

A. A. Genbach, N. O. Jamankulova

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

## MODEL AND MECHANISM OF DEVELOPMENT OF STEAM PHASE IN POROUS STRUCTURES OF HEAT EXCHANGERS

**Abstract.** A model of the development of the vapor phase in the porous structures of heat exchangers based on cinematic observations is developed, which explains the mechanism of nucleation, development and death of vapor bubbles. The analytical model is obtained on the basis of the solution of the thermoelasticity problem, and the limiting state of poorly and well heat conductive materials is determined. The functional dependence of the heat flux, required for destruction, on the time of delivery and penetration depth was obtained. The heat fluxes are defined necessary for melting the surface layer of the coating or for destruction by limiting compressive stresses or for stretching. The record (kinogram) of flight of a particle of the destroyed coating determined its size which agrees well with the theoretical model of calculation.

**Key words:** capillary-porous system, vapor phase model, limiting state, heat exchangers, heat flux.

УДК 631.344 (088.8)

А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан

## МОДЕЛЬ И МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ ПАРОВОЙ ФАЗЫ В ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

**Аннотация.** Создана модель развития паровой фазы в пористых структурах теплообменников на основе кинематографических наблюдений, которая объясняет механизм зарождения, развития и гибели паровых пузырей. Аналитическая модель получена на основе решения задачи термоупругости, причем определено предельное состояние плохо- и хорошо теплопроводных материалов. Получена функциональная зависимость теплового потока, требуемого для разрушения, от времени подачи и глубины проникновения. Найдены тепловые потоки, необходимые для расплавления поверхностного слоя покрытия, либо для разрушения предельными напряжениями сжатия, или растяжения. Кинограмма полета частицы разрушаемого покрытия определила ее размер, который хорошо согласуется с теоретической моделью расчета.

**Ключевые слова:** капиллярно-пористая система, модель паровой фазы, предельное состояние, теплообменники, тепловой поток.

Модель развития паровой фазы, описание механизма процессов и получения расчетных зависимостей, определяются, как следует из фото-кинематографических и голографических наблюдений [1-5] из того, что динамика паровой фазы после спонтанного (взрывообразного) зарождения пузыря критического размера  $R_{кр}$ ) протекает с участием испаряющегося микрослоя жидкости, находящегося под паровым пузырем, а при некоторых условиях начинается вытеснение жидкой пленки в центре парового пузыря с последующим развитием "сухого" пятна. Отрыв или разрушение паровых пузырей происходит при диаметрах, в несколько раз меньших, чем при кипении в большом объеме на гладкой поверхности. Величина  $\bar{D}_0 = 2R_0$  рассчитывается по формуле работ [6, 7].

После отрыва (разрушения) пузыря активно подсасываются относительно холодные порции жидкости под действием гравитационных и капиллярных сил. За некоторым "молчанием" центра генерации спонтанно возникает новый паровой пузырь критического размера, причем время роста, управляемое расходом охлаждающей жидкости  $G_{ж}$  (скоростью потока и степенью его недогрева) уменьшается при более интенсивном подводе теплоты от тонкого перегретого слоя жидкости, окружающего паровой пузырь, со стороны объема пористой структуры, и от теплопроводного скелета сеток.

Несоизмеримость времени "молчания" с периодом роста также свидетельствует о постоянно существующем перегретом пульсирующем микрослое жидкости, устойчивость и стабильность которого расширены в результате комбинированного действия гравитационного и капиллярного потенциалов.

При кипении жидкости в большом объеме на гладкой поверхности стадия роста пузыря составляла  $\sim (10-100) \cdot 10^{-3}$  с, а в пористой системе эта величина в десятки раз меньше. Стадии зарождения и отрыва пузыря пренебрежимо малы в обеих системах и носят характер взрыва. Время "молчания" в периодическом цикле образования пузыря при кипении в большом объеме могло составлять  $\sim 0,1$  с и быть соизмеримым с временем роста пузыря. Появление зародыша критического размера  $R_{кр}$  в ячейке пористой структуры происходит в результате быстрого расширения пузыря во впадине внутрь жидкости (рисунок 1).

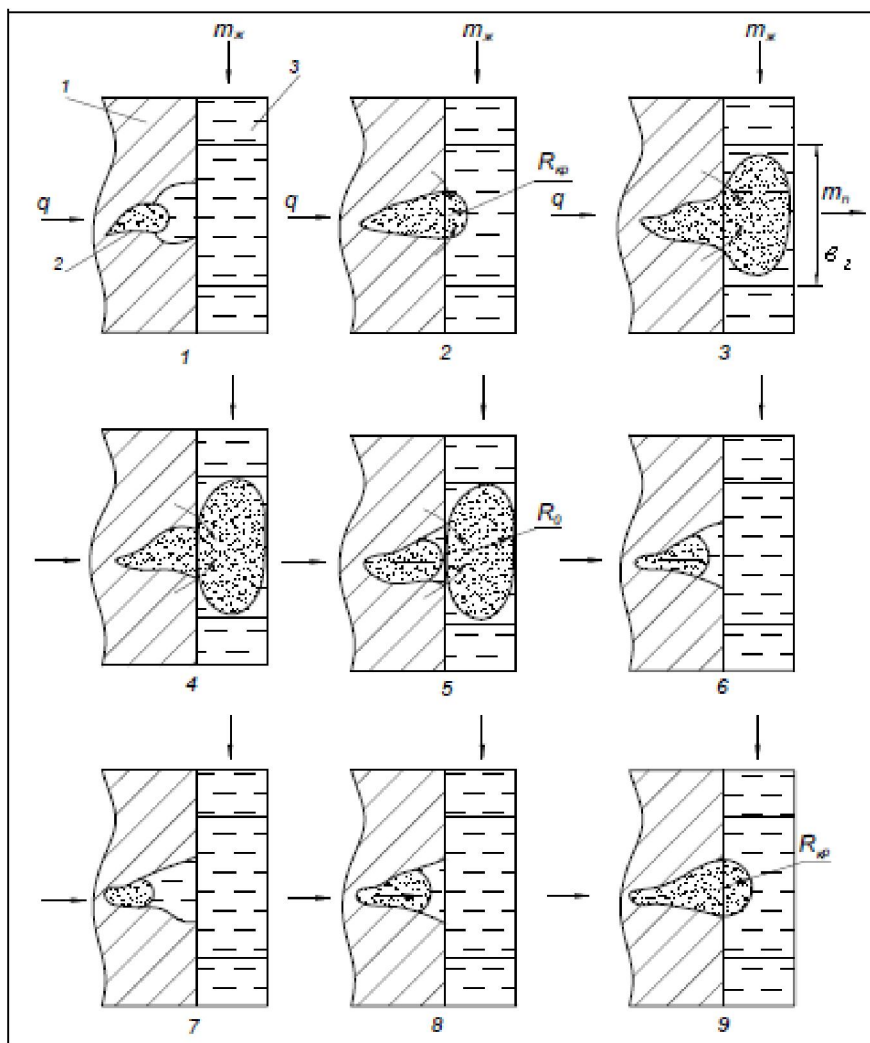


Рисунок 1 – Иллюстрация процесса зарождения, развития и отрыва парового пузыря в активной поре парогенерирующей стенки, покрытой пористой структурой: 1 – стенка; 2 – впадина; 3 – пористая структура;  $q$  – тепловая нагрузка;  $m_{ж}$  – расход жидкости;  $m_{п}$  – расход пара;  $\epsilon_2$  – гидравлический размер структуры

Однако увеличивающаяся кривизна поверхности пузыря замедляет процесс его расширения во впадине, а в начальный момент велики динамические силы, возникающие в перегретой жидкости, которые препятствуют дальнейшему росту пузыря. Тепло передается, главным образом, через микрослой жидкости под паровым пузырем, который имеет конусообразную форму с "сухого" пятном в центре пузыря. Основной процесс испарения происходит в основании "сухого" пятна. Часть же теплоты передается в пузырь от перегретой жидкости с противоположной стороны относительно стенки.

Толщина микрослоя и радиус "сухого" пятна в процессе роста пузыря изменяются весьма незначительно за счет притока свежих порций жидкости, транспортируемых гравитационными и капиллярными силами, а также вследствие действия на пузырь подъемных сил. Силы инерции проявляются в начальной стадии развития пузыря и перед отрывом уменьшаются, а пузырь приобретает форму, близкую к сферической, сокращается площадь "сухого" пятна, значительно изменяется форма микрослоя. Отрыв пузыря определяется силами поверхностного натяжения и гидрогазодинамического сопротивления, причем оказывает влияние избыток жидкости, посредством которого создается недогрев и скорость потока стекающей жидкости.

В случае, когда паровой пузырь не достигает отрывного диаметра, а его верхняя граница касается внешней поверхности пористой структуры, происходит разрушение пузыря.

Механизм разрушения пузыря в тонкой пленке пористой структуры представлен в [1, 7]. Когда граница пузыря касается уровня жидкости в точке касания появляется отверстие, через которое пар вытекает из пузыря в паровой объем. В окрестности этой же точки возникают образующие определенной кривизны, которые начинают стягиваться в точку, уменьшая свободную поверхность под действием поверхностного натяжения, а отверстие в паровой полости будет продолжать расширяться в паровой объем. По поверхности жидкости начнет распространяться волна. Описанный процесс протекает за  $(10^{-7}-10^{-6})$  с, т.е. носит взрывной характер, как и в случае "рождения" парового зародыша. Это явление было использовано для проведения аналогии с взрывными процессами в эллиптических системах.

Во впадину, освободившуюся от пузыря, устремляется относительно холодная порция жидкости, а часть пара во впадине конденсируется вплоть до выравнивания температуры пара и жидкости на границе их соприкосновения (рисунок 1). В том случае, когда параметр избытка

жидкости  $\tilde{m} = \frac{m_{ж}}{m_n}$  будет велик, во впадине может конденсироваться весь пар, и ее пузыреобра-

зующее действие прекратиться. Приток теплоты, аккумулированной в стенке, приведет к новому циклу зарождения парового зародыша критического размера. За один цикл развития пузыря температура стенки под ним на стадии испарения микропленки и стадии нагрева холодной жидкости будет существенно изменяться, чем объясняется высокая интенсивность теплопередачи.

Модель развития паровой фазы в пористых структурах позволяет получить расчетные зависимости теплообмена для различных деталей и узлов теплоэнергоустановок [8-14].

**Модель капиллярно-пористого покрытия для предельного состояния поверхности нагрева.** Решение задачи термоупругости позволяет определить предельное состояние среды для капиллярных покрытий горной породы и металлической парогенерирующей поверхности [2].

Рассмотрим свободную со всех сторон 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.

Уравнение теплопроводности с начальными и граничными условиями запишется в виде:

$$a_{CT} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad T = 0, \quad \tau < 0; \quad \lambda_{CT} \frac{\partial T}{\partial z} = q, \quad z = +h, \quad \lambda_{CT} \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad z = -h.$$

где  $a_{CT}$ ,  $\lambda_{CT}$  – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности стенки;  $T$  – температура;  $\tau$  – время.

Распределение температуры по толщине зависит от теплофизических свойств материала, величины теплового потока и времени его подачи [2]:

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

где  $\mu = \lambda_{CT} / h$  – параметр;  $n$  – целые положительные числа;  $c, \rho$  – теплоемкость и плотность стенки.

Зная распределение температуры в пластине, можно вычислить термические напряжения растяжения и сжатия, возникающее в некоторый момент времени  $\tau$  на различной глубине от поверхности  $\delta_i$  ( $h = z_i$ ) при данном значении теплового потока  $q$ , поскольку пластина с переменной по толщине температурой находится в плосконапряженном состоянии [2].

**Расчет предельного состояния поверхности теплообмена.** Задаваясь предельными значениями напряжения сжатия, растяжения для пористого покрытия и металла, получаем функциональную зависимость теплового потока, требуемого для разрушения, от времени подачи и глубины проникновения. Кроме, того, приравнявая температуры на поверхности пластины к температуре плавления покрытия и металла, находим значения удельных тепловых потоков, необходимых для расплавления поверхностного слоя за различный промежуток времени их действия, т.е. в каждом конкретном случае имеем функциональные зависимости теплового потока от времени воздействия его на покрытие и металлическую поверхность:

– плавление поверхности

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

– создание предельных напряжений сжатия

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

– создание предельных напряжений растяжения

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

где  $\sigma_{пр.сж}$ ,  $\sigma_{пр.раст}$  – предельные термические напряжения сжатия и растяжения;  $E$  – модуль упругости Юнга;  $\alpha'$  – коэффициент линейного расширения;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

**Анализ результатов расчета предельного состояния поверхности теплообмена с пористым покрытием и сравнение их с экспериментом.** Для пластин, выполненных из кварцевых, гранитных и тешенитных покрытий, а также из меди и нержавеющей стали были рассчитаны функциональные зависимости величин  $q_1, q_2, q_3$ . Термомеханические характеристики покрытий и металлов представлены в работе [2]. Результаты расчетов для тешенитного покрытия показаны на рисунках 2, 3.

На рисунках 4, 5 представлен расчет удельного теплового потока, необходимого для разрушения единицы объема тешенитного покрытия. В зависимости от толщины  $\delta$  отрываемых частиц определена удельная энергия разрушения  $Q$ . Кривые имеют явно выраженные минимумы.

Экспериментальные исследования, проведенные скоростной кинокамерой СКС-1М, позволили измерить размеры отрывающихся частиц пористого покрытия  $\delta$  для фиксированной величины  $q$  и времени  $\tau$ . На рисунке 6 представлена кинограмма полета разрушаемого тешенитного покрытия, размеры которой дают хорошее совпадение с теоретической моделью (см. рисунки 4, 5).

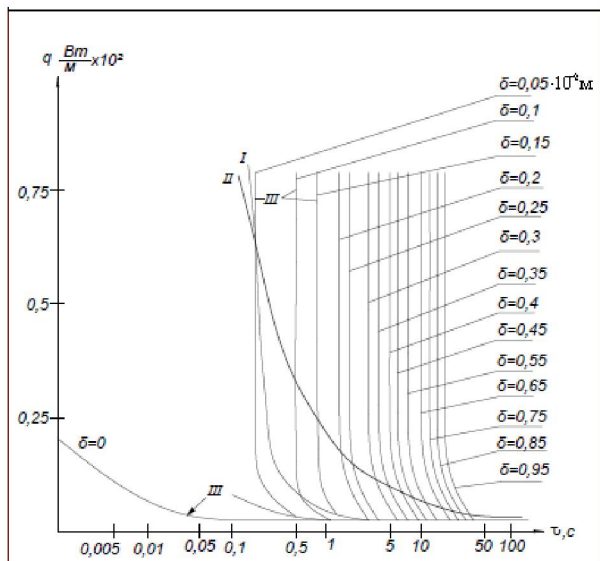


Рисунок 2 – Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия тепенитного покрытия в зависимости от времени действия  $\tau$  для различной толщины  $\delta$  отрывающихся частиц:  
 I – напряжения растяжения, достаточные для разрушений; II – оплавление поверхности;  
 III – разрушающие термонапряжения сжатия.  
 Кривые оплавления для меди и нержавеющей стали почти совпадают с кривой I в интервале времени  $\tau = (0,1-1)$  с

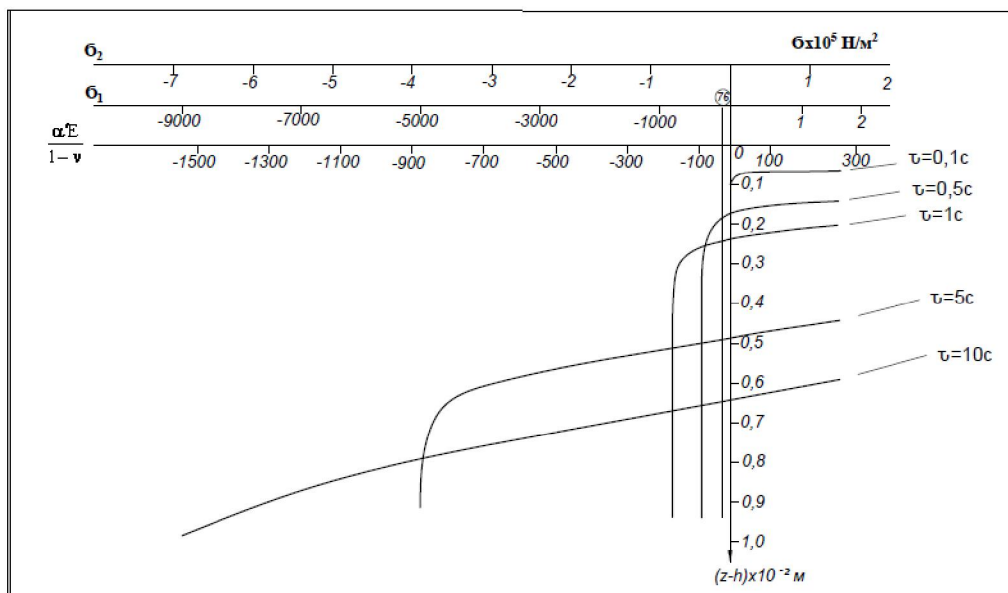


Рисунок 3 – Эпюры напряжений по толщине тепенитовой пластины при различных  $q$  и  $\tau$ :  $q_1 = 6,6 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>;  $q_2 = 1 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>; 76 – предел прочности на растяжение

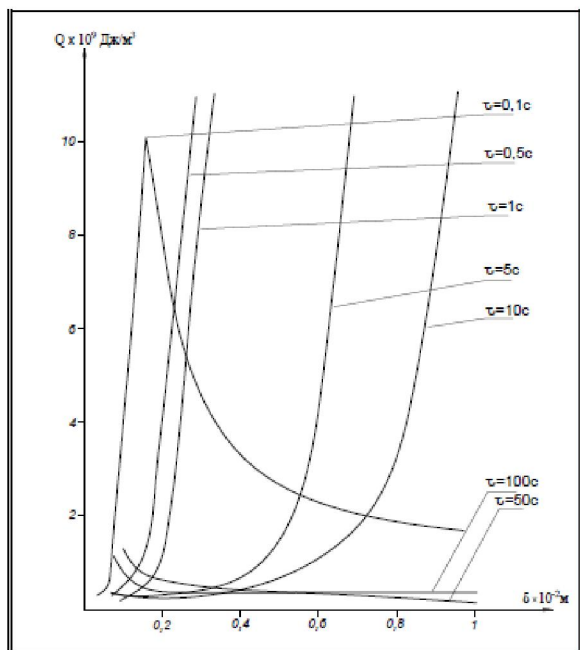


Рисунок 4 – Изменение удельной энергии разрушения покрытия из тешенита в зависимости от  $\delta$  для различных  $\tau$ ;  $Q = \frac{q \cdot \tau}{\delta}$

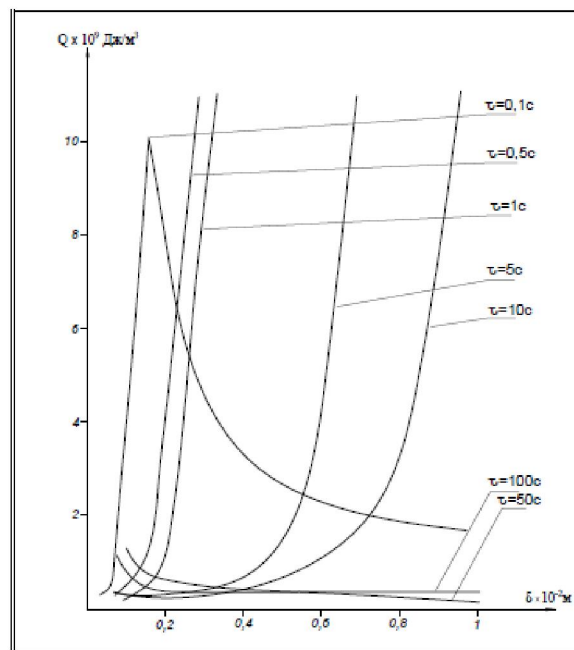


Рисунок 5 – Изменение удельной энергии разрушения покрытия из тешенита в зависимости от  $\delta$  для различных  $\tau$  при  $\sigma_{пр.сж.}/\sigma_{пр.паст.} = 2$ ;  $Q = \frac{q \cdot \tau}{\delta}$

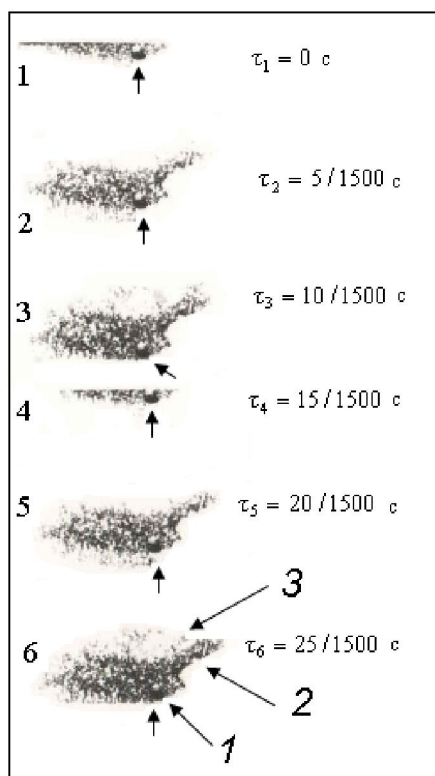


Рисунок 6 – Кинограмма полета частицы (шелухи) размером  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м при разрушении тешенитного покрытия горелкой ракетного типа ( $q = 1,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>):  
1 – частица;  
2 – ствол горелки;  
3 – пористое покрытие

**Заключение.** Модель развития паровой фазы в пористых покрытиях теплообменников позволяет объяснить механизм зарождения зародыша, его рост вплоть до момента разрушения. Предельное состояние пористой поверхности и металлической подложки может характеризоваться плавлением, разрушением от термических напряжений сжатия и растяжения. Расчеты выполнены, исходя из решения задачи термоупругости, и подтверждены визуальным наблюдением с помощью

камеры СКС-1М. Выявлены функциональные зависимости разрушающих тепловых потоков от времени подачи теплоты, величины разрушаемых частиц и глубины проникновения температурной волны в металлические поверхности. Предельное состояние пористых покрытий зависит от величины тепловой нагрузки, времени ее подачи и глубины проникновения тепловой волны.

#### 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., Genbach A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System // Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. – Dubrovnik, Yugoslavia, 1991, 23-28 June. – P. 639-644.
- [4] 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.
- [5] Поляев В.М., Генбач А.А. Теплообмен в пористой системе, работающей при совместном действии пористой и гравитационных сил // Теплоэнергетика. – 1993. – № 7. – С. 55-58.
- [6] 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.
- [7] Поляев В.М., Генбач А.А. Управление внутренними характеристиками кипения в пористой системе // Криогенная техника и кондиционирование: Сб. трудов МГТУ. – 1991. – С. 224-237.
- [8] Поляев В.М., Генбач А.А. Применение пористой системы в энергетических установках // Промышленная теплоэнергетика. – 1992. – № 1. – С. 40-43.
- [9] Поляев В.М., Генбач А.А. Расчет тепловых потоков в пористой системе охлаждения // Известия вузов. Авиационная техника. – 1992. – № 2. – С. 71-74.
- [10] Генбач А.А., Гнатченко Ю.А. Системы охлаждения теплонагруженного элемента детонационного горелочного устройства – Камеры сгорания, диффузора, конфузора // Вестник КазНТУ. – 2007. – № 4(61) июль. – С. 87-91.
- [11] Генбач А.А., Пионтковский М.С. Пористый пылегазоуловитель с управляемой геометрией микроканалов // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 2010. – № 4. – С. 59-61.
- [12] Jamialahmadi M., et al., Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures // Intern. J Heat Mass Transfer. – 51 (2008). – P. 2482-2493.
- [13] Ose Y., Kunnugi T. Numerical study on subcooled pool boiling // Progr in Nucl. Sci. and Technology. – 2, (2011). – P. 125-129.
- [14] Krepper E., et al. CFD modeling subcooled boiling-concept, validation and application to fuel assembly design // Nucl. Eng. and Design. – (2007). 237. – P. 716-731.

#### REFERENCES

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.A. The speed of growth of steam bubbles in porous structures, *Isvestiya vuzov. Mashinostroyeniye*, N 10, (1990), pp. 61-65 (in Russ.).
- [2] Polyayev V. M., et al., A limit condition of a surface at thermal influence, *Teplofizika vysokikh temperatur (TVT)*. 1991, Vol. 29, N 5, pp. 923-934 (in Russ.).
- [3] Polyayev V., Genbach 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. Management of heat transfer in porous structures, *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power engineering and transport*. 1992, Vol. 38, N 6, pp. 105-110. (in Russ.).
- [5] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat transfer in a porous system operating under the joint action of capillary and gravitational forces. *Thermal Engineering*. (1993), 7. pp. 55-58 (in Eng.).
- [6] 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, N 4, pp. 62-65 (in Russ.).
- [7] 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.).
- [8] Polyayev V.M., Genbach A.A. Use of porous system in power stations, *Power industry*, 1992. N 1. pp. 40-43 (in Russ.).
- [9] Polyayev V.M., Genbach A.A. Calculation of thermal streams in the porous cooling system, *News of higher education institutions. Aircraft equipment*, 1992, N 2, pp. 71-74 (in Russ.).
- [10] Genbach A.A., Gnatchenko Y.A. Cooling system of thermal-element-detonation burner. Combustion chambers, diffuser, confuser, *Vestnik KazNTU*, 2007, N 4 (61), July, pp. 87-91 (in Russ.).
- [11] Genbach A.A., Piontkovskiy M.C. Poristiy pylegazoulovitel s upravlayemoy geometriey mikrokanalov, *Energetika i toplivnye resursy Kazkhstana*, 2010, N 4, pp. 59-61 (in Russ.).
- [12] Jamialahmadi M., et al., Experimental and theoretical studies on subcooled flow boiling of pure liquids and multicomponent mixtures, *Intern. J Heat Mass Transfer*. 51 (2008), pp. 2482-2493 (in Eng.).
- [13] Ose Y., Kunnugi T. Numerical study on subcooled pool boiling, *Progr in Nucl. Sci. and Technology*. 2, (2011), pp. 125-129 (in Eng.).
- [14] Krepper E, et al., CFD modeling subcooled boiling-concept, validation and application to fuel assembly design, *Nucl. Eng. and Design*. (2007), 237, pp. 716-731 (in Eng.).

**А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова**

Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

**ЖЫЛУ АЛМАСТЫРҒЫШТАРДЫҢ КЕУЕКТІК ҚҰРЫЛЫМДАРЫНДА  
БУЛЫҚ ФАЗА ӨРБУІНІҢ ҮЛГІСІ ЖӘНЕ МЕХАНИЗМІ**

**Аннотация.** Кинематографиялық бақылаулар негізінде бу көпіршіктерінің пайда болу, даму және жойылу механизмін түсіндіретін жылу алмастырғыштардың кеуектік құрылымдарындағы булық фаза өрбуінің үлгісі жасалған. Аналитикалық үлгі жылулық серпімділік мәселесін шешу негізінде алынды, сонымен қатар, жылуды нашар және жақсы өткізгіш материалдар үшін шектік күйлері анықталған. Күйретуге қажетті жылу ағынының оның берілу уақытына және өту тереңдігіне функционалдық тәуелділігі алынды. Жабынның беткі қабатын балқытуға, және сығылу, немесе созылудың шектік кернеулері арқылы күйретуге қажетті жылу ағындары есептелді. Күйреп жатқан жабынның болшегінің ұшу кинограммасы оның өлшемін анықтады, және ол есептеудің теориялық үлгісімен үйлесімді болды.

**Түйін сөздер:** капиллярлы-кеуектік жүйе, булық фаза үлгісі, шектік күй, жылу алмастырғыштар, жылу ағыны.