

ISSN 1991-3494

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Ш Ы С Ы

---

---

## ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## THE BULLETIN

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

1944 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С 1944 ГОДА  
PUBLISHED SINCE 1944

3

---

---

АЛМАТЫ  
АЛМАТЫ  
ALMATY

2016

МАМЫР  
МАЙ  
MAY

Б а с р е д а к т о р

ҚР ҰҒА академигі

**М. Ж. Жұрынов**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Айтхожина Н.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байпақов К.М.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Байтулин И.О.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Берсімбаев Р.И.**; хим. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Газалиев А.М.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Дүйсенбеков З.Д.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Елешев Р.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Қалменов Т.Ш.**; фил. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА академигі **Нысанбаев А.Н.**; экон. ғ. докторы, проф., ҰҒА академигі **Сатубалдин С.С.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбжанов Х.М.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішев М.Е.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Әбішева З.С.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Абсадықов Б.Н.** (бас редактордың орынбасары); а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Баймұқанов Д.А.**; тарих ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Байтанаев Б.А.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Давлетов А.Е.**; физ.-мат. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Қалимолдаев М.Н.**; геогр. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Медеу А.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Мырхалықов Ж.У.**; биол. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Огарь Н.П.**; техн. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Таткеева Г.Г.**; а.-ш. ғ. докторы, проф., ҚР ҰҒА корр. мүшесі **Үмбетаев И.**

Р е д а к ц и я к е ñ е с і:

Ресей ҒА академигі **Велихов Е.П.** (Ресей); Әзірбайжан ҰҒА академигі **Гашимзаде Ф.** (Әзірбайжан); Украинаның ҰҒА академигі **Гончарук В.В.** (Украина); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Джрбашян Р.Т.** (Армения); Ресей ҒА академигі **Лаверов Н.П.** (Ресей); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Москаленко С.** (Молдова); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Рудик В.** (Молдова); Армения Республикасының ҰҒА академигі **Сагян А.С.** (Армения); Молдова Республикасының ҰҒА академигі **Тодераш И.** (Молдова); Тәжікстан Республикасының ҰҒА академигі **Якубова М.М.** (Тәжікстан); Молдова Республикасының ҰҒА корр. мүшесі **Лупашку Ф.** (Молдова); техн. ғ. докторы, профессор **Абиев Р.Ш.** (Ресей); техн. ғ. докторы, профессор **Аврамов К.В.** (Украина); мед. ғ. докторы, профессор **Юрген Аппель** (Германия); мед. ғ. докторы, профессор **Иозеф Банас** (Польша); техн. ғ. докторы, профессор **Гарабаджиу** (Ресей); доктор PhD, профессор **Ивахненко О.П.** (Ұлыбритания); хим. ғ. докторы, профессор **Изабелла Новак** (Польша); хим. ғ. докторы, профессор **Полещук О.Х.** (Ресей); хим. ғ. докторы, профессор **Поняев А.И.** (Ресей); профессор **Мохд Хасан Селамат** (Малайзия); техн. ғ. докторы, профессор **Хрипунов Г.С.** (Украина)

Главный редактор

академик НАН РК

**М. Ж. Журинов**

Редакционная коллегия:

доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Н.А. Айтхожина**; доктор ист. наук, проф., академик НАН РК **К.М. Байпаков**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **И.О. Байтулин**; доктор биол. наук, проф., академик НАН РК **Р.И. Берсимбаев**; доктор хим. наук, проф., академик НАН РК **А.М. Газалиев**; доктор с.-х. наук, проф., академик НАН РК **З.Д. Дюсенбеков**; доктор сельскохоз. наук, проф., академик НАН РК **Р.Е. Елешев**; доктор физ.-мат. наук, проф., академик НАН РК **Т.Ш. Кальменов**; доктор фил. наук, проф., академик НАН РК **А.Н. Нысанбаев**; доктор экон. наук, проф., академик НАН РК **С.С. Сатубалдин**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Х.М. Абжанов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Е. Абишев**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **З.С. Абишева**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.Н. Абсадыков** (заместитель главного редактора); доктор с.-х. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Д.А. Баймуканов**; доктор ист. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Б.А. Байтанаев**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А.Е. Давлетов**; доктор физ.-мат. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **М.Н. Калимолдаев**; доктор геогр. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **А. Медеу**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Ж.У. Мырхалыков**; доктор биол. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Н.П. Огарь**; доктор техн. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **Г.Г. Таткеева**; доктор сельскохоз. наук, проф., чл.-корр. НАН РК **И. Умбетаев**

Редакционный совет:

академик РАН **Е.П. Велихов** (Россия); академик НАН Азербайджанской Республики **Ф. Гашимзаде** (Азербайджан); академик НАН Украины **В.В. Гончарук** (Украина); академик НАН Республики Армения **Р.Т. Джрбашян** (Армения); академик РАН **Н.П. Лаверов** (Россия); академик НАН Республики Молдова **С. Москаленко** (Молдова); академик НАН Республики Молдова **В. Рудик** (Молдова); академик НАН Республики Армения **А.С. Сагиян** (Армения); академик НАН Республики Молдова **И. Тодераш** (Молдова); академик НАН Республики Таджикистан **М.М. Якубова** (Таджикистан); член-корреспондент НАН Республики Молдова **Ф. Лупашку** (Молдова); д.т.н., профессор **Р.Ш. Абиев** (Россия); д.т.н., профессор **К.В. Аврамов** (Украина); д.м.н., профессор **Юрген Аппель** (Германия); д.м.н., профессор **Иозеф Банас** (Польша); д.т.н., профессор **А.В. Гарабаджиу** (Россия); доктор PhD, профессор **О.П. Ивахненко** (Великобритания); д.х.н., профессор **Изабелла Новак** (Польша); д.х.н., профессор **О.Х. Полещук** (Россия); д.х.н., профессор **А.И. Поняев** (Россия); профессор **Моход Хасан Селамат** (Малайзия); д.т.н., профессор **Г.С. Хрипунов** (Украина)

«Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан». ISSN 1991-3494

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5551-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год

Тираж: 2000 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел. 272-13-19, 272-13-18.

www: nauka-nanrk.kz, bulletin-science.kz

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2016

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75

Editor in chief

**M. Zh. Zhurinov**,  
academician of NAS RK

Editorial board:

**N.A. Aitkhozhina**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **K.M. Baipakov**, dr. hist. sc., prof., academician of NAS RK; **I.O. Baitulin**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **R.I. Bersimbayev**, dr. biol. sc., prof., academician of NAS RK; **A.M. Gazaliyev**, dr. chem. sc., prof., academician of NAS RK; **Z.D. Dyusenbekov**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **R.Ye. Yeleshev**, dr. agr. sc., prof., academician of NAS RK; **T.Sh. Kalmenov**, dr. phys. math. sc., prof., academician of NAS RK; **A.N. Nysanbayev**, dr. phil. sc., prof., academician of NAS RK; **S.S. Satubaldin**, dr. econ. sc., prof., academician of NAS RK; **Kh.M. Abzhanov**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.Ye. Abishev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Z.S. Abisheva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.N. Absadykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK (deputy editor); **D.A. Baimukanov**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **B.A. Baytanayev**, dr. hist. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A.Ye. Davletov**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **M.N. Kalimoldayev**, dr. phys. math. sc., prof., corr. member of NAS RK; **A. Medeu**, dr. geogr. sc., prof., corr. member of NAS RK; **Zh.U. Myrkhalykov**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **N.P. Ogar**, dr. biol. sc., prof., corr. member of NAS RK; **G.G. Tatkeeva**, dr. eng. sc., prof., corr. member of NAS RK; **I. Umbetayev**, dr. agr. sc., prof., corr. member of NAS RK

Editorial staff:

**E.P. Velikhov**, RAS academician (Russia); **F. Gashimzade**, NAS Azerbaijan academician (Azerbaijan); **V.V. Goncharuk**, NAS Ukraine academician (Ukraine); **R.T. Dzhrbashian**, NAS Armenia academician (Armenia); **N.P. Laverov**, RAS academician (Russia); **S.Moskalenko**, NAS Moldova academician (Moldova); **V. Rudic**, NAS Moldova academician (Moldova); **A.S. Sagiyan**, NAS Armenia academician (Armenia); **I. Toderas**, NAS Moldova academician (Moldova); **M. Yakubova**, NAS Tajikistan academician (Tajikistan); **F. Lupaşcu**, NAS Moldova corr. member (Moldova); **R.Sh. Abiyev**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **K.V. Avramov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine); **Jürgen Appel**, dr.med.sc., prof. (Germany); **Joseph Banas**, dr.med.sc., prof. (Poland); **A.V. Garabadzhiu**, dr.eng.sc., prof. (Russia); **O.P. Ivakhnenko**, PhD, prof. (UK); **Isabella Nowak**, dr.chem.sc., prof. (Poland); **O.Kh. Poleshchuk**, chem.sc., prof. (Russia); **A.I. Ponyaev**, dr.chem.sc., prof. (Russia); **Mohd Hassan Selamat**, prof. (Malaysia); **G.S. Khripunov**, dr.eng.sc., prof. (Ukraine)

**Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.**

**ISSN 1991-3494**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of Information and Archives of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan N 5551-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 2000 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,

<http://nauka-nanrk.kz/>, <http://bulletin-science.kz>

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2016

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

## **STUDY OF FRAGILE CAPILLARY-POROUS COVERINGS IN POWER INSTALLATIONS**

**A. A. Genbach, N. O. Jamankulova**

Almaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: dnellya@mail.ru

**Key words:** capillary-porous coverings; vapor bubble; limit state; compressive and tensile stresses; limiting heat flows.

**Abstract.** To carry out the high-technological processes in heat power installations the fragile capillary-porous coverings up to a limiting condition of heat exchange surface were researched. The coverings made of metallic materials (copper and stainless steel) and of natural mineral media (coverings of quartz, granite and teschenit) were studied. A model of water steam formation of the coolant in natural and artificial capillary-porous formations to conditions of limit state of the surface under the joint action of mass and capillary forces was developed. The fragile coverings in the processes of heat transfer with high thermal stresses are analyzed. The specific heat flows and the corresponding to them thermal destructive stresses of compression and stretching are determined by solving problem of thermal elasticity for capillary-porous media containing steam bubbles. The thickness of the covering particles coming off at the time of thermal destruction is clarified. The region of transition from compressive stress to the tensile stress at the time of the limit state of the porous mineral medium is defined, in which the destruction of the compressive thermal stresses occur in more favorable conditions, quickly and in very small volumes. The study is designed for heat power installations containing various porous coverings of mineral medium.

УДК 621.165.001.1

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХРУПКИХ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ПОКРЫТИЙ В ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ**

**А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова**

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан

**Ключевые слова:** капиллярно-пористые покрытия; паровой пузырь; предельное состояние; напряжения сжатия и растяжения; предельные тепловые потоки.

**Аннотация.** Для проведения высокотехнологичных процессов в теплоэнергоустановках исследованы хрупкие капиллярно-пористые покрытия вплоть до наступления предельного состояния поверхности теплообмена. Изучались покрытия, выполненные из металлических материалов (медь и нержавеющая сталь) и естественных природных минеральных сред (покрытия из кварца, гранита и тешенита). Разработана модель для парообразования охладителя в естественных и искусственных капиллярно-пористых образованиях для условий предельного состояния поверхности при совместном действии капиллярных и массовых сил. Анализируются хрупкие покрытия при высокотемпературных процессах теплопередачи. Определены удельные тепловые потоки и отвечающие им термические разрушающие напряжения сжатия и растяжения путем решения термоупругостной задачи для капиллярно-пористых сред, содержащих паровые пузырьки. Выяснены толщины отрывающихся частиц покрытия в момент терморазрушения. Установлена область перехода напряжения сжатия в напряжения растяжения в момент предельного состояния пористой минеральной среды, в которой разрушение от сжимающих термонапряжений происходит в более благоприятных условиях мгновенно и в ничтожно малых объемах. Исследование предназначено для теплоэнергоустановок, содержащих различные пористые покрытия из минеральных сред.

Проведение высокотеплонапряженных процессов связано с возникновением предельного состояния обогреваемой поверхности. В одном случае производится целенаправленное разрушение материала, например, с помощью огнеструйных горелок ракетного типа [1, 2], из сопел которых истекают сверхзвуковые высокотемпературные потоки, а в другом – требуется создание охлаждающей системы самих сопел и камер сгорания во избежание кризиса теплообмена и разрушения парогенерирующей поверхности, покрытой пористой структурой [3-11].

Представляет интерес исследовать капиллярно-пористые структуры, выполненные из природных материалов в виде естественных минеральных сред. Такие поверхности начинают использоваться в крупном производстве энергетических агрегатов (лабиринтовые уплотнения, лопатки газовых турбин) [4, 7, 9].

Разработаем модель зарождения паровых пузырьков в ячейках капиллярно-пористой структуры (рисунок 1).

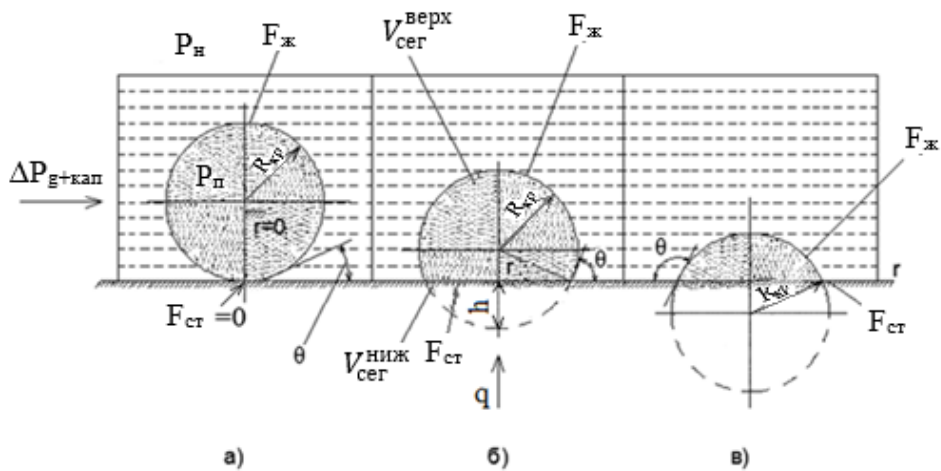


Рисунок 1 – Вариант зарождения парового пузыря на парогенерирующей поверхности в ячейках пористой структуры:  
 а) взрывообразное появление парового зародыша ( $t = 10^{-8} \div 10^{-6}$  с);  
 б) жизнеспособный паровый зародыш, имеющий "сухое" пятно в основании ( $t = 10^{-2} \div 1$  с);  
 в) "гибнущий" паровый зародыш ( $t = 1 \div 10$  с)

Принятые обозначения:  $P_n, P_{п}$  – давление насыщения и пара в пузырьке;  $\Delta P_{г+кап}$  – действующий напор, создаваемый гравитационными и капиллярными силами;  $q$  – тепловая нагрузка;  $r, R_{кр}$  – координата и критический радиус;  $F_{ж}, F_{ст}$  – поверхность соприкосновения с жидкостью и стенкой;  $\theta$  – динамический угол смачивания;  $V$  – объем сегмента верхней и нижней части пузыря.

Для рисунка 1 можно записать кубическое уравнение [1]:

$$\cos^3 \theta - 3 \cos^2 \theta - 3 \cos \theta + c = 0,$$

где  $c = 1 + 8 (R_{кр} / R)^2$ ,  $R$  – текущий радиус пузыря.

Решением уравнения будет:

$$\cos \theta = y + 1, \quad \tilde{P} = -6, \quad \tilde{q} = -4, \quad \tilde{Q} = -4,$$

при температурном напоре  $\Delta T = \Delta T_{max}$ ,  $c = c_{min} = 1$ .

Поскольку  $\tilde{Q} < 0$ , принимаем тригонометрическое решение:

$$y = -2\sqrt{-\tilde{P}/3} \cos\left(\frac{\tilde{\alpha}}{3} + \frac{2}{3}\pi\right),$$

где  $\cos \tilde{\alpha} = \tilde{q} / 2\sqrt{-(\tilde{P}/3)^3} = 0,707$ ,  $\tilde{\alpha} = 45$  градусов.

Тогда  $y = -0,73$  и угол  $\theta = 74^\circ 18'$ .

Аналогичная процедура при  $\Delta T = \Delta T_{min}$  дает угол  $\theta = 75^\circ 42'$ .

Значения величин  $\theta$ , незначительно отличаются от средней величины  $\tilde{\theta}$  [8], принятой в модели микрослоевого роста парового пузыря ( $\tilde{\theta} = 80^\circ$ ), что, видимо, можно объяснить неучетом формы пузыря.

Для определения предельного состояния среды согласно модели (рисунок 1) рассмотрим решение задачи термоупругости на примере материала, выполненного из естественной капиллярно-пористой структуры (горной породы) и металлической парогенерирующей поверхности.

Для термического разрушения пористой поверхности и металлической стенки оценим влияние величины удельного теплового потока  $q$ , подводимого к поверхности  $F_{ст}$ , и времени  $t$  воздействия его на создание разрушающих напряжений, также для структуры – гранулометрический состав шелухи  $\delta_i$ , а для металла – глубины проникновения температурного возмущения, (рисунок 1).

В некоторых работах решающая роль отводится термическим напряжениям растяжения, так как значение предела прочности структуры на сжатие в 10 и более раз выше предела прочности на растяжение, а в металлической стенке – в несколько раз.

Считается, растягивающие напряжения вызывают лишь растрескивание структуры и не определяют шелушение ее, т.е. они не будут решающими для термического разрушения, а основными разрушающими напряжениями являются сдвиговые.

Однако при возрастании температуры покрытия за очень короткий промежуток времени динамические эффекты становятся весьма значительными, напряжения сжатия достигают больших значений, часто в несколько раз превышающих предел прочности материала на сжатие. Поэтому необходимо учесть в механизме термического разрушения пористых покрытий эти напряжения. Необходимо выяснить, какой вид напряжения достигает раньше своих предельных значений для подводимых тепловых потоков.

Рассмотрим свободную со всех сторон пластину толщиной  $2h$ . К поверхности  $z=+h$ , начиная с момента  $t = 0$ , подводится постоянный удельный тепловой поток  $q = c$ . Нижняя поверхность и боковые края пластины считаются теплоизолированными. Считаем, что тепловой поток  $q$  поступает в паровой пузырь через микрослой жидкости, находящийся в основании пузыря под углом  $\theta$ , и через “сухое” пятно радиусом  $r$ .

Уравнение теплопроводности с граничными и начальными условиями запишется в виде:

$$\begin{aligned} a_{cm} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{\partial T}{\partial t}, \\ T &= 0, \quad t < 0, \\ \lambda_{cm} \frac{\partial T}{\partial z} &= q \quad z = +h, \\ \lambda_{cm} \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 \quad z = -h, \end{aligned}$$

где  $a_{cm}$  – коэффициент температуропроводности материала;  $\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности материала.

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

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

где  $c_{ст}$  – теплоемкость материала;  $\rho_{ст}$  – плотность материала;  $n$  – целые положительные числа;  $\mu = \lambda_{cm}/h$  – параметр.

Зная распределение температуры в пластине, находим термические напряжения растяжения и сжатия, возникающее в некоторый момент времени  $t$  на различной глубине от поверхности  $\delta_i = (h-z_i)$  при данном значении теплового потока  $q = c$ . Пластина с переменной по толщине температурой находится в плоско напряженном состоянии. Напряжения  $\sigma$  определяются как

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

где первый член – составляющая напряжения сжатия, а второй – растяжения;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент поперечного сжатия.

Произведение ( $\alpha \times E$ ) не зависит от температуры и выражение для напряжения растяжения упрощается.

Задаваясь предельными значениями напряжения сжатия, растяжения для каждой данной породы покрытия и металла, получаем функциональную зависимость теплового потока  $q_i$ , необходимого для разрушения, от времени его подачи и глубины проникновения. Кроме, того приравнивая температуры на поверхности пластины к температуре плавления породы покрытия и металла, находим значения удельных тепловых потоков, необходимых для плавления поверхностного слоя за различный промежуток времени их действия. Таким образом, получим в каждом конкретном случае функциональные зависимости теплового потока от времени воздействия его на поверхность:

– плавление поверхности пластины при температуре  $T_{пл}$

$$q_1 = T_{пл} / \left\{ \frac{\mu}{2(c\rho\lambda)_{СТ}} t + \frac{2}{3\mu} - \frac{4}{\pi^2 \mu} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp[-(n\pi\mu)^2 t / 4(c\rho\lambda)_{СТ}] \cos n\pi \right\};$$

– создание предельных напряжений сжатия

$$q_2 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.сж}}{\alpha E} / \left\{ \frac{\mu}{2(c\rho\lambda)_{СТ}} t + \frac{3z^2/h^2 + 6z/h - 1}{12\mu} - \frac{4}{\pi^2 \mu} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp[-(n\pi\mu)^2 t / 4(c\rho\lambda)_{СТ}] \cos \left[ \frac{n\pi}{2} \left( \frac{z}{h} + 1 \right) \right] \right\};$$

– создание предельных напряжений растяжения  $\sigma_{пр.раст.}$

$$q_3 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.раст.}}{\alpha E} / \frac{\mu}{2(c\rho\lambda)_{СТ}} t.$$

Функциональные зависимости величин  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  от времени при фиксированных значениях размера частиц для породы покрытий, либо глубины проникновения температурных возмущений для металла, рассчитывались на ПК применительно к пластинам, выполненных из кварца, гранита, тешенита и металла. Термомеханические характеристики породы покрытий и металлов сведены в таблицу.

Термомеханические свойства исследуемых материалов

Материал	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> $\times 10^3$	$\alpha$ , 1/К $\times 10^{-5}$	$C$ , Дж/кг·К	$\lambda$ , Вт/м·К	$T_{пл}$ , °С	$\nu$	$E$ , Н/м <sup>2</sup> $\times 10^{10}$	$\sigma_{пр.раст.}$ , Н/м <sup>2</sup> $\times 10^6$	$\sigma_{пр.сж.}$ , Н/м <sup>2</sup> $\times 10^6$
Кварц	2,65	1,56	1172	10,8	1788	0,17	7,3	3,92	78,5
Гранит	2,58	1,16	921	3,15	1230	0,22	2,8	20,5	260
Тешенит	2,7	5,44	937	1,44	1140	0,27	4,97	7,6	159
Медь (Cu+0,56 Fe)	8,9	1,6	390	390	1100	0,34	11,8	220	1570
Нержавеющая сталь 1X18Н9Т	7,8	1,1	516	16	1300	0,35	21,6	700	2500

Результаты расчетов представлены на рисунке 2 и 3. В случае кварцевого покрытия пластины тепловые потоки подсчитаны для весьма широких интервалов времени ( $10^{-8} \div 10^3$ ) с. Нижний предел этого интервала ( $10^{-8}$ ) с – время релаксации.

Из рисунка 2 видно, что для интервалов времени порядка ( $10^{-8} \div 10^{-3}$ ) с соотношения для  $q_1$  и  $q_2$ , представляющие кривые гиперболического типа в координатах ( $q$ ;  $t$ ), теряют физический смысл, так как в данной задаче за основу принималось уравнение теплопроводности. Для учета микропроцессов в него необходимо добавить член типа  $K \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$ . Поскольку терморазрушение – макропроцесс, принимаем его протекающим за время ( $5 \times 10^{-8} \div 10^3$ ) с. Изменение тепловых потоков  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  от времени на пластинах, выполненных из гранитного покрытия, приведены на рисунке 2.



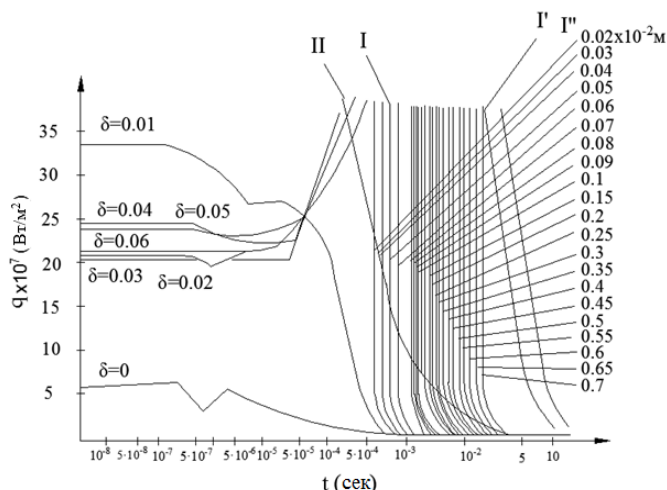


Рисунок 2 – Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия кварцевого покрытия в зависимости от времени действия для различной толщины отрывающихся частиц: I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения; II – оплавление поверхности; I' – медь,  $h = 0,1 \times 10^{-3}$  м, I'' – нержавеющая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

При условии разрушения покрытия только сжатием получен ряд кривых, каждая из которых соответствует определенной толщине отрывающейся частицы. Для каждого значения теплового потока и некоторого интервала времени получаем частицы с толщиной  $\delta_i$ . Максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия, для покрытий из кварца и гранита составляет  $(0,25-0,3) \times 10^{-2}$  м.

Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с толщинами  $\delta > 0,3 \times 10^{-2}$  м для больших тепловых потоков и малых  $t$ , экранируются кривой плавления II, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени – кривой растяжения. Причем, кривая плавления поверхности кварцевого покрытия проходит значительно выше, чем таковая у гранитного, что объясняет устойчивое хрупкое разрушение покрытий из кварца и кварцсодержащих пород.

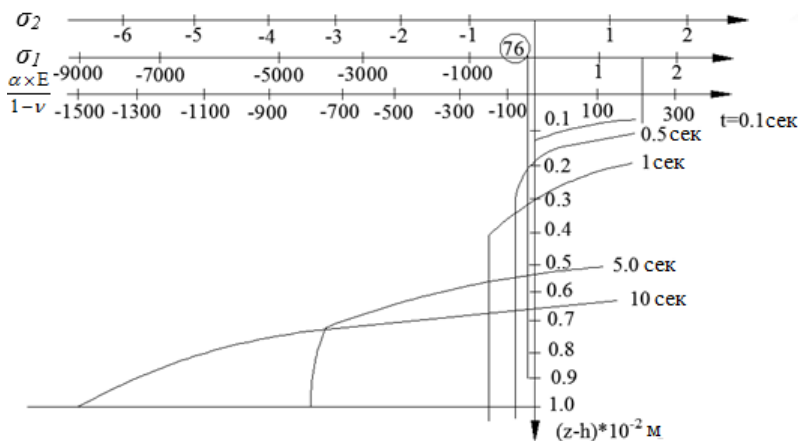


Рисунок 3 – Эпюры напряжений по толщине тешенитного покрытия пластины при различных  $q$  и  $t$ :  $q_1 = 6,6 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $q_2 = 1 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>; 76 – предел прочности на растяжение;  $\sigma, \times 10^5$  Н/м<sup>2</sup>;  $E, \times 10^5$  Н/м<sup>2</sup>

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения можно проследить на рисунке 3, которые представляют собой эпюры напряжений внутри пластины из тешенитного покрытия для различных интервалов времени от начала рассматриваемого процесса. При малых  $t$ , порядка  $10^{-1}$  с, возникают только напряжения сжатия. Начиная с  $t \sim 1$  с, в некоторой области  $\Delta (h - z_i)$  до  $0,3 \times 10^{-2}$  м напряжения сжатия переходят в напряжения растяжения за весьма короткий промежуток времени, причем для различных интервалов они находятся на различной глубине от поверхности пластины. В области перехода напряжения сжатия в напряжение растяжения будут, по-видимому, наблюдаться

наибольшие напряжения сдвига слоев поверхности породы. Во времени сдвиговые напряжения достигают предельных значений позже разрушающих напряжений сжатия и, очевидно, раньше максимальных напряжений растяжения.

С увеличением удельного теплового потока в нагреваемом слое, и, следовательно, уменьшением времени нагрева, растет роль напряжений сжатия. Несмотря на высокую сопротивляемость сжатию, разрушение от сжимающих термонапряжений происходит в более благоприятных условиях мгновенно и в ничтожно малых объемах.

Кривая плавления поверхности покрытия из кварца проходит значительно выше, чем у гранита и тем более, чем у тешенита, что объясняет устойчивое хрупкое разрушение кварц-содержащих структур.

**Выводы.** Разрушение естественных покрытий под действием сил сжатия наступает во времени значительно раньше, чем сил растяжения. Вероятное разрушение будет происходить под действием сил сжатия и сдвига. Интервалы теплового потока, в пределах которых происходит такое разрушение, различны для покрытий из кварца ( $q_{max} = 7 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{min} = 8 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>) и для гранита ( $q_{max} = 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{min} = 21 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>).

Каждой толщине  $\delta_i$  отрывающейся частицы под действием сил сжатия соответствуют свои предельные значения тепловых потоков, которые находятся в пределах приведенных интервалов.

Для неохлаждаемой металлической поверхности величины  $q_{min} = 1 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и в случае пористой системы охлаждения, работающей при комбинированном действии капиллярных и массовых сил, величина  $q_{max} = 1 \times 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> [6].

Максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия, для покрытий из гранита, кварца и тешенита составляет  $(0,25 - 0,3) \times 10^{-2}$  м.

Время отрыва частиц из тешенитного покрытия, определенное скоростной киносъемкой [2], составляет меньше 0,5 с в зависимости от подводимого теплового потока, что согласуется с приведенными данными на рис. 3, когда  $t_{min} \geq 0,1$  с.

#### 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. Предельное состояние поверхности при термическом воздействии // ТВТ. – 1991. – Т. 29, № 5. – С. 923-934.
- [3] Polyayev V., Genbatch A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System // Second world conference on 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 теплообменом в пористых структурах // Известия Российской академии наук. Энергетика и транспорт. – 1992. – Т. 38, № 6. – С. 105-110.
- [6] Поляев В.М., Генбач А.А. Теплообмен в пористой системе, работающей при совместном действии капиллярных и гравитационных сил // Теплоэнергетика. – 1993. – № 7. – С. 55-58.
- [7] Генбач А.А., Кульбакина Н.В. Пылеподавление и пылеулавливание с помощью циркуляционного пеногенератора с пористой структурой // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 2010. – № 4. – С. 62-65.
- [8] Поляев В.М., Генбач А.А. Управление внутренними характеристиками кипения в пористой системе // Криогенная техника и кондиционирование: Сб. трудов МГТУ. – 1991. – С. 224-237.
- [9] Поляев В.М., Генбач А.А. Применение пористой системы в энергетических установках // Промышленная теплоэнергетика. – 1992. – № 1. – С. 40-43.
- [10] Поляев В.М., Генбач А.А. Расчет тепловых потоков в пористой системе охлаждения // Известия вузов. Авиационная техника. – 1992. – № 2. – С. 71-74.
- [11] Генбач А.А., Гнатченко Ю.А. Системы охлаждения теплонагруженного элемента детонационного горелочного устройства – Камеры сгорания, диффузора, конфузора // Вестник Каз НТУ. – Алматы, 2007. – № 4 (61) июль. – С. 87-91.
- [12] Овсянник А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 284 с.
- [13] Alekseik O. S., Kravets V. Yu. Physical model of boiling on porous structure in the limited space // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – N 4/8 (64). – P. 26-31.
- [14] Jijiv A.M., Degryatov M.V. Modeling of heat transfer in a porous material. – Paper of Samara State Aerospace University, 2009. – P. 289-293.
- [15] Alekseik O. S., Kravets V. Yu., Kopchevska I. A. Heat transfer intensity at boiling on small-size surface // Technology and construction in electronic apparatuses. – 2012. – N 1. – P. 49-53.

## REFERENCES

- [1] Polyayev V. M., Genbach A.A. The growth rate of steam bubbles in porous structures, *News of higher education institutions. Mechanical engineering*. **1990**, № 10, pp. 56-61. (in Russ.).
- [2] Polyayev V. M., Genbach A.N., Genbach A.A. A limit condition of a surface at thermal influence, *TVT*. **1991**, Vol. 29, № 5, pp. 923-934. (in Russ.).
- [3] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System, *Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics*. **1991**, Dubrovnik, Yugoslavia, 23-28 June, pp. 639-644. (in Eng.).
- [4] Polyayev V.M., Genbach A.A. Applications porous system, *Proceedings of the universities. Energy*. **1991**, №12, pp. 97-101. (in Russ.).
- [5] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat management in porous structures, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy and transport*. **1992**, V. 38, №6, pp. 105-110. (in Russ.).
- [6] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat transfer in a porous system operating under the joint action of capillary and gravitational forces, *Thermal Engineering*, 7 (**1993**), pp. 55-58. (in Russ.).
- [7] Genbach A.A., Kulbakina N.V. Dust suppression and dust removal with a circulation of foam generator with a porous structure, *Energy and Fuel Resources of Kazakhstan*. **2010**, №4, pp. 62-65. (in Russ.).
- [8] Polyayev V.M., Genbach A.A. Management of internal characteristics of boiling in porous system, *Cryogenic equipment and conditioning: Collection of works of MGTU. Moscow*, **1991**, pp. 224-237. (in Russ.).
- [9] Polyayev V.M., Genbach A.A. Use of porous system in power stations, *Power industry*. **1992**, №1, pp. 40-43. (in Russ.).
- [10] Polyayev V.M., Genbach A.A. Calculation of thermal streams in the porous cooling system, *News of higher education institutions. Aircraft equipment*. **1992**, №2, pp. 71-74. (in Russ.).
- [11] Genbach A.A., Gnatchenko Y.A. Cooling system of thermal-element-detonation burner. Combustion chambers, diffuser, confuser, *Vestnik KazNTU, Almaty*, **2007**, №4 (61), July, pp. 87-91. (in Russ.).
- [12] Ovsyanik A.V. Modelling of heat-exchange processes at liquids boiling. *Gomel State Technical University named after Sukhoy P.O., Gomel*, **2012**, P. 284. (in Russ.).
- [13] Alekseik O. S., Kravets V. Yu. Physical model of boiling on porous structure in the limited space, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **2013**, № 4/8 (64), pp. 26-31. (in Eng.).
- [14] Jijiv A.M., Degryatov M.V. Modeling of heat transfer in a porous material, *Paper of Samara State Aerospace University*, **2009**, pp. 289-293. (in Russ.).
- [15] Alekseik O. S., Kravets V. Yu., Kopchevska I. A. Heat transfer intensity at boiling on small-size surface. *Technology and construction in electronic apparatuses*, **2012**, № 1, pp. 49-53. (in Russ.).

## ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАРДЫҢ КАПИЛЛЯРЛЫҚ-КЕУЕКТІ МОРТ СЫНҒЫШ ЖАБЫНДАРЫН ЗЕРТТЕУ

А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова

Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы

**Түйін сөздер:** капиллярлық-кеуекті жабындар, бу көпіршіктері, шектік күй, сығылу және созылу кернеулері, шектік жылу ағындары.

**Аннотация.** Жылу энергетикалық қондырғыларда жоғарғы технологиялық процестердің сапалы өтуін қамтамасыз ету үшін, морт сынғыш капиллярлық-кеуекті жабындар жылу алмасу бетінің шектік күйі орнағанға дейін зерттелді. Металл материалдардан (мыс, тот баспайтын болат) және табиғи минералды заттардан (кварц, гранит, тешенит) жасалған жабындар қарастырылған. Табиғи және жасанды капиллярлық-кеуекті құрылымдарда жылу алмасу бетінің шектік күйі жағдайында, капиллярлық және массалық күштердің қатар әсер етуі кезінде салқындатқыштың булану процесінің үлгісі құрылған. Жылу берілудің жоғарғы жылулық кернеулік процестері кезіндегі морт сынғыш жабындардың күйі сарапталады. Бу көпіршіктері бар капиллярлық-кеуекті орталар үшін жылуға серпімді мәселелерді шешу арқылы меншікті жылу ағындары және оларға сәйкес келетін жылулық күйретуші сығылу және созылу кернеулері анықталды. Жылулық күйреу кезінде жабыннан үзіліп шығатын бөлшектердің өлшемі шамаланған. Кеуекті минералды орталардың шектік күйі кезінде, сығатын жылулық кернеу себебінен күйреу тиімдірек жағдайда тез және өте аз мөлшерде болатын кезде сығылу кернеуінің созылу кернеуіне өту аймағы тағайындалған. Зерттеу минералдық заттардан жасалған әртүрлі кеуекті жабындары бар жылу энергетикалық қондырғыларға арналған.

Поступила 05.05.2016 г.

---

---

**Publication Ethics and Publication Malpractice  
in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct ([http://publicationethics.org/files/u2/New\\_Code.pdf](http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf)). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

<http://www.bulletin-science.kz/index.php/ru/>

Редакторы *М. С. Ахметова, Д. С. Аленов*  
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 24.05.2016.  
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.  
11,5 п.л. Тираж 2000. Заказ 3.