$$q_1 = \frac{T_{пл.}}{\left\{ \frac{M}{2(c\lambda g)_{ст}} \tau + \frac{2}{3M} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\lambda g)_{ст}} \tau\right] \cos n\pi \right\}}, \quad (6)$$

Създаване на пределни напрежения на свиване:

$$q_2 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.св.}}{\alpha E} \frac{\frac{M}{2c\lambda g_{ст}} \tau + \frac{3z^2 + 6z}{12M} - \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4c\lambda g_{ст}} \tau\right] \cos \frac{n\pi}{2} \left(\frac{z}{h} + 1\right)}{\quad} \quad (7)$$

$$q_3 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.раст.}}{\alpha E} \frac{\frac{\alpha E}{M} \tau}{\frac{M}{2(c\lambda g)_{ст}} \tau} \quad (8)$$

Зависимостта на q_1, q_2, q_3 от времето τ при фиксирани стойности на δ за покритието, или дълбочината на проникване на температурните възмущения за метал, се изчислява и е приложимо към плоча, направена от кварц, гранит и метала (мед и неръждаема стомана).

Във формулите са приети следните означения: q – специфичен топлинен поток, W/m^2 ; g – плътност, kg/m^3 ; z – координата, m ; T, t – температура, K ; τ – време, s ; δ – дебелина, m ; C – специфичен топлинен капацитет, $kJ/kg.K$; λ – коефициент на топлопроводност, $W/m.K$; G – напрежение (N/m^2); α – коефициент на линейно разтегляне, K^{-1} ; E – модул на Юнг, N/m^2 ; ν – коефициент на Пуасон; a – коефициент на температуропроводност, m^2/s ; $кр.$ –

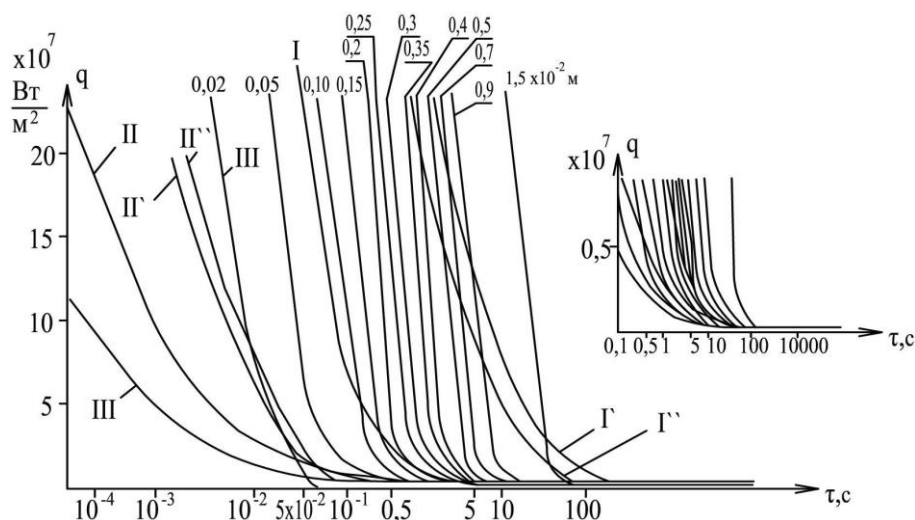
критически (пределен); пр. св. – пределно състояние от силите на свиване; пр. раст. – пределно състояние от силите на разтегляне.

Експериментална част

Резултатите от изчисленията са представени на фигури 1-3. Максималната дебелина на частиците, откъсващи се под действието на силите на свиване за покрития от гранит е $(0,25-0,3) \times 10^{-2} \text{ m}$, което добре съвпада с резултатите, получени от скоростно кинонемане [13]. Участъците от кривите на свиване, определящи откъсването на частиците с размери $\delta > 0,3 \times 10^{-2} \text{ m}$ за големи топлинни потоци и малки τ , се екранират с кривата на топене, а случай на малки топлинни потоци и значителни интервали от време – с кривата на разтегляне.

Взаимовръзката между напрежението на свиване и разтегляне представляват епюри на напрежението в пластината за различни интервали от време от началото на разглеждания процес.

При малки τ , от порядъка 10^{-1} s , предизвикват само напрежения на свиване. Започвайки от $\tau \approx 1 \text{ s}$, в някаква област $\Delta (h-z_i)$ до $0,3 \times 10^{-2} \text{ m}$, напрежението на свиване преминава в напрежение на разтегляне за доста кратък промеждутък от време, при това за различни интервали от време те се намират на различна дълбочина от от повърхността на пластината. Горния предел на устойчиво разрушаване на покритието от кварц е 10^7 W/m^2 , а из гранита – до $0,5 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, а долния предел, когато още се наблюдава откъсване на частици под действието на термонапрежението на свиване – $0,25 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ и $0,05 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, съответствено. Разрушението на анизотропната среда под действието на насочено нагряване основано на неравномерно разширение на нейните съставящи (кристали). За нагрявания слой руда покритието се увеличава в обема, започва да оказва налягане на съседните по малко нагreti слоеве. Понеже разширението във всички ненагreti слоеве пречатства реакцията на непрогретите слоеве, то рудата започва свободно да се разширява откъм откритата страна и в сила на нейната пренапрегнатост се отделя от разпоителя.

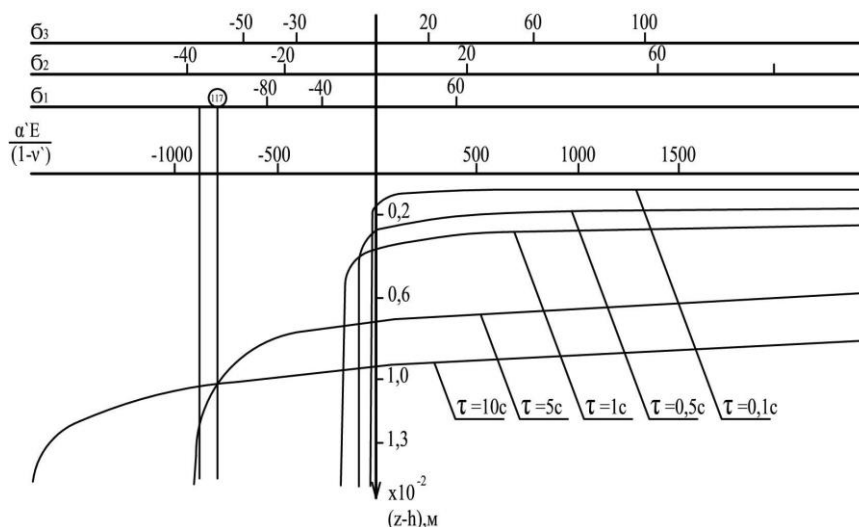


Фиг. 1. Зависимост на топлинните потоци, предизвикващи напрежения на свиване III гранитно покритие в зависимост от времето на действие τ за различни дебелини δ на откъсващите се частици: I – напрежение на разтегляне, достатъчни за разрушаване (I', I'' – мед и неръждаема стомана, $h = 0,1 \times 10^{-3} \text{ m}$); II – разтопяване на повърхността (II', II'' – мед и неръждаема стомана, $h = 0,1 \times 10^{-3} \text{ m}$)

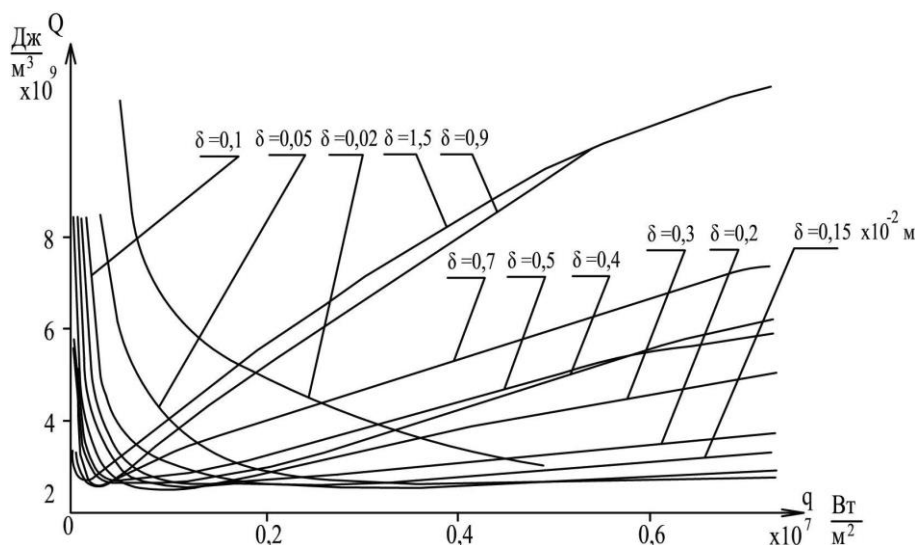
Ако кухините на ваканциите могат да се превръщат в дислокации, то облъчаното покритие придобива пластични свойства и не се разрушава под действието на факела. Такова поведение имат всички метали както и някои руди. Проведен е тест с

парогенериращи метални нагревни повърхности и момента на кризис на кипене [2]. При металите кристалите се разрушават при направления до 10^{-5} В. Процесът на разрушение включва стадий на зараждане на цепнатини и тяхното развитие.

В резултат на термичното въздействие на зараждащите се микропукнатини в областта на концентраторите на напрежение (включвания, нееднородности, цепнатини). Високите вътрешни напрежения могат да възникват вследствие на нееднородното протичане на пластичната деформация, след което възниква крехко разрушение. Пластичната деформация се разглежда като първопричина за първичното разрушение независимо че тя може да задържи ръста на цепнатините. В основата на разрушаването, от една страна, лежат разкъсванията на връзките, обуславяни от топлинни флукуации, а от друга страна-разрушението е кинетически термоактивационен процес, в основата на който стои преместването на ваканциите към цепнатините, чийто ръст определя кинетиката на разрушението.



Фиг. 2. Епюри на напрежението по дебелината на граничната плоча при различни топлинни потоци и време на действие: $q_1 = 0,142 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; $q_2 = 0,142 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; $q_3 = 0,075 \times 10^7 \text{ W/m}^2$; Π_7 – предел на твърдост на разтегляне: $\sigma = \times 10^5 \text{ N/m}^2$, $E = \times 10^5 \text{ NH/m}^2$.



Фиг. 3. Изменение на специфичната енергия на разрушение на гранитно покритие в зависимост от q за различни δ . $Q = q \frac{\tau}{\delta}$

ИЗВОДИ

На основата на проведените изследвания в случай на облъчване с факел на керосиново-кислородна горелка на поресто покритие на работния участък имаме q до $4 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, което съответства на $q = 0,4 \times 10^7 \text{ W/m}^2$.

Механизмът на разрушаване на металите се различава принципно от механизма на разрушаване на покритията от руда. Независимо от това, на основата на аналогията са получени зависимости на топлинните потоци от времето на тяхното действие и дълбочината на проникване на температурните въздействия, което позволява да се избегне кризата на кипене в системата на охлаждане и да се осигури оптимален подбор от порести покрития с макар поръзност и топлопроводност. В перспектива се изискват изследвания на други порести материали.

REFERENCES

Genbach, A. N., Genbach, A. A. (1988). *Kapillyarno-poristyye sistemy v promyshlennosti*. Dep. ruk. VINITI, №8 (202). S. 181. – (KazNIINTI. 1987. №2105).

Genbach, A. A. (1989). *Dvukhfaznyye kipyashchiye potoki v poristyykh strukturakh*. Dep. ruk. VINITI, №12 (218). S.178. (KazNIINTI).

Genbach, A. A., Gnatchenko, Yu. A. (2007). *Sistema okhlazhdeniya teplonagruzhennogo elementa detonatsionnogo gorelochnogo ustroystva – kamery sgoraniya, diffuzora i konfuzora*. Vestnik KazNTU. – Almaty, №4, (61), iyul'. –S. 87-91.

Genbach, A. A., Danil'chenko, I. (2012). *Poristy parookhladitel' parovykh kotlov*. Promyshlennost' Kazakhstana, № 1 (70), s. 72 – 75.

Genbach, A. A., Olzhabayevam K. S. (2012). *Vizualizatsiya termicheskogo vozdeystviya na poristoy material v TEU ES*. Vestnik Natsional'noy inzhenernoy akademii RK, № 3 (45), s. 63 – 67.

Genbach, A. A., Islamov, F. A. (2013). *Modelirovaniye protsessa zadevaniya rotora turbiny*. Vestnik KazNTU, № 6 (100), s. 235 – 240.

Genbach, A. A., Genbach, N. A. (2011). *Issledovaniye kapillyarno-poristyykh sistem v teplovykh energeticheskikh ustanovkakh elektrostantsiy*. Vestnik AUES, №2 (13). – S. 57-62.

Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu. (2017). *Razrabotka turbinnoy tekhniki elektrostantsiy i nauchnaya metodika ikh sozdaniya*. Vestnik NAN RK, №5, S. 45-54.

Polyayev, V. M., Genbach, A. A. (1990). *Skorost' rosta parovykh puzyrey v poristyykh strukturakh*. Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye, №10 – S. 56-61.

Polyayev, V. M., Genbach, A. N., Genbach, A. A. *Predel'nyye sostoyaniya poverkhnosti pri termicheskoy vozdeystvii*. Teplofizika vysokikh temperatur. – 1991. T.29, № 5. – S. 923 - 934.

Polyayev, V., Genbach, A. (1991). *Control of Heat Transfer in a porous cooling System*. Second world conference of experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics, Dubrovnik, Yugoslavia, 23 – 28, June. – p. 639 – 644.

Polyayev, V. M., Genbach, A. A. *Oblasti primeneniya poristoy sistemy*. Izvestiya vuzov. Energetika. – 1991. № 12. – s. 97 – 101.

Polyayev, V. M., Genbach, A. A. (1992). *Upravleniye teploobmenov v poristoy structure*. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika i transport, T 38. №6 – s 105-110.