

ISSN 2518-1467 (Online),
ISSN 1991-3494 (Print)

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

1

АЛМАТЫ
АЛМАТЫ
ALMATY

2017

ҚАҢТАР
ЯНВАРЬ
JANUARY

Б а с р е д а к т о р ы

х. ғ. д., проф., ҚР ҰҒА академигі

М. Ж. Жұрынов

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

Абиев Р.Ш. проф. (Ресей)
Абишев М.Е. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Аврамов К.В. проф. (Украина)
Аппель Юрген проф. (Германия)
Баймуқанов Д.А. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Байпақов К.М. проф., академик (Қазақстан)
Байтулин И.О. проф., академик (Қазақстан)
Банас Иозеф проф. (Польша)
Берсимбаев Р.И. проф., академик (Қазақстан)
Велихов Е.П. проф., РҒА академигі (Ресей)
Гашимзаде Ф. проф., академик (Әзірбайжан)
Гончарук В.В. проф., академик (Украина)
Давлетов А.Е. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Джрбашян Р.Т. проф., академик (Армения)
Қалимолдаев М.Н. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан), бас ред. орынбасары
Лаверов Н.П. проф., академик РАН (Россия)
Лупашку Ф. проф., корр.-мүшесі (Молдова)
Мохд Хасан Селамат проф. (Малайзия)
Мырхалықов Ж.У. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Новак Изабелла проф. (Польша)
Огарь Н.П. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Полещук О.Х. проф. (Ресей)
Поняев А.И. проф. (Ресей)
Сагиян А.С. проф., академик (Армения)
Сатубалдин С.С. проф., академик (Қазақстан)
Таткеева Г.Г. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Умбетаев И. проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)
Хрипунов Г.С. проф. (Украина)
Якубова М.М. проф., академик (Тәжікстан)

«Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының Хабаршысы».

ISSN 2518-1467 (Online),

ISSN 1991-3494 (Print)

Меншіктенуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы»РҚБ (Алматы қ.)

Қазақстан республикасының Мәдениет пен ақпарат министрлігінің Ақпарат және мұрағат комитетінде
01.06.2006 ж. берілген №5551-Ж мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік

Мерзімділігі: жылына 6 рет.

Тиражы: 2000 дана.

Редакцияның мекенжайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,
www: nauka-nanrk.kz, bulletin-science.kz

© Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 2017

Типографияның мекенжайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Муратбаева көш., 75.

Г л а в н ы й р е д а к т о р
д. х. н., проф. академик НАН РК
М. Ж. Журинов

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:

Абиев Р.Ш. проф. (Россия)
Абишев М.Е. проф., член-корр. (Казахстан)
Аврамов К.В. проф. (Украина)
Апель Юрген проф. (Германия)
Баймуканов Д.А. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Байпаков К.М. проф., академик (Казахстан)
Байтулин И.О. проф., академик (Казахстан)
Банас Иозеф проф. (Польша)
Берсимбаев Р.И. проф., академик (Казахстан)
Велихов Е.П. проф., академик РАН (Россия)
Гашимзаде Ф. проф., академик (Азербайджан)
Гончарук В.В. проф., академик (Украина)
Давлетов А.Е. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Джрбашян Р.Т. проф., академик (Армения)
Калимолдаев М.Н. проф., чл.-корр. (Казахстан), зам. гл. ред.
Лаверов Н.П. проф., академик РАН (Россия)
Лупашку Ф. проф., чл.-корр. (Молдова)
Мохд Хасан Селамат проф. (Малайзия)
Мырхалыков Ж.У. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Новак Изабелла проф. (Польша)
Огарь Н.П. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Полещук О.Х. проф. (Россия)
Поняев А.И. проф. (Россия)
Сагьян А.С. проф., академик (Армения)
Сатубалдин С.С. проф., академик (Казахстан)
Таткеева Г.Г. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Умбетаев И. проф., чл.-корр. (Казахстан)
Хрипунов Г.С. проф. (Украина)
Якубова М.М. проф., академик (Таджикистан)

«Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан».

ISSN 2518-1467 (Online),
ISSN 1991-3494 (Print)

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, 2017

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

E d i t o r i n c h i e f

doctor of chemistry, professor, academician of NAS RK

M. Zh. Zhurinov

E d i t o r i a l b o a r d:

Abiyev R.Sh. prof. (Russia)
Abishev M.Ye. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Avramov K.V. prof. (Ukraine)
Appel Jurgen, prof. (Germany)
Baimukanov D.A. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Baipakov K.M. prof., academician (Kazakhstan)
Baitullin I.O. prof., academician (Kazakhstan)
Joseph Banas, prof. (Poland)
Bersimbayev R.I. prof., academician (Kazakhstan)
Velikhov Ye.P. prof., academician of RAS (Russia)
Gashimzade F. prof., academician (Azerbaijan)
Goncharuk V.V. prof., academician (Ukraine)
Davletov A.Ye. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Dzhrbashian R.T. prof., academician (Armenia)
Kalimoldayev M.N. prof., corr. member. (Kazakhstan), deputy editor in chief
Laverov N.P. prof., academician of RAS (Russia)
Lupashku F. prof., corr. member. (Moldova)
Mohd Hassan Selamat, prof. (Malaysia)
Myrkhalykov Zh.U. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Nowak Isabella, prof. (Poland)
Ogar N.P. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Poleshchuk O.Kh. prof. (Russia)
Ponyaev A.I. prof. (Russia)
Sagiyani A.S. prof., academician (Armenia)
Satubaldin S.S. prof., academician (Kazakhstan)
Tatkeyeva G.G. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Umbetayev I. prof., corr. member. (Kazakhstan)
Khripunov G.S. prof. (Ukraine)
Yakubova M.M. prof., academician (Tadjikistan)

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

ISSN 2518-1467 (Online),

ISSN 1991-3494 (Print)

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, 2017

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

A. A. Genbach, N. O. Jamankulova

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

THE LIMITING CONDITION OF CAPILLARY-POROUS STRUCTURE UNDER THE SINGLE STEAM BUBBLE

Abstract. On the basis of the solution of non-stationary heat conduction equations for different boundary conditions the analogy of three different heat transfer processes are presented: the microprocesses of heat transfer and dynamics of steam bubbles growing in the cells of the capillary-porous structure (the first analogy), the macroprocesses of damage of heat exchange surface with a porous fragile low thermal conductivity coating (the second analogy) and the cooling depth of the steam generating surface with the tear-off particles at thermal stresses of compression for the limiting condition surface of the metal and fragile porous coating (the third analogy). The characteristics of heat exchange checked by an integral and cinema method are given. Law of bubbles growth in the cells of structure is determined experimentally, taking into account the excess fluid and thermal storage capacity of the walls. The porous coating promotes the larger and more uniform thickness of a boundary layer and slight size of temperature fluctuations in a wall. Researches allow to prevent and expand the crisis limits of heat exchange and emergence of the limiting condition of a surface and to optimize a selection of fragile porous coating.

Key words: single (individual) steam bubble; capillary-porous structure; fluid excess; heat exchange crisis.

УДК 536.483

А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан

ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ПОД ИНДИВИДУАЛЬНЫМ ПАРОВЫМ ПУЗЫРЕМ

Аннотация. На основе решения уравнения нестационарной теплопроводности для различных граничных условий представлена аналогия трех различных процессов теплопередачи: микропроцессов теплопередачи и динамики паровых пузырей, растущих в ячейках капиллярно-пористой структуры (первая аналогия), макропроцессов разрушения поверхности теплообмена с пористым плохотеплопроводным хрупким покрытием (вторая аналогия) и глубины захолаживания парогенерирующей поверхности с величиной отрывающихся частиц от термонапряжений сжатия в случае предельного состояния поверхности металла и хрупкого пористого покрытия (третья аналогия). Даны характеристики теплообмена, проверенные интегральным и кинематографическим методом. Закон роста пузырей в ячейках структуры определен экспериментально с учетом избытка жидкости и теплоаккумулирующей способности стенки. Пористое покрытие способствует большей и более равномерной толщине погранслоя и незначительной величине пульсаций температуры в стенке. Исследования позволяют предотвращать и расширять пределы кризис теплообмена и возникновение предельного состояния поверхности и оптимизировать подбор хрупких пористых покрытий.

Ключевые слова: одиночный (индивидуальный) паровой пузырь; капиллярно-пористая структура; избыток жидкости; кризис теплообмена.

Введение. Задача об испарении пленки жидкости с поверхности твердого тела для различных условий рассматривалась ранее в работах [1, 2]. Рассмотрим нестационарный теплообмен при микрослоевом испарении пленки жидкости, находящейся под паровым пузырем, растущим в

ячейках капиллярно-пористой структуры, путем подвода теплоты из аккумулирующего объема парогенерирующей поверхности, которая принимается как бесконечная пластина толщиной $\delta_{пл}$ (рисунок 1). На рисунке 1 представлена модель соприкосновения паровых пузырей с парогенерирующей поверхностью в ячейках генерации пара пористой структуры, где 1 – пористая структура; 2 – ячейка генерации пара; 3 – ячейка питания жидкостью; 4 – парогенерирующая поверхность; 5 – фронт распространения температурной волны h в объеме теплогенерирующей поверхности, выполненной из нержавеющей стали и меди (пунктирная линия) (глубина захлаживания); 6 – пар; 7 – «сухое» пятно; 8 – фронт распространения легкой (паровой) фазы.

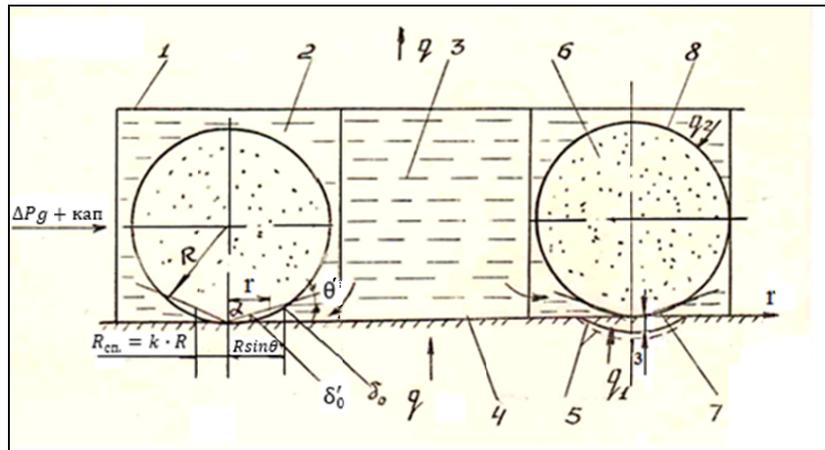


Рисунок 1 – Модель соприкосновения паровых пузырей с парогенерирующей поверхностью в ячейках генерации пара пористой структуры

Используем решение задачи об испарении пленки жидкости с поверхности твердого тела, принимаемого полуограниченным ($\delta \rightarrow \infty$), полагая, что пленка толщиной δ_0 находится в ячейке капиллярно-пористой структуры.

Температурное поле в пластине, покрытой пористой структурой, может быть описано одномерным уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \tag{1}$$

Радиус «сухого» пятна в основании парового пузыря, согласно рассматриваемой модели, можно определить по формуле:

$$R_{cn} = \frac{\delta_0}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\sqrt{3}}{2 \operatorname{tg} \alpha} \frac{\lambda'}{\sqrt{\rho c \lambda}} \frac{p \sqrt{\tau_0}}{\sqrt{f'(p)}}, \tag{2}$$

где α – угол между поверхностью нагрева и клиновидным микрослоем, находящимся под пузырем с радиусом R_{cn} ; P – перегрев жидкости (тепловой параметр) и $f'(p)$ определяются по соотношениям (3) и (4).

$$P = \frac{4c\rho(T_0 - T_s)\lambda}{3r'\rho'\lambda'}, \tag{3}$$

$$f'(p) = \frac{2p+1}{2} + 0.393 \frac{(2p)^2}{(2p-1)^{3/2}} + 0.5 - \frac{(2p)^{1.5}}{4(2p-1)} \times \left[\sqrt{\frac{1}{2p}} + \sqrt{\frac{2p}{2p-1}} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{2p-1}} \right] = \frac{3}{4} p^2 \frac{a \tau_0}{\delta_0^2} \left(\frac{\lambda'}{\lambda} \right)^2 = \frac{3}{4} p^2 \tilde{\tau}_0. \tag{4}$$

Принятые обозначения: r – координата парогенирующей поверхности, покрытой пористой структурой; R_{cn} – радиус «сухого пятна» вдоль координаты r ; δ_0 – толщина жидкостной пленки; τ_0 – время полного испарения микрослоя толщиной δ_0 ; $T_0 = T(x, 0)$ – температура жидкости при $\tau = 0$ (начальная температура жидкости на стенке); T_s – температура насыщения; λ, λ' – теплопроводность стенки и жидкости; c, ρ, ρ' – теплоемкость стенки, плотность стенки и жидкости; a – коэффициент температуропроводности; r' – теплота парообразования.

Вопросы влияния режимных и конструктивных факторов на процесс кипения жидкости в ячейках пористой структуры ранее исследовались в работах [3-12].

Для капиллярно-пористой системы, работающей в поле массовых сил, нами определен закон роста паровых пузырей [3] как

$$R_d = 2\sqrt{54,1a'Ja\tau_0} \left[1 + \left(\frac{m_{жс}}{m_n} \right)^{0,1} \right]^{-1}.$$

Тогда уравнение для R_{cn} преобразуется к виду:

$$R_{cn} = \frac{\sqrt{3}}{2tg\alpha} \frac{\lambda'}{\sqrt{\rho c \lambda}} \frac{p}{\sqrt{f'(p)}} \frac{R_d [1 + (m_{жс} / m_n)]^{0,1}}{2\sqrt{54,1a'Ja}}, \quad (5)$$

где отношение $\frac{R_{cn}}{R_d} = K$ представляет собой коэффициент «сухого» пятна.

В общем случае в исследованной капиллярно-пористой системе охлаждения влияние недогрева, скорости жидкости и теплофизических свойств жидкости и поверхности нагрева аппроксимируется осредненным выражением вида:

$$\bar{R} = \frac{\bar{R}_d}{R_0} = 2,42 [k_{жс} k_{СТ}]^{-1},$$

где $\tilde{m} = 1 \dots 14$; $W_0 = (1,1 \times 10^{-3} \dots 0,1)$ м/с; $W_0 = \frac{m_{жс} l q}{m_n \varepsilon \delta_\phi r \rho'}$; l – высота теплообменной поверхности; ε – пористость структуры; δ_ϕ – толщина пористой структуры; $k_{жс} = 1 + \tilde{m}^{0,1}$;

$k_{СТ} = 1 + \left[\frac{(\rho c \lambda)'}{(\rho c \lambda)} \right]^{0,5}$ – коэффициенты, учитывающие избыток жидкости и теплоаккумулирующую способность стенки;

$\tilde{m} = \frac{m_{жс}}{m_n}$ – параметр, учитывающий избыток жидкости.

Избыток жидкости \tilde{m} в сечении пористой структуры создает течение с малым недогревом и незначительной скоростью W_0 , что снижает осредненную величину отрывного радиуса пузыря \bar{R}_0 до величины \bar{R}_d . Это связано с уменьшением среднемассовой температуры, которое приводит к падению перегрева пленки жидкости, окружающей пузырь, и может вызвать его частичную конденсацию [7].

Динамический угол смачивания в исследованиях получен $\theta' = 80$ град. (см. рисунок 1); угол $\alpha = 5^\circ 30'$; $K = 0,5$.

Закон роста паровых пузырей R_d учитывает искажение формы и очертание пузырей за счет избытка жидкости $m_{ж}$ по отношению к расходу генерируемого пара $m_{п}$. Число Якоба

$$Ja = \frac{c'_p \Delta T}{r} \frac{\rho'}{\rho''}; \Delta T = \text{температурный напор}; \rho'' - \text{плотность пара}; \tilde{m} = \frac{m_{жс}}{m_n} - \text{избыток жидкости.}$$

Время τ_0 – время полного испарения микрослоя толщиной δ_0 , при котором под пузырем устанавливается «сухое» пятно ($r = R_{сн}$), определяется из выражения (4).

Модель процессов. Предельное состояние поверхности нагрева. Для описания предельного состояния парогенерирующей поверхности, покрытой капиллярно-пористой структурой, при наступлении кризиса кипения воспользуемся уравнением теплопроводности (1) для граничных условий второго рода:

$$\begin{aligned} T &= 0, \tau < 0; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= q, x = + \delta_{nl}; \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= q, x = - \delta_{nl}. \end{aligned}$$

Пластина толщиной $2\delta_{nl}$, когда к поверхности $x = + \delta_{nl}$, начиная с момента $\tau = 0$, подводится постоянный удельный тепловой поток. Нижняя поверхность $x = -\delta_{nl}$ и боковые края пластины теплоизолированы [4].

Результаты и их анализ по предельному состоянию. Для пластин, выполненных из меди и нержавеющей стали, имеющих кварцевое и гранитное капиллярно-пористое покрытие, на рисунках 2–4 приведены результаты расчетов функциональных зависимостей q_1, q_2, q_3 , отвечающих соответственно плавлению поверхности, созданию предельных напряжений сжатия и растяжения.

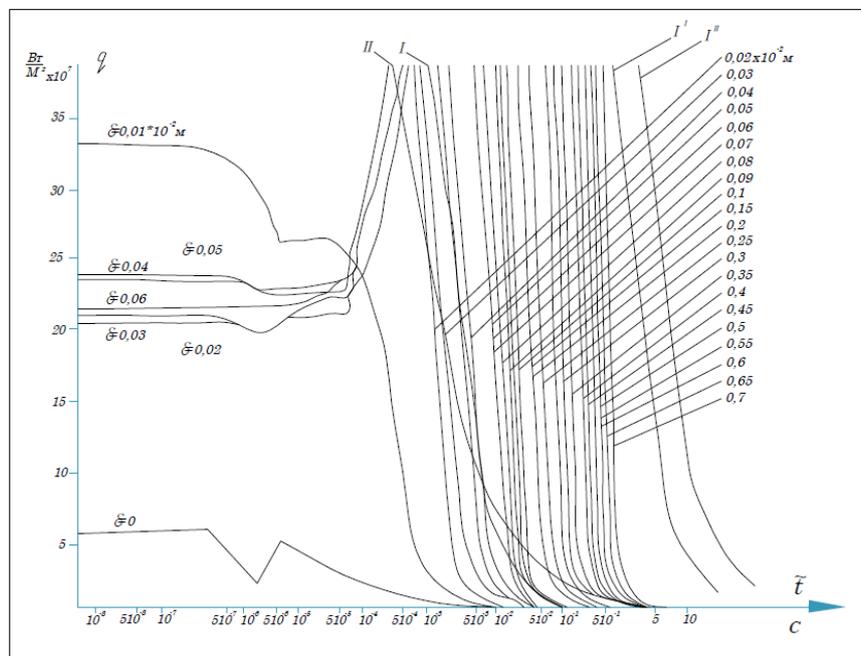


Рисунок 2 – Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия кварцевого пористого покрытия, в зависимости от времени действия τ для различной толщины отрывающихся частиц δ_q :

I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения; I', I'' – медь и нержавеющая сталь; $\delta_{nl} = 0,1 \times 10^{-3}$ м;

II – кривая оплавления поверхности.

Кривые II', II'' – для меди и стали почти совпадают с кривой I в области $\tau = (0,01-0,1)$ с

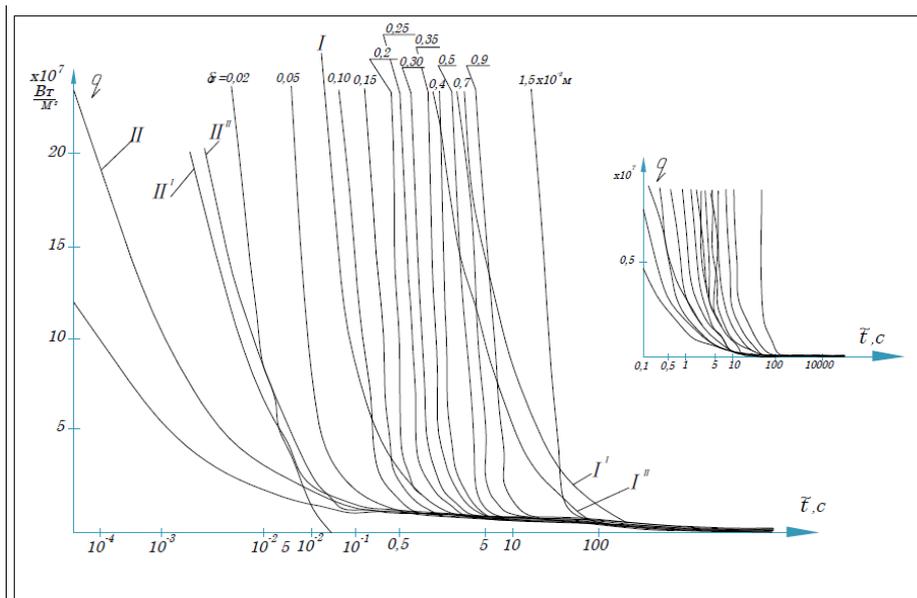


Рисунок 3 – Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия пористого гранитного покрытия в зависимости от времени действия для различной толщины отрывающихся частиц:

I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения (I', I'' – медь и нержавеющая сталь, $\delta_{nl} = 0,1 \times 10^{-3}$ м);
 II – кривая оплавления поверхности (II', II'' – медь и нержавеющая сталь, $\delta_{nl} = 0,1 \times 10^{-3}$ м)

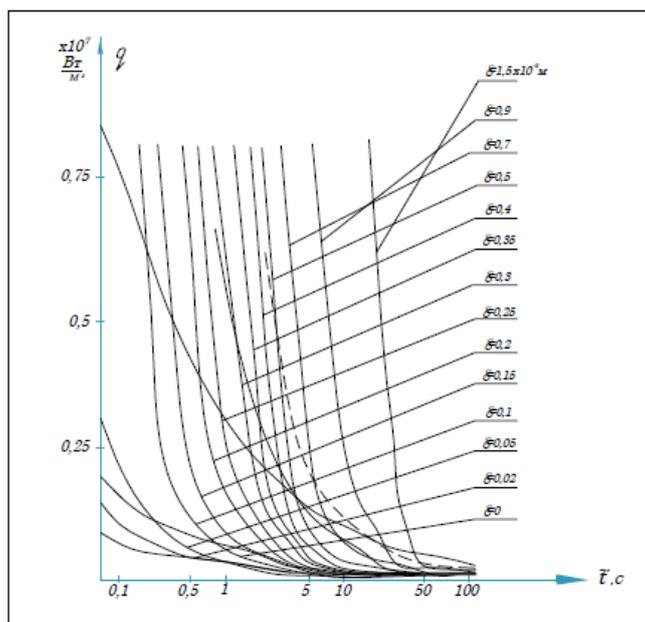


Рисунок 4 – Зависимость $q = f(\tilde{\tau})$, представленная на рисунке 3, дана в диапазоне $q = (0,25-0,75)10^7$ Вт/м²

Тепловые потоки подсчитаны для широкого интервала времени τ – ($10^{-8} - 10^3$) с. Интервал времени ($10^{-8} - 10^3$) с соответствует микропроцессам динамики паровой фазы в ячейках капиллярно-пористых покрытий: от взрывообразного рождения парового зародыша $R_{кр}$ до момента гибели парового пузыря $R_d = R_0$ и соответствующим (сопутствующим) им процессам испарения микрослоя δ в пузырь и развитию «сухого» пятна $R_{сп}$ в основании пузыря. Проводя аналогию с процессами разрушения металла и пористого покрытия, т.е. с макропроцессами, примем протекающими их за время τ ($5 \times 10^{-3} - 10^3$) с. Величины удельных тепловых потоков q получаются одного порядка, как и для индивидуальных паровых пузырей (см. рисунки 2–4), что в (10-100) раз может превышать их среднеинтегральные значения (первая аналогия).

На рисунках 2–4 нанесены кривые для парогенерирующих поверхностей нагрева, когда в результате смены режима кипения установился пленочный режим и резко возросла температура поверхности до величины $T_{пл}$ плавления.

Для металлов процесс разрушения кристаллов состоит из стадии зарождения трещин и их развития в области концентраторов напряжений. Высокие внутренние напряжения могут появляться вследствие неоднородного протекания пластической деформации, после чего наступает хрупкое разрушение, аналогичное разрушению хрупких малотеплопроводных капиллярно-пористых покрытий.

Механизм разрушения металлических парогенерирующих поверхностей отличается от механизма разрушения плохотеплопроводных вязких и хрупких капиллярно-пористых покрытий. Несмотря на это, на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности при граничных условиях второго рода и физической модели теплообмена видна аналогия в динамике паровых пузырей в ячейках структуры (10^{-8} – 10^{-3}) с и в кинетике термического напряжения хрупких пористых покрытий, в том числе в порядке величин тепловых нагрузок, поглощаемых одиночными паровыми пузырями и кластерами хрупких естественных минеральных сред. Далее во времени происходит разрушение (схлопывание) паровых пузырей, достигших отрывных диаметров $2R_d$, и полное высыхание клиновидного слоя жидкости δ_0 под пузырями и разрушение пористых покрытий термическими напряжениями сжатия, растяжения и сдвига в зависимости от величины тепловой нагрузки q и времени ее подачи τ .

Третья временная аналогия в процессе теплопередачи заключается в глубине проникновения фронта тепловой волны в металлическую парогенерирующую поверхность \bar{h} и величине отрывающихся частиц δ_c при терморазрушении хрупких пористых покрытий (см. рисунок 1, позиция 5 и рисунки 2–4).

Описанные три аналогии процессов теплопередачи позволяют предсказывать и предотвращать возникновение кризиса кипения, предельного состояния (плавления) теплоотдающей поверхности и подбирать оптимальные хрупкие капиллярно-пористые покрытия для исключения их шелушения и плавления.

Расчеты произведены для удельных тепловых потоков, напряжений сжатия и растяжения в зависимости от времени их подачи, толщины пластины (фракции), глубины проникновения температурных возмущений и теплофизических свойств упругой среды.

Результаты расчета подтверждены интегральными измерениями и кинематографически в работах [3-12].

Для пористых структур, работающих в области давлений (0,1–200) бар, покрывающих подложку из меди и нержавеющей стали, величина перегрева жидкости $P > 0,5$, время полного испарения пленки жидкости $\tau < \tau_k$, при котором фронт температурного возмущения, распространяясь в твердом теле, не достигает толщины пластины, т.е. глубина захолаживания $h < \delta_{пл}$, а пластина является полуограниченным телом ($\delta_{пл} \rightarrow \infty$), и толщина пластины $\delta_{пл}$ не входит в расчетные зависимости. Наличие пористой структуры способствует большей и более равномерной толщине δ пограничного слоя, меньшей глубине захолаживания h поверхности нагрева и незначительной величине пульсаций температуры в стенке.

Заключение. Предельное состояние теплообменной поверхности с пористым покрытием исследовано с использованием уравнения теплопроводности для граничных условий второго рода. Результаты расчета тепловых потоков, отвечающих плавлению, сжатию и растяжению, позволили провести аналогию процессов теплопередачи в пограничном пористом слое, с соответствующими микропроцессами динамики паровой фазы (от зарождения до гибели парового пузыря) (первая аналогия) до макропроцессов разрушения металлической поверхности теплообмена и пористого плохотеплопроводного хрупкого покрытия, выполненного из естественных минеральных сред (кварц и гранит). Тепловые нагрузки для микропроцессов одиночных пузырей и макропроцессов разрушения покрытий могут быть одного порядка и превышать среднеинтегральные величины в (10÷100) раз (вторая аналогия). Также представлена третья аналогия в процессах теплопередачи, по глубине проникновения фронта тепловой волны в поверхность нагрева, толщине погранслоя и по

величине отрывающихся частиц при терморазрушении хрупких пористых покрытий, что предотвращает кризис кипения и возникновение предельного состояния поверхности и оптимизирует подбор хрупких покрытий.

Расчеты произведены для удельных тепловых потоков, напряжений сжатия и растяжения в зависимости от времени их подачи, толщины пластины (фракции), глубины проникновения температурных возмущений и теплофизических свойств упругой среды.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. – М.: Энергия, 1977. – 288 с.
- [2] Купер М.Г., Мерри Д.М. Испарение микрослоя при пузырьковом кипении. – В кн.: Тепло- и массоперенос. – Минск: Наука и техника, 1972. – Т. 9, ч. 1. – С. 233-257.
- [3] Поляев В.М., Генбач А.А. Скорость роста паровых пузырей в пористых структурах // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. – № 10. – С. 61-65.
- [4] Генбач А.А., Бурмистров А.В. Исследование теплового состояния цилиндров паровых турбин // Промышленность Казахстана. – 2011. – № 2 (65). – С. 91-93.
- [5] Генбач А.А., Федоров В.Н., Шелгинский А.Я. Интенсивность теплообмена при кипении жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле массовых сил // Теплообменные процессы и установки: Сб. трудов МЭИ. – М., 1980. – Вып. 448. – С. 27-32.
- [6] Поляев В.М., Генбач А.А. Плотность центров парообразования и выброс капель из пористой структуры // Известия вузов. Машиностроение. – 1990. – № 9. – С. 50-55.
- [7] Поляев В.М., Генбач А.А. Отрывной диаметр и частота отрыва паровых пузырей в пористых структурах // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. – 1990. – № 1. – С. 69-72.
- [8] Поляев В.М., Генбач А.А. Начальная область парообразования в пористых структурах, работающих с избытком жидкости // Известия вузов. Энергетика. – 1991. – № 2. – С. 84-87.
- [9] Поляев В.М., Генбач А.А. Механизм процессов парообразования в пористой системе охлаждения // Теория рабочих процессов в узлах и трактах энергетических установок: Сборник трудов МАИ. – М., 1991. – С. 81-90.
- [10] Поляев В.М., Генбач А.А., Минашкин Д.В. Визуализация процессов в пористом эллиптическом теплообменнике // Известия вузов. Машиностроение. – М., 1991. – № 10-12. – С. 75-80.
- [11] Поляев В.М., Генбач А.А. Пористое охлаждение камер сгорания и сверхзвуковых сопел // Тяжелое машиностроение. – М., 1991. – № 7. – С. 8-10.
- [12] Polyayev V., Genbach A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces // Thermal Engineering. – M., 1993. – Vol. 40, N 7. – P. 551-554.
- [13] Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures / M. Jamialahmadi, H. Muller-Steinbagen and et. // Intern. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2008. – Vol. 51. – P. 2482-2493.
- [14] Ose Y., Kunugi T. Numerical study on subcooled pool boiling // Progr. In Nucl. Sci. and Technology. – 2011. – Vol. 2. – P. 125-129.
- [15] Pioro I.L., Rolsenow W., Doeffler S.S. Nucleate pool boiling heat transfer. II: assessment of prediction methods // Intern. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – Vol. 47. – P. 5045-5057.
- [16] Xing H., Kennig D.B.R. Identification of bubble nucleation sites // Proc. Of 8th National of Heat Transfer conf., 9-10 th Set. 2003, Oxford.

REFERENCES

- [1] Grigoriev V.A., Pavlov U.M., Amestitov E.V. Kipenie kriogennykh zhidkostey. M.: *Energiya*, 1977, 288 p. (in Russ.).
- [2] Cuper M.G., Merry D.M. Ispareniye mikrosloya pri puzyrkovom cipenii. V kn.: *Teplo-massoperenos. Minsk: Nauka i tekhnika*, 1972, Vol. 9, p. 1, pp. 233-257 (in Russ.).
- [3] Polyayev V.M., Genbach A.A. Skorost rosta parovykh puzyrej v poristykh strukturah. *Isvestiya vuzov. Mashinostroyeniye*, 1990, N 10, pp. 61-65 (in Russ.).
- [4] Genbach A.A., Burmistrov A.V. Issledovaniye teplovogo sostoyaniya tcilindrov parovykh turbin. *Promyshlennost Kazakhstana*, 2011, N 2 (65), pp. 91-93 (in Russ.).
- [5] Genbach A.A., Fedorov V.N., Shelginsky A.Y. The intensity of the boiling heat transfer fluid in the capillary-porous structure in the field of mass forces. *Heat and mass exchange processes and plants: Proceedings of MPEI*, Moscow, 1980, Issue 448, pp. 27-32 (in Russ.).
- [6] Polyayev V.M., Genbach A.A. The density of nucleation sites and the release of droplets from the porous structure. *Proceedings of the universities. Mechanical Engineering*, 1990, N 9, pp. 50-55 (in Russ.).
- [7] Polyayev V.M., Genbach A.A. The density of nucleation sites and the release of droplets from the porous structure. *Proceedings of the universities. Mechanical Engineering*, 1990, N 9, pp. 50-55 (in Russ.).
- [8] Polyayev V.M., Genbach A.A. The initial area of evaporation in porous structures, working with excess fluid. *Proceedings of the universities. Energy*, 1991, N 2, pp. 84-87 (in Russ.).
- [9] Polyayev V.M., Genbach A.A. Mechanism prosessov parobrazovaniya v poristykh sisteme okhlazhdeniya. *Teoriya rabochih processov v uzлах i traktah energeticheskikh ustanovok: Sbornik trudov MAI, M., 1991*, pp. 81-90 (in Russ.).
- [10] Polyayev V.M., Genbach A.A., Minashkin D.V. Processy v poristom ellipticheskom teploobmennike. *Isvestiya vuzov. Mashinostroyeniye*, 1991, N 4-6, pp.73-77 (in Russ.).

- [11] Polyayev V.M., Genbach A.A., Poristoye okhlazhdeniye camer sgoraniya i sverhzhukovyh sopel. *Tyazholoe Mashinostroyeniye*, **1991**, N 7, pp. 8-10 (in Russ.).
- [12] Polyayev V., Genbach A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces. *M.: Thermal Engineering*, **1993**, Vol. 40, N 7, pp. 551-554 (in Eng.).
- [13] Polyayev V., Genbach A. Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multi-component mixtures / M. Jamialahmadi, H. Muller-Steinbagen and et., *Intern. Journal of Heat and Mass Transfer*, **2008**, Vol. 51, pp. 2482-2493 (in Eng.).
- [14] Ose Y., Kunugi T. Numerical study on subcooled pool boiling. *Progr. In Nucl.Sci. and Technology*, **2011**, Vol. 2, pp. 125-129 (in Eng.).
- [15] Piroo I.L., Rolsenow W., Doeffler S.S. Nucleate pool boiling heat transfer. II: assessment of prediction methods, *Intern. Journal of Heat and Mass Transfer*, **2004**, Vol. 47, pp. 5045-5057 (in Eng.).
- [16] Xing H., Kennig D.B.R. Identification of bubble nucleation sites, *Proc. Of 8th National of Heat Transfer conf.*, 9-10 th Set. **2003**, Oxford (in Eng.).

А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова

Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

**ЖЕКЕ БУ КӨПІРШІКТЕРІ АСТЫНДАҒЫ
КАПИЛЛЯРЛЫҚ-КЕУЕКТІК ҚҰРЫЛЫМНЫҢ ШЕКТІК КҮЙІ**

Аннотация. Әртүрлі шектік шарттар үшін тұрақсыз жылу өткізгіштік тендеуін шешу негізінде жылу берілу процесінің үш түрінің баламасы келтірілген: капиллярлық-кеуектік құрылымның жәшігінде өсетін бу көпіршіктерінің динамикасы мен жылу берілудің микропроцестері (бірінші балама); жылуды нашар өткізетін кеуектік морт сынғыш жабыны бар жылуалмасу бетінің күйреуінің макропроцестері (екінші балама); металл бетінің және морт сынғыш жабынның шектік күйлері кезінде жылулық сығу кернеуі әсерінен үзіліп бөлінетін бөлшектердің үлкендігінен болатын бу өндіруші беттің салқындату тереңдігі (үшінші балама). Жылу алмасудың интегралдық және кинематографтық әдістермен тексерілген сипаттамалары келтірілген. Зерттеулер жылу алмасу дағдарысын болдырмауға және дағдарыс шектерін кеңейтуге, беттердің шектік күйін тұндырмауға мүмкіндік береді, кеуектік морт сынғыш жабындарды таңдауды тиімдендіреді.

Түйін сөздер: жеке бу көпіршігі, капиллярлық-кеуектік құрылым, артық сұйықтық, жылу алмасу дағдарысы.

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). 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

ISSN 2518-1467 (Online), ISSN 1991-3494 (Print)

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

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

Подписано в печать 24.02.2017.
Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.
12,4 п.л. Тираж 2000. Заказ 1.