

УДК 631.344 (088.8)

doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-21-35

Анализ кризиса теплопередачи в капиллярно-пористой системе охлаждения элементов теплоэнергоустановок

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев

Алматинский университет энергетики и связи

An Analysis of Heat Exchange Crisis in the Capillary Porous System for Cooling Parts of Heat and Power Units

A.A. Genbach, D.Y. Bondartsev

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications

Разработана модель динамики паровых пузырей, рождающихся на твердой поверхности в пористых структурах и парогенерирующей стенке (подложке). Модель основана на кинофотосъемке скоростной камерой SKS-1M. Отвод высоких тепловых потоков (до $2 \cdot 10^6$ Вт/м²) обеспечивается совместным действием капиллярных и массовых сил с применением интенсификаторов. Составлена аналитическая модель на основе теории термоупругости. Определено предельное состояние плохотеплопроводного пористого покрытия и металлической подложки. Рассчитаны тепловые потоки от времени спонтанного появления парового зародыша (10^{-8}) до времени разрушения материала ($10^2 \dots 10^3$ с), т. е. описан интервал времени от процесса релаксации до макропроцесса (разрушения). Размеры отрывающихся частиц в момент разрушения пористого покрытия, определенные в модели, дают хорошее совпадение с экспериментальными данными, полученными на оптическом стенде. Разрушение покрытия под действием сил сжатия наступает во времени значительно раньше, чем силы растяжения. Вероятнее разрушение будет происходить под действием сил сжатия и сдвига. Интервалы теплового потока, в пределах которых происходит такое разрушение, для кварцевого и гранитного покрытий, различаются. Каждой толщине отрывающейся частицы под действием сил сжатия соответствуют свои предельные значения тепловых потоков, которые находятся в пределах приведенных интервалов. С увеличением удельного теплового потока в нагреваемом слое и, следовательно, с 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. Представлены экспериментальные установки, условия проведения опытов, результаты кризиса теплообмена и предельного состояния поверхности. Выполнен расчет критических тепловых потоков. Исследованная капиллярно-пористая система, работающая при совместном действии капиллярных и массовых сил, имеет преимущество по сравнению с кипением в большом объеме, тонкоплочными испарителями и тепловыми трубами.

Ключевые слова: кризис теплопередачи, капиллярно-пористая структура, паровой пузырь, капиллярные силы, массовые силы, управление теплопередачей

A model of dynamics of the vapor bubbles that emerge on solid surfaces of porous structures and the steam generating wall (bottom layer) is presented in this work. The model was filmed and photographed by a high-speed camera SKS-1M. The discharge of high heat flows (up to $2 \cdot 10^6$ W/m²) was maintained by the joint action of capillary and mass forces with the help of

intensifiers. An analytical model was developed based on the theory of thermoelasticity. The limit state of the porous coating with poor thermal conductivity and the metal bottom layer was determined. Heat flows were calculated from the spontaneous birth of the vapour nucleus (10^{-8}) to the material destruction (10^2 – 10^3 s), thus the interval from the process of relaxation to the maximum process (destruction) was described. The size of the pullout particles determined in the model at the moment of porous coating destruction showed good congruence with the experimental data obtained at the optic stand. The destruction of coating under the compression forces occurs much earlier than the tension forces. It is probable that the destruction will happen under the impact of the compression and shear forces. The intervals of the heat flow when such destruction takes place are different for quartz and granite coating. Each thickness of the pullout particles under the impact of compression forces has its limit values of the heat flows, which are located within the mentioned intervals. As the specific heat flow in the heated layer increases and, therefore, the heating time decreases, the impact of the compression stresses increases as well. Despite the high resistance to compression, destruction from the compressive heat tension occurs in more favorable conditions immediately, and in diminutive volumes. Experimental testing units, test conditions, the outcome of the heat exchange crisis, the limit state of the surface and the calculation of critical heat flows are presented. The capillary porous system that works under the joint action of capillary and mass forces is studied. The system has advantages compared to pool boiling, thin-film evaporators and heat pipes.

Keywords: heat exchange crisis, capillary porous structure, vapor bubble, capillary forces, mass forces, control of heat exchange

Исследование термогидравлических характеристик процесса кипения жидкости в капиллярно-пористых структурах проведено с помощью скоростной киносъемки от начала взрывообразного зарождения паровой фазы [1] до момента ее разрушения. Это позволило разработать модели и механизм теплопередачи и получить простые расчетные выражения для различных режимов кипения [2] вплоть до кризисного состояния [3]. Управление теплообменом, реализованное путем совместного действия капиллярных и массовых сил [4–7], послужило основой создания различных теплообменных устройств [8–11].

Визуализация термического воздействия осуществлена с помощью голографии, что позволило исследовать предельное состояние хорошо- и плохотеплопроводных материалов в виде пористых структур и парогенерирующей поверхности. Управление теплообменом в пористых структурах проведено путем воздействия как на внутренние характеристики кипения, так и на интегральные величины [1–4].

Цель работы — дать сравнительную оценку предлагаемой новой капиллярно-пористой системы охлаждения, использующей совместное действие капиллярных и массовых сил, с традиционными системами: кипением в большом объеме, тонкопленочными испарителями и тепловыми трубами.

В работе [12] авторы, считая коррозионные явления аналогом капиллярно-пористой струк-

туры, выполнили сравнительный анализ методов расчета теплоотдачи по кипению воды с недогревом в вертикальных каналах [13, 14]. Однако исследования теплообмена по регулярной структурированной поверхности не проводилось, к тому же не ясна роль скорости и недогрева жидкости на кризис кипения в пористых покрытиях.

По мнению авторов работ [15, 16], поверхностное кипение на пористых поверхностях может влиять на развитие коррозии (а возможно, и эрозии), на прочность поверхности при схлопывании паровых пузырей (ПП) в недогретой жидкости. Поэтому необходимо исследовать теплообмен в поле массовых и капиллярных сил с учетом избытка жидкости.

Разработан ряд экспериментальных установок, позволяющих исследовать следующие интегральные характеристики теплопередачи: удельные тепловые потоки q , расходы жидкости и пара, распределение температурного поля по высоте и длине теплообменной поверхности [2, 4, 11]. Исследования проводятся в капиллярно-пористой системе охлаждения, которая может работать по принципу замкнутой испарительно-конденсационной схеме, либо быть разомкнутой.

Изучаются различные условия теплообмена: способ подвода охладителя, степень прижатия капиллярно-пористой структурой, способность подпитки структуры из микроартерий по высо-

те теплообменной поверхности, ориентация стенки относительно гравитационных сил, плоские, трубчатые и искривленные поверхности охлаждения, работа системы под давлением вплоть до кризисных явлений с пережогом стенки [17–19]. Для исследования механизма теплообмена привлекаются методы голографии [1, 20], обобщения подобных [2, 21] и аналогичных явлений [1, 3].

Представляет интерес дать сравнение интенсивности теплопередачи и предельного состояния поверхности (кризиса кипения) с тепловыми трубами [22, 23], а также оценить возможности механики разрушения поверхностей нагрева (охлаждения), покрытых капиллярно-пористыми структурами применительно к задачам прочности, ресурса и обоснования безопасной эксплуатации тепломеханического энергооборудования электростанций [24, 25]. Такая проблема уже давно назрела в связи с модернизацией и продлением срока эксплуатации газо- и паротурбинных электростанций.

В некоторых работах, посвященных термочувствительности, решающая роль при разрушении отводится термическим напряжениям растяжения, так как значение предела прочности на сжатие пористых покрытий, состоящих из горных пород, в 10 раз и более превышает предел прочности на растяжение, а в металле — в несколько раз. Возможно, что растягивающие напряжения вызывают лишь растрескивание покрытия и не определяют его шелушение, т. е. они являются решающими для термического разрушения, а основными разрушающими напряжениями служат сдвиговые [3].

В работах [3, 10] дана оценка значения напряжения сжатия. При возрастании температуры пористого покрытия за очень короткий промежуток времени динамические эффекты становятся весьма существенными, напряжения сжатия достигают больших значений, часто в несколько раз превышающих предел прочности материала на сжатие. Поэтому необходимо учесть его в механизме термического разрушения покрытий.

Необходимо выяснить, какой вид напряжения раньше других достигает предельных значений для подводимых тепловых потоков. Принципиально изменяется механизм разрушения для циклонных буров, когда температура разрушения будет составлять примерно 800 °С, что значительно меньше температуры плавления. Это может быть достигнуто изме-

нением аэродинамической структуры потока, где в десятки раз повышаются коэффициенты теплообмена [19], а энергия подводится к поверхности с пористым покрытием сверхзвуковым высокотемпературным пульсирующим факелом [3].

Экспериментальный метод исследования кризиса теплообмена. Для исследования кризиса теплообмена разработаны экспериментальные установки по определению интегральных (средних) теплообменных характеристик капиллярно-пористой системы охлаждения, а также методика измерений, устройство охлаждающего элемента с трубчатыми артериями, перфорированной прижимной пластиной и микроартериями. Исследованы различные факторы: высота теплообменной поверхности, давление в системе охлаждения вплоть до пережога стенки и фитилей (рис. 1, 2).

Подвод электрической энергии к основному нагревателю осуществлялся через свароч-

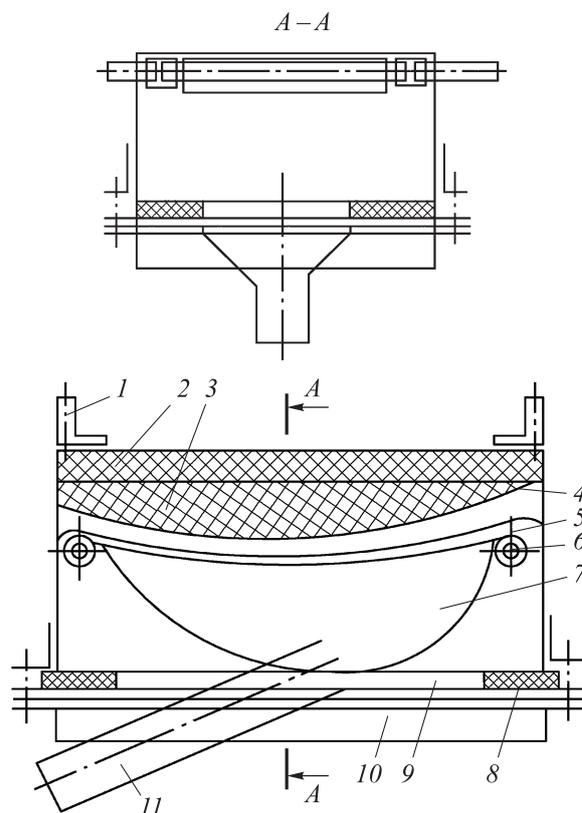


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с искривленной поверхностью, работающей под высоким давлением:

1 — электрод; 2 — асбестовая плита; 3 — асбестовая пушонка; 4 — нихром; 5 — сетчатая структура; 6 — труба подвода жидкости; 7 — паровой канал; 8 — прокладка; 9 — корпус; 10 — крышка; 11 — патрубком отвода пара

ный трансформатор ТСД-1000. Электрический ток, питающий нагреватель, измеряли по схеме с универсальным трансформатором типа УТТ-6М2 класса 0,2, а падение напряжения на нагревателе — вольтметром типа Д523 класса 0,5. Электрическая энергия на охранный нагреватель подавалась от регулятора напряжения типа РНО.

При изучении начала закипания жидкости и критических нагрузок использовался трансформатор тока ТСД-1000 с выходным напряжением холостого хода 71 В. Сила тока регулировалась в пределах 200...1200 А. Измерения температур жидкости и окружающей среды проводили ртутными термометрами ТЛ-4 со шкалой 0...50 °С и 50...100 °С и ценой деления 0,1 °С.

Для измерения температуры жидкости слива и пара использовали хромель-копелевые термопары, изготовленные из проволоки диаметром 0,1 · 10⁻³ м. Диаметр головки спая термопар

составлял 0,4 · 10⁻³ м. Электроды термопар, изолированные двухканальными соломками диаметром 1 · 10⁻³ м, закрепляли клеем БФ-2 внутри инъекционных игл диаметром 1,2 · 10⁻³ м.

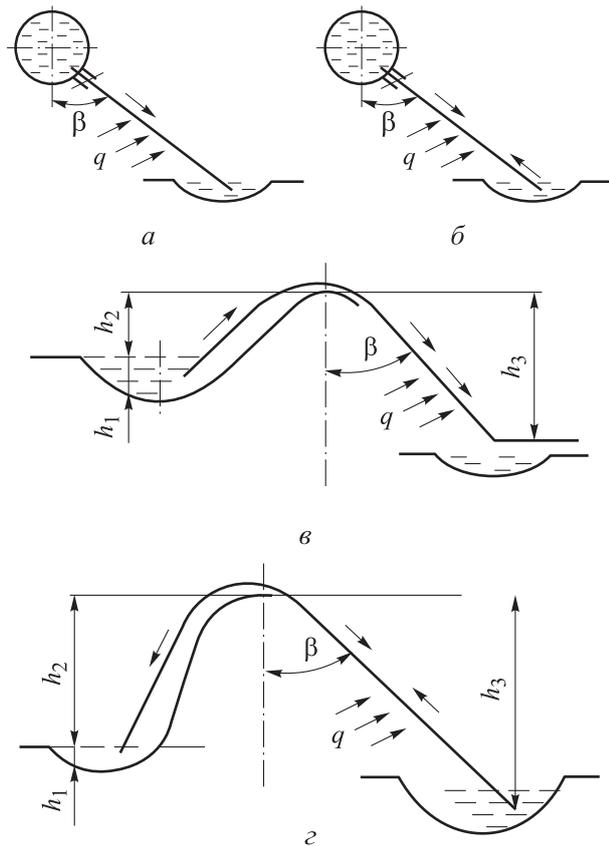
Чтобы измерить температуру стенки, к ней приваривали электрической дугой, образующейся во время разрядки конденсаторов, электроды термопар диаметром 0,2 · 10⁻³ м. Для этого нормально к поверхности стенки толщиной 2 · 10⁻³ м просверливали отверстия на глубину 1,9 · 10⁻³ м иглой диаметром 1,2 · 10⁻³ м с точностью ± 0,05 · 10⁻³ м.

Электроды термопар, изолированные фарфоровой солодкой диаметром 1,2 · 10⁻³ м, выводили по поверхности стенки между двумя слоями слюды с толщиной 0,05 · 10⁻³ м, приклеенной к поверхности нагревателя. Холодные концы термопар термостатировали в тающем льде. Электроды термопар соединяли с двумя двенадцатиточечными переключателями ПП-63 класса 0,05.

Для исключения влияния наведенных блуждающих токов на показания термопар установку и приборы заземляли. Расходы охлаждающей и циркуляционной жидкостей определяли тарированным объемным методом посредством электрических ротаметров типа РЭД с вторичным электронным прибором КСДЗ 43 класса 1. Расходы сливающейся жидкости и конденсата фиксировали с помощью мерной емкости со шкалой давления 0,5 · 10⁻³ л, а время наполнения — секундомером С-П-16 (с ценой деления 0,1 с).

Наибольшая возможная погрешность при определении расхода жидкости ротаметрами не превышала ±3 %, а объемным методом — ±2 %. Невязка баланса по подведенному току теплу и теплу, отведенному циркуляционной и избыточной воды с учетом потерь тепла через изоляцию, не превышала ±12 %, а по подведенному паром теплу в конденсаторе и теплу, отведенному циркуляционной воде, — ±11 %. Расхождение материального баланса между расходом охлаждающей жидкости, расходом слива и конденсата составляло не более ±10 %. Методика измерений и обработки опытных данных опубликованы в работах [2–4].

Для исследования кризиса кипения использовали установку, выполненную в виде огнеструйной горелки ракетного типа. Схема экспериментальной установки и условия проведения опытов приведены в статье [8]. Камеры сгорания со сверхзвуковыми соплами 1, 2 охлажда-



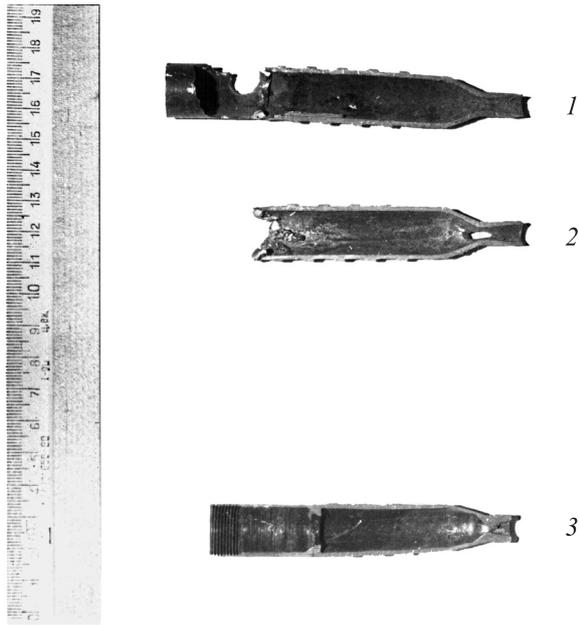


Рис. 3. Внешний вид разрушенных камер сгорания 1, 2 и сверхзвукового укороченного сопла с утолщенной стенкой 3 ракетных горелок

лись капиллярно-пористой системой, а укороченное сопло с утолщенной стенкой 3 — водяной (рис. 3).

Для исследования предельного состояния капиллярно-пористых покрытий, выполненных из естественных минеральных сред (гранитных, кварцевых и тешенитных покрытий) использовали термореактивную горелку. Тепловое воздействие осуществлялось сверхзвуковым (до

2000 м/с) высокотемпературным (до 2500 °С) пульсирующим факелом. Результаты разрушения камер сгорания и сверхзвуковых сопел ракетных горелок показаны на рис. 3. Разрушение элементов 1, 2 произошло в результате проникновения в них пузырей из-за плохой пайки хвостовой части камеры сгорания. В укороченном сопле разрушение начало проходить в начале эксплуатации на внешней поверхности перед критическим сечением.

Модель капиллярно-пористой структуры системы охлаждения. Рассмотрим рост ПП радиусом R в отдельной ячейке структуры (рис. 4). Полагаем, что тепловой поток q , определяющий рост ПП, поступает от поверхности нагрева q_1 с учетом «сухого» пятна (СП) через микрослой жидкости, находящийся под ПП. Часть теплоты q_2 подводится от перегретой жидкости, окружающей растущий ПП, поскольку перегрев жидкости в пористой структуре может достигать больших значений, что увеличивает запас энтальпии прилегающих слоев жидкости.

Охлаждающаяся жидкость транспортируется благодаря совместному действию капиллярных и массовых сил (перепаду давления) $\Delta p_{g+кап}$. СП в основании ПП описывается радиусом r , который в момент отрыва пузыря пропорционален радиусу СП $R_{с.п} = kR$ (k — коэффициент пропорциональности), причем микрослой жидкости под ПП образует угол α' со сторонами δ'_o и δ_o .

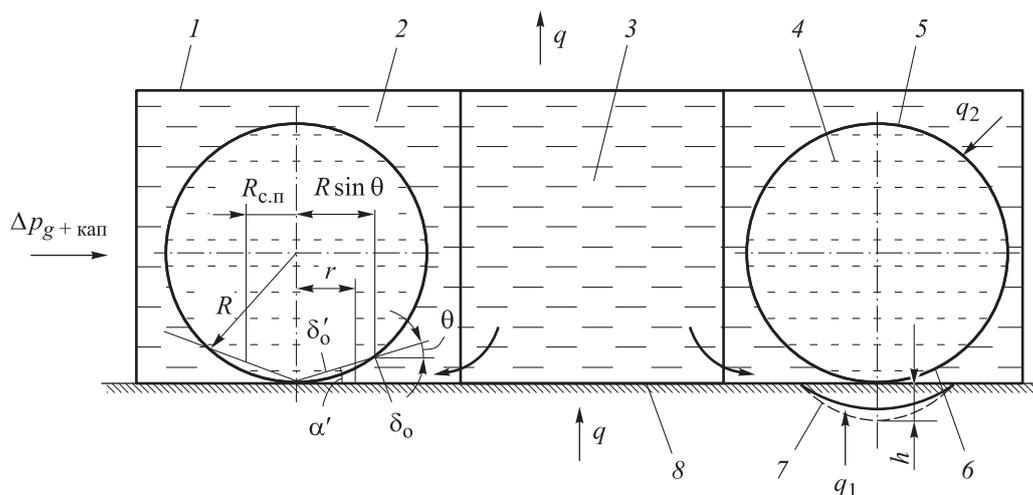


Рис. 4. Модель соприкосновения ПП с парогенерирующей поверхностью в ячейках генерации пара пористой структуры:
 1 — скелет пористой структуры; 2 — ячейка генерации пара; 3 — ячейка питания жидкостью; 4 — пар; 5 — фронт распространения легкой (паровой) фазы — межфазная поверхность; 6 — СП; 7 — фронт распространения температурной волны в объеме теплогенерирующей поверхности (нержавеющая сталь и медь (штриховая линия)); 8 — парогенерирующая стенка

ПП представляем в виде объема шарового сегмента, из которого следует вычесть усеченный конус, образованный микрослоем. Толщина микрослоя δ_0 , питающая ПП за счет его испарения, за время роста ПП будет постоянной величиной, так как капиллярные и гравитационные силы обеспечивают подтекание свежих порций охлаждающей жидкости к основанию пузыря.

В модели роста ПП происходит непосредственный переход от развитого пузырькового кипения к возможному наступлению кризиса, когда нарушится баланс сил и толщина микрослоя устремится к нулю ($\delta_0 \rightarrow 0$), что очень важно для исследования предельного состояния системы.

Межфазная поверхность 5 и парогенерирующая стенка 8 образуют средний за время роста ПП динамический угол θ . Так как задачу решали для не очень низких давлений, динамические процессы, имеющие место в начальной стадии развития ПП, не рассматривали. Поэтому силы вязкости и поверхностного натяжения также будут соизмеримы с инерционными силами, и их можно не принимать во внимание. Возникновение кризиса кипения связано с активным ростом размера СП в основании ПП.

Расчет кризиса кипения. Расчет критического теплового потока $q_{кр}$ применительно к модели, показанной на рис. 4, можно проводить в зависимости от недогрева жидкости и скорости потока по уравнениям работы [3]. Из них следует, что недогрев жидкости позволяет несколько расширить теплопередающие возможности в пористой системе охлаждения. Процессы теплопередачи протекают в тонких пористых структурах, поэтому даже незначительный избыток свободно стекающей пленки по внешней стороне структуры, определяемый избытком жидкости \tilde{m} при заданных гидростатическом давлении Δp_g и условном коэффициенте проницаемости K_v , создает ядро жидкости, из которого непрерывно будет подсасываться недогретый охладитель вследствие разности температур и капиллярных сил.

К тому же гравитационный потенциал способствует разрушению паровых конгломератов в пористой структуре, облегчая транспорт недогретой жидкости. Тепловой поток будет расходоваться дополнительно на подогрев подтекающих относительно холодных порций жидкости.

Избыток жидкости в пористой системе создает направленное движение потока, что приводит к деформации ПП в структуре, уменьшению их диаметра и росту частоты их образования [3]. При увеличении скорости потока возрастает энергия, затрачиваемая на вытеснение жидкости из пристенного пограничного слоя, а следовательно, увеличиваются критические скорость генерации пара и тепловой поток $q_{кр}$.

Однако при некотором значении скорости потока жидкости, определяемой ее критическим избытком $\tilde{m}_{кр}$, энергии, затрачиваемой на выдавливание жидкости из двухфазного пристенного слоя, будет недостаточно и возникает кризис теплопередачи. При этом увеличение критического потока будет достигнуто при больших расходах жидкости, что приведет к росту затрат энергии на привод нагнетательных машин.

По достижении определенного значения расходного влагосодержания $\bar{\varphi}'_{кр}$ скорость потока не будет способствовать росту величины $q_{кр}$, а в некоторых случаях может привести даже к ее снижению вследствие затруднения эвакуации пара из пристенной зоны.

Повышение скорости жидкостной пленки, прилегающей к стенке, из-за избытка жидкости \tilde{m} начнет уступать доминирующему влиянию падения среднего расходного влагосодержания $\bar{\varphi}'$ в той же зоне, которое в большей степени скажется на величине $q_{кр}$, даже уменьшая ее. Поэтому в каждом отдельном случае необходимо устанавливать оптимальное значение избытка жидкости \tilde{m} в зависимости от вида пористой структуры.

Гидродинамическая модель кризиса кипения жидкости в большом объеме технической поверхности не отражает влияния теплофизических свойств стенки, хотя оно имеет место. Это можно объяснить колебательным движением границы раздела пар — жидкость, что приводит к волнообразному движению поверхности нагрева.

Поэтому в отдельных местах такой поверхности следует ожидать резонансные явления, когда температура стенки будет снижаться вследствие большого отбора пара, что означает, что чем выше теплофизические свойства стенки, тем интенсивнее будет происходить отвод теплового потока q .

В пористых системах охлаждения практически для всех режимных и геометрических па-

раметрах при пузырьковом кипении воды средняя глубина проникновения температурной волны h_{cp} меньше толщины стенки $\delta_{ст}$. Поэтому в расчетные соотношения для критического теплового потока $q_{кр}$ в работах [1–4] толщина стенки $\delta_{ст}$ не введена.

Приведем расчетное уравнение для критического теплового потока $q_{кр}$ при давлении $p \geq 0,1$ МПа и ширине ячейки сетки на просвет (размере поры) $b_r > 0,28 \cdot 10^{-3}$ м:

$$q_{кр} = 0,0347\bar{r} \left[g(\rho_{ж} - \rho_{п})\rho_{п}\bar{D}_{о.кр} \right]^{0,5} \times \left(\frac{b_r}{b_{опт}} \right)^{0,3} \left(\frac{\delta_{ф}}{\delta_{о}} \right)^{0,5} (1 + \cos \beta)^{0,6}, \quad (1)$$

где \bar{r} — теплота парообразования; g — ускорение свободного падения; $\rho_{ж}$ и $\rho_{п}$ — плотность жидкости и пара; $\bar{D}_{о.кр}$ — средний размер парового конгломерата, отвечающий условию $\Delta T = \Delta T_{кр}$ (ΔT и $\Delta T_{кр}$ — перепад температур и его критическое значение), определяемый по формуле, приведенной в работе [3]; $b_{опт}$ — оптимальная ширина ячейки сетки на просвет, $b_{опт} = 0,14 \cdot 10^{-3}$ м; $\delta_{ф}$ — толщина структуры; $\delta_{о} = 0,18 \cdot 10^{-3}$ м.

Из уравнения (1) следует, что $q_{кр} \sim \bar{D}_{о.кр}^{0,5}$ при давлении $p \geq 0,1$ МПа и $q_{кр} \sim \bar{f}^{0,5}$ при $p < 0,1$ МПа, где \bar{f} — средняя частота генерации ПП.

Величина $\bar{D}_{о.кр}$ и критическое значение средней частоты генерации ПП $\bar{f}_{кр}$ зависят от теплофизических свойств теплоотдающей поверхности следующим образом:

$$\bar{D}_{о.кр} \sim K_{ст}^{-1}; \quad \bar{f}_{кр}^{-1} \sim K_{ст}^2.$$

Здесь $K_{ст}$ — коэффициент проницаемости стенки,

$$K_{ст} = 1 + \left[(\rho c \lambda)_{ж} / (\rho c \lambda)_{ст} \right]^{0,5},$$

где ρ , c и λ — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности; индекс «ж» помечает параметры жидкости, индекс «ст» — стенки.

Тогда для поверхностей, выполненных из меди и нержавеющей стали и покрытых сетчатыми структурами, имеем $q_{кр} = 1,07$ при давлении $p \geq 0,1$ МПа и $q_{кр} = 1,15$ при $p < 0,1$ МПа.

Материал стенки оказывает влияние на величину $q_{кр}$ посредством комплекса $(\rho c \lambda)_{ст}$, но однозначно так утверждать нельзя, поскольку практически невозможно выдержать одинаковые условия по чистоте обработки и микроструктуре.

При проектировании камеры сгорания и особенно сопла необходимо учитывать некоторый запас на толщину поверхности нагрева. Возникновение кризиса кипения раньше наступит на «тонких» нагревателях, так как в предкризисной области кипения начнет возрастать размер СП в основании ПП. Процесс теплообмена резко ухудшится, а температура стенки повысится. Поверхности, имеющие большую толщину, потребуют больше времени для их разогрева.

Для поверхностей с пористым покрытием этот вопрос особенно актуален, поскольку в них время роста ПП в десятки раз меньше, резко изменяются гидродинамические условия подпитки жидкостью и, следовательно, может увеличиться время пребывания пара у стенки, что исключит контакт жидкости с поверхностью теплообмена, несмотря на большой избыток жидкости \dot{m} .

Описанный процесс является предысторией развития кризиса кипения. Дальнейшее протекание процесса при прочих равных условиях определяется теплоаккумулирующей способностью нагрева стенки $(\rho c \lambda)_{ст}$. Когда эта величина будет подобрана большой, повысится вероятность затягивания кризиса кипения, растечки теплоты вдоль поверхности нагрева возрастут, и вновь создадутся благоприятные условия контакта жидкой фазы со стенкой. Увеличение же только толщины стенки в десять раз всего на несколько процентов повышает тепловой поток $q_{кр}$, причем это явление заметнее для высокотеплопроводных материалов и при давлении, большем атмосферного.

Одномерное уравнение нестационарной теплопроводности, описывающее динамику температурного поля в парогенерирующей стенке [3], оказалось полезным для рассмотрения предельного состояния поверхности при кризисе кипения, когда на стенке под ПП устанавливается СП критического размера. До этого момента протекал развитый пузырьковый процесс кипения, а в основании ПП находилось СП с радиусом $R_{с.п.}$

Как показали расчеты [10], за время $\tau \leq 5$ с тепловые потоки достигают значений $\sim 8 \cdot 10^7$ Вт/м² для меди и $1,3 \cdot 10^8$ Вт/м² для нержавеющей стали. Однако они будут экранированы кривыми плавления примерно через 0,01 с. В результате резкого увеличения градиентов температур в стенке возникают высокие термические напряжения растяжения.

Изучено влияние различных материалов и толщин стенки на время начала разрушения поверхности в момент кризиса кипения. С помощью методов голографии и фотоупругости определено наиболее опасное место в момент разрушения пористой поверхности [20, 21].

Выброс капель жидкости из ячеек пористой структуры [20] ухудшает интенсивность теплообмена при достижении некоторого граничного теплового потока. Подбором вида структуры это явление может быть сведено к минимуму. Наименьший выброс получен для однослойных сеток с ячейками более $0,28 \cdot 10^{-3}$ м. Возникающие ухудшенные режимы по механизму, видимо, аналогичны процессам, протекающим при движении пароводяной смеси в трубах, не имеющих пористого покрытия.

Этим режимам свойственен кризис сопротивления, когда на обогреваемом участке начинает уменьшаться сопротивление трения, что связано с сокращением расхода жидкости вследствие сильного выброса капель. В начальной стадии процесса выброса жидкости капли турбулизируют процесс. При критическом выбросе количество жидкости становится недостаточным для орошения теплообменной стенки.

Интенсивный капельный унос нарушает плавное течение жидкости по внешней поверхности сетки, наблюдается разрыв пленки, что также ухудшает притоки свежих порций относительно холодной жидкости к пристенному двухфазному пограничному слою. Подбор опытным путем пористых структур практически исключил выброс капель при таком тепловом потоке, что связано с балансированием сил трения жидкости в сетках и на их поверхности с каплями и паровым потоком в сетках и околосеточном пространстве.

В результате нарушения баланса действующих сил количество поступающей жидкости становится недостаточным, на поверхности нагрева появляются СП, температура стенки плавно повышается до некоторого значения и процесс протекает при температурных напорах (60...80) К. Пульсирующий режим снабжения стенки жидкостью не приводит к пережогу поверхности, хотя интенсивность теплопередачи снижается.

Однако возникают пульсации температуры стенки и связанные с ними термические разрушающие напряжения, сокращающие срок службы поверхности. Поэтому важно правильно оптимизировать вид пористой структуры и

не допускать высоких перегревов стенки относительно температуры жидкости.

На рис. 5 приведена сравнительная оценка результатов исследований капиллярно-пористой системы охлаждения (область 4) с кипением в большом объеме на поверхности без покрытия (кривая 1) [12–15], с тонкопленочными испарителями (область 3) [12] и тепловыми трубами (область 2) [16, 22, 23].

Система (область 4) расширяет предел отвода тепловых нагрузок, приближаясь к кипению жидкости в большом объеме, а в случае применения интенсификаторов она может отводить и значительные тепловые потоки (заштрихованная часть области 4). В качестве интенсификаторов теплообмена исследованы волнистые пористые элементы с газожидкостными дисперсоидами и оптимизированной капиллярно-пористой структурой; вибрирующие высокотеплопроводные ответвления с гибким турбулизатором.

Таким образом, проведены исследования кризиса теплообмена в зависимости от недогрева и скорости потока, теплофизических свойств поверхности нагрева и выброса капель жидкости из пористой структуры. Определены принципы конструирования камер сгорания и

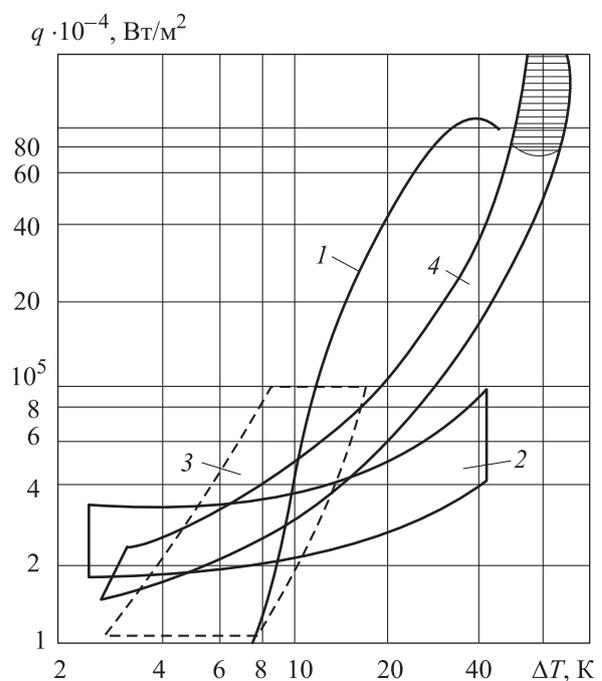


Рис. 5. Зависимость плотности теплового потока q от перегрева стенки ΔT при давлении $p = 0,1$ МПа: 1 — кипение в большом объеме на поверхности без покрытия; 2 — работа тепловых труб; 3 — работа тонкопленочных испарителей; 4 — работа исследованной капиллярно-пористой системы охлаждения

сопел и расчет критического теплового потока. Исследования имеют практическое значение в области предельного состояния парогенерирующей поверхности, защищаемой охлаждением от пережога.

Модель капиллярно-пористого покрытия для предельного состояния поверхности нагрева. Для модели ПП, показанной на рис. 4, рассмотрим решение задачи термоупругости, чтобы определить предельное состояние среды на примере хрупкого покрытия из горных пород и металлической парогенерирующей поверхности (подложки).

Для термического разрушения пористого покрытия оценим влияние удельного теплового потока q , подводимого к поверхности, и времени его воздействия τ на создание разрушающих напряжений, гранулометрический состав шелухи δ (отрывающихся частиц при разрушении), а для металла — глубину проникновения температурного возмущения с разрушением поверхности 7 (см. рис. 4).

Рассмотрим свободную со всех сторон пластину (произвольной формы в плане) толщиной $2h$. Начиная с момента времени $\tau = 0$ к поверхности $z = +h$ подводится постоянный удельный тепловой поток q . Нижняя поверхность $z = -h$ и боковые края пластины теплоизолированы. Уравнения для коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{ст}$ и теплопроводности стенки $\lambda_{ст}$ с граничными и начальными условиями имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \alpha_{ст} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} &= \frac{\partial T}{\partial \tau}, T = 0, \tau < 0; \\ \lambda_{ст} \frac{\partial T}{\partial z} &= q, z = +h; \\ \lambda_{ст} \frac{\partial T}{\partial z} &= 0, z = -h, \end{aligned} \quad (2)$$

где T — температура пластины.

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

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

где $M = \lambda_{ст}/h$; n — целые положительные числа.

Зная распределение температуры в пластине, находим термические напряжения растяжения и сжатия, возникающие в некоторый момент времени τ на различной глубине от ее поверхности $\delta_i (h = z_i)$ при заданном значении теплового потока $q (q = \text{const})$. Пластина с переменной по толщине температурой находится в плосконапряженном состоянии.

Решение системы уравнений (2). Задавая предельными значениями напряжения сжатия $\sigma_{пр.сж}$ и растяжения $\sigma_{пр.раст}$ для всех рассматриваемых покрытий и металлов, получаем функциональную зависимость теплового потока q_i , необходимого для разрушения поверхностного слоя 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. Таким образом, в каждом конкретном случае имеем функциональные зависимости теплового потока q_i от времени его воздействия на среду:

- для плавления поверхности

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{T_{пл}}{\frac{M}{2(c\rho\lambda)_{ст}} \tau + \frac{2}{3M} - \Sigma_1}, \\ \Sigma_1 &= \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\rho\lambda)_{ст}} \tau\right] \cos n\pi; \end{aligned}$$

- для создания предельных напряжений сжатия

$$\begin{aligned} q_2 &= \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.сж}}{\frac{\alpha E}{\frac{M}{2(c\lambda\rho)_{ст}} \tau + \frac{(3z^2)/h^2 + (6z)/h - 1}{12M} - \Sigma_2}}, \\ \Sigma_2 &= \frac{4}{\pi^2 M} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 M^2}{4(c\lambda\rho)_{ст}} \tau\right] \times \\ &\times \cos\left[\frac{n\pi}{2}\left(\frac{z}{h} + 1\right)\right]; \end{aligned}$$

- для создания предельных напряжений растяжения

$$q_3 = \frac{(1-\nu)\sigma_{пр.раст}/(\alpha E)}{M\tau/[2(c\lambda\rho)_{ст}]},$$

где α — коэффициент линейного расширения; E — модуль Юнга; $T_{пл}$ — температура плавления; ν — коэффициент Пуассона.

Для пластин, выполненных из кварца, гранита, тешенита и металла, функциональные зависимости q_1 , q_2 , q_3 от времени τ рассчитывались на персональном компьютере.

Механизм и расчет предельного состояния поверхности теплообмена. В случае кварцевого покрытия тепловые потоки рассчитаны для весьма широкого интервала времени $\tau = 10^{-8} \dots 10^{-3}$ с. Нижний предел этого интервала (10^{-8} с) — время релаксации.

Для интервала указанного интервала времени зависимости для q_1 и q_2 , представляющие собой кривые гиперболического типа в координатах (q, τ) , теряют физический смысл, так как в данной задаче за основу принято уравнение теплопроводности. Для учета микропроцессов в него необходимо добавить член типа $K' \partial^2 T / \partial \tau^2$, где K' — коэффициент, учитывающий нелинейную зависимость от температуры.

Так как терморазрушение — макропроцесс, принимаем его протекающим за время $5 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^3$ с. Зависимость теплового потока q_2 от времени их воздействия для пластин с тешенитным покрытием приведены на рис. 6. Там же показаны следующие кривые: I — напряжений растяжения, достаточных для разрушения покрытия; II — оплавления поверхности; III — разрушающих термонапряжений сжатия. Сле-

дует отметить, что для пластин с покрытием из меди и нержавеющей стали кривые оплавления поверхности почти совпадают с кривой напряжений растяжения для пластин из тешенита в интервале времени $\tau = 0,1 \dots 1,0$ с.

При условии разрушения покрытий 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 толщинами $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i$.

Максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия для покрытий из кварца и гранита, составляет $(0,25 \dots 0,30) \cdot 10^{-2}$ м (см. рис. 6). Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с толщинами $\delta > 0,10 \cdot 10^{-2}$ м для больших тепловых потоков и малых τ , экранируются кривой плавления II, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени — кривой растяжения I. Причем кривая плавления покрытия из кварца проходит значительно выше, чем таковая у гранита, что объясняет его устойчивое хрупкое разрушение.

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения (рис. 7) представляет собой эпюры напряжений внутри кварцевой пластины для различных интервалов времени τ от начала рассматриваемого процесса. При малом времени ($\tau \approx 0,1$ с) возникают только напряжения сжа-

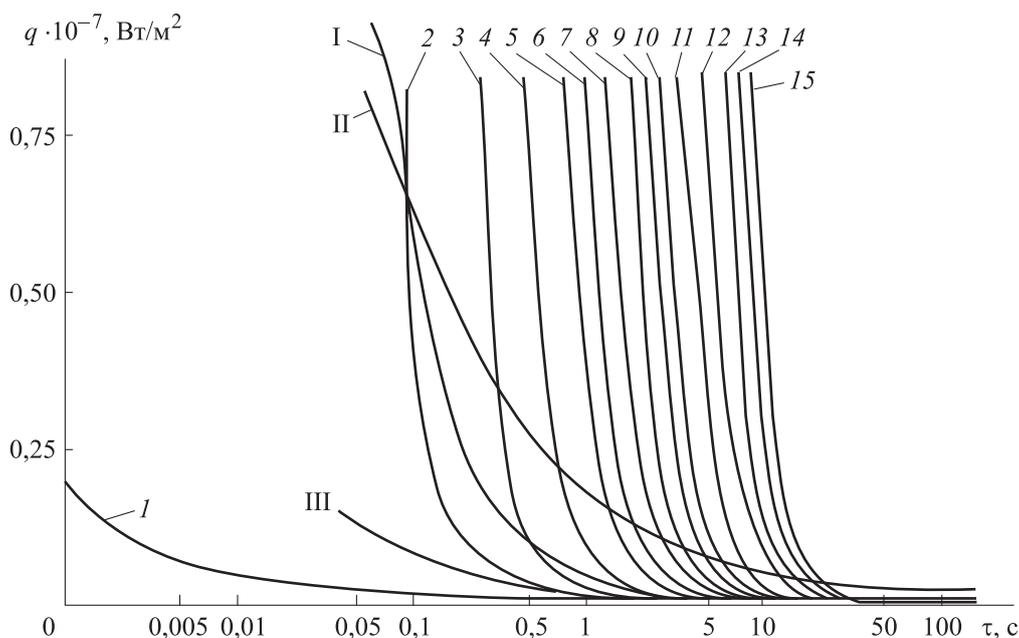


Рис. 6. Зависимость теплового потока q_2 , вызывающего разрушение покрытия пластины из тешенита сжатием, от времени его воздействия τ при толщине отрывающихся частиц $\delta = 0$ (1), 0,5 (2), 0,1 (3), 1,5 (4), 2,0 (5), 2,5 (6), 3,0 (7), 3,5 (8), 4,0 (9), 4,5 (10), 5,5 (11), 6,5 (12), 7,5 (13), 8,5 (14), 9,5 мм (15)

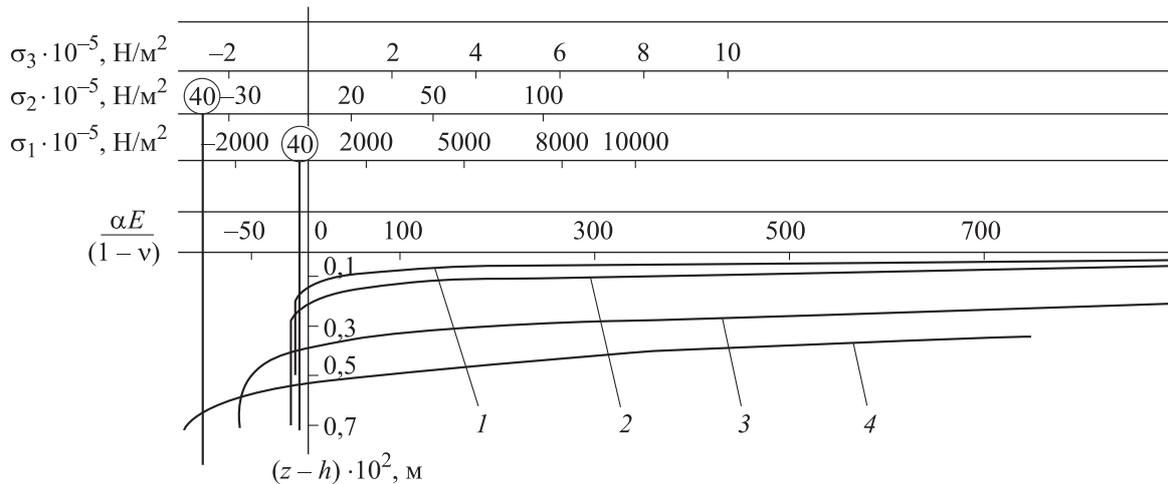


Рис. 7. Эпюры напряжений по толщине кварцевой пластины при тепловых потоках $q_1 = 8,8 \cdot 10^7$ Вт/м², $q_2 = 0,12 \cdot 10^7$ Вт/м², $q_3 = 0,008 \cdot 10^7$ Вт/м² для различных интервалов времени: 1 — $\tau = 0,05$ с; 2 — $\tau = 0,10$ с; 3 — $\tau = 0,50$ с; 4 — $\tau = 1,00$ с; 40 — предел прочности на растяжение

тия. Начиная с $\tau \approx 0,5$ с в некоторой области $\Delta(h - z_i)$ напряжение сжатия переходит в напряжение растяжения, причем для неодинаковых интервалов времени они находятся на разной глубине от поверхности пластины.

В области перехода напряжения сжатия в напряжение растяжения, по-видимому, будут наблюдаться наибольшие напряжения сдвига слоев покрытия. Во времени сдвиговые напря-

жения достигают предельных значений позже разрушающих напряжений сжатия и, очевидно, раньше максимальных напряжений растяжения. Разрушение от сжатия может происходить как на некоторой глубине (до $0,3 \cdot 10^{-2}$ м²), так и в малом поверхностном слое δ за весьма короткий промежуток времени τ .

На рис. 8 приведена расчетная зависимость удельной энергии разрушения единицы объема

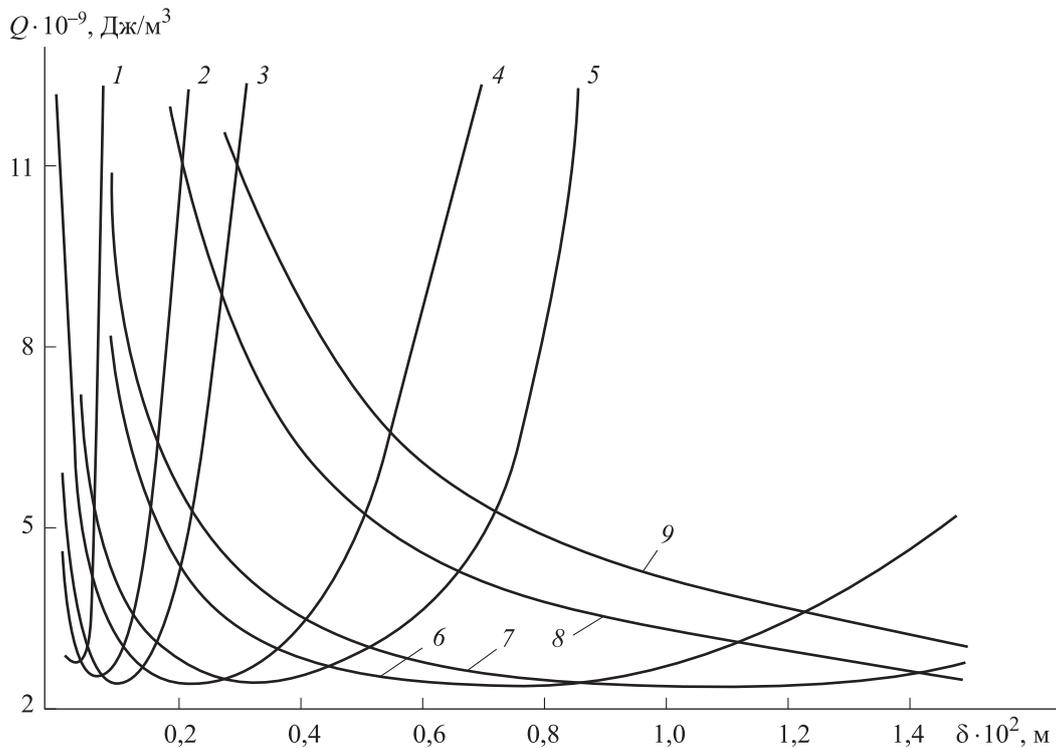


Рис. 8. Зависимость удельной энергии разрушения Q гранитного покрытия от толщины отрывающихся частиц δ при $\tau = 0,1$ (1), 0,5 (2), 1 (3), 5 (4), 10 (5), 50 (6), 100 (7), 500 (8) и 1000 с (9)

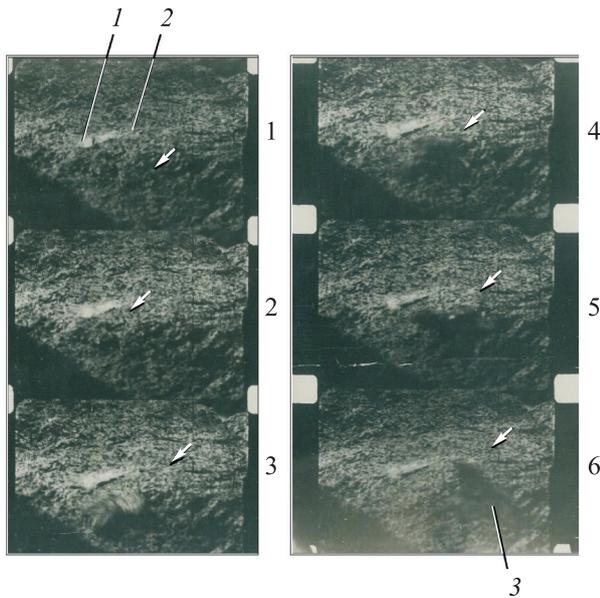


Рис. 9. Фрагмент скоростной киносъемки процесса разрушения тешенита огнеструйной горелкой ракетного типа при удельном тепловом потоке $q = 1,2 \cdot 10^6$ Вт/м²:

1 — капиллярно-пористое покрытие; 2 — частица (шелушка), оторванная от покрытия; 3 — линия разрушения «равных возможностей»

гранитного покрытия Q от толщины δ отрывающихся частиц ($Q = q\tau/\delta$). Кривые имеют явно выраженные минимумы.

На рис. 9 показан фрагмент скоростной киносъемки процесса разрушения тешенита огнеструйной горелкой ракетного типа при удельном тепловом потоке $q = 1,2 \cdot 10^6$ Вт/м². Время отрыва частиц тешенитного покрытия 0,11...0,47 с, определенное скоростной киносъемкой камерой СКС-1М, хорошо согласуется с данными, приведенными на рис. 6 ($\tau = 0,1$ с и более). Время образования шелушки размером $2,5 \cdot 10^{-3}$ м составляет 2,2 с. На рисунке четко видна линия разрушения «равных возможностей» 3 (показана стрелкой). Получена следующая кинограмма полета частиц во времени (от τ_1 до τ_6): 1 — 0 с; 2 — 5/1500 с; 3 — 10/1500 с; 4 — 15/1500 с; 5 — 20/1500 с; 6 — 25/1500 с.

Литература

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Methods of Monitoring Energy Processes, Experimental Thermal and Fluid Science, International of Thermodynamics. Experimental Heat Transfer and Fluid Mechanics. 7th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development, New York, USA, Avenue of the Americas, 1995, vol. 10, pp. 273–286.
- [2] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces. *Thermal Engineering*, 1993, vol. 40, is. 7, pp. 551–554.

Выводы

1. Разработана модель генерации ПП на твердой поверхности с пористым покрытием, в основу которой положены кинофотографические наблюдения за внутренними характеристиками кипения жидкости. Высокая форсировка теплопередачи обеспечивается комбинированным действием капиллярных и массовых сил.

2. Для такой модели решена задача термоупругости и определено предельное состояние системы вида хорошо- и плохотеплопроводные материалы (пористое покрытие на металлической подложке).

3. Определены тепловые потоки, подводимые к поверхности, время их воздействия на создание разрушающих напряжений, размеры отрывающихся частиц и глубина проникновения температурной волны в подложку. Тепловые потоки рассчитаны в зависимости от времени взрывообразного появления парового зародыша (10^{-8} с), т. е. от продолжительности релаксации до времени, описывающего макропроцесс.

4. Установлена взаимосвязь напряжений в процессе разрушения только напряжением сжатия, плавлением либо напряжением растяжения. Размеры отрывающихся частиц подтверждены скоростной киносъемкой.

5. Представлены экспериментальная установка, условия проведения опытов, результаты кризиса теплообмена и предельного состояния поверхности.

6. Проведен расчет критических и предельных тепловых нагрузок.

7. Дана сравнительная оценка исследованной капиллярно-пористой системы с кипением в большом объеме, с тонкопленочными испарителями и тепловыми трубами с учетом применения интенсификаторов теплопередачи.

8. В дальнейшем требуется расширить исследования по другим естественным минеральным средам.

- [3] Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А. Предельные состояния поверхности при термическом воздействии. *Теплофизика высоких температур*, 1991, т. 29, № 5, с. 923–934.
- [4] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System. *Proceedings, 2nd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Dubrovnik, Yugoslavia, 1991, pp. 639–644.
- [5] Поляев В.М., Генбач А.Н., Минашкин Д.В. Процессы в пористом эллиптическом теплообменнике. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1991, № 4–6, с. 73–77.
- [6] Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Экспериментальный метод исследования кризиса теплопередачи в капиллярно-пористых структурах для элементов котлотурбинной техники. *Тяжелое машиностроение*, 2018, № 3, с. 32–38.
- [7] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Experimental method of investigation of the heat transfer crisis in a capillary-porous cooling system. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2018, vol. 2(428), pp. 81–88.
- [8] Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Разрушение капиллярно-пористых покрытий при интенсивном тепломассопереносе. *Деформация и разрушение материалов*, 2018, № 10, с. 40–46.
- [9] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliev I.K. Heat transfer crisis in the capillary-porous cooling system of elements of heat and power installations. *Thermal Science*, 2019, vol. 23, iss. 2, pp. 849–860, doi: 10.2298/TSCI171016139G
- [10] Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Предельные тепловые потоки и термические напряжения в пористых покрытиях теплоэнергоустановок. *Труды Академэнерго*, 2018, № 1, с. 73–80.
- [11] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in Porous Structures. *Proceedings, Russian Academy of Sciences, Power Engineering and Transport*, 1992, vol. 38, is. 6, pp. 105–110.
- [12] Jamialahmadi M., Müller-Steinhagen H., Abdollahi H., Shariati A. Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, iss. 9–10, pp. 2482–2493, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052
- [13] Ose Y., Kunugi T. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling. *ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference*, 2011, vol. 2, pp. 125–129.
- [14] Krepper E., Končar B., Egorov Y. CFD Modeling Subcooled Boiling—Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, vol. 237, iss. 7, pp. 716–731, doi: 10.1016/j.nucengdes.2006.10.023
- [15] Овсяник А.В. *Моделирование процессов теплообмена в кипящих жидкостях*. Гомель, ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012. 284 с.
- [16] Алексеик О.С., Кравец В.Ю. Физическая модель процесса кипения на пористой поверхности в ограниченном пространстве. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2013, т. 64, № 4/8, с. 26–31.
- [17] Поляев В.М., Генбач А.А. Анализ законов трения и теплообмена в пористой структуре. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1991, № 4, с. 86–96.
- [18] Поляев В.М., Генбач А.А., Бочарова И.Н. Влияние давления на интенсивность теплообмена в пористой системе. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1992, № 4–6, с. 68–72.
- [19] Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы. *Известия высших учебных заведений. Энергетика*, 1991, № 12, с. 97–101.
- [20] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliev I.K. Investigation of a high-forced cooling system for the elements of heat power installations. *Journal of machine Engineering*, 2018, vol. 18, is. 2, pp. 106–117, doi: 10.5604/01.3001.0012.0937
- [21] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliev I.K. Modelling of capillary coatings and heat exchange surfaces of elements of thermal power plants. *Bulgarian Chemical Communications*, 2018, vol. 50, special is. G, pp. 133–139.
- [22] Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. *Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратах*. Москва, Машиностроение, 1998. 168 с.

- [23] Ковалев С.А., Соловьев С.Л. *Испарение и конденсация в тепловых трубах*. Москва, Наука, 1989. 112 с.
- [24] Kupetz M., Jeni Heiew E., Hiss F. Модернизация и продление срока эксплуатации паротурбинных электростанций в Восточной Европе и в России. *Теплоэнергетика*, 2014, № 6, с. 35–43, doi: 10.1134/S0040363614060058
- [25] Гринь Е.А. Возможности механики разрушения применительно к задачам прочности, ресурса и обоснования безопасной эксплуатации тепломеханического энергооборудования. *Теплоэнергетика*, 2013, № 1, с. 25–32.

References

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Methods of Monitoring Energy Processes, Experimental Thermal and Fluid Science, International of Thermodynamics. *Experimental Heat Transfer and Fluid Mechanics. 7th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development*, New York, USA, Avenue of the Americas, 1995, vol. 10, pp. 273–286.
- [2] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces. *Thermal Engineering*, 1993, vol. 40, iss. 7, pp. 551–554.
- [3] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Limiting surface conditions under thermal influence. *High Temperature*, 1991, vol. 29, iss. 5, pp. 923–934 (in Russ.).
- [4] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System. *Proceedings, 2nd World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Dubrovnik, Yugoslavia, 1991, pp. 639–644.
- [5] Polyayev V.M., Genbach A.N., Minashkin D.V. Processes in a porous elliptical heat exchanger. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1991, no. 4–6, pp. 73–77 (in Russ.).
- [6] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Experimental method of investigation of heat transfer crisis in capillary-porous structures for elements of boiler-turbine equipment. *Tyazheloye mashinostroyeniye*, 2018, no. 3, pp. 32–38 (in Russ.).
- [7] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Experimental method of investigation of the heat transfer crisis in a capillary-porous cooling system. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 2018, vol. 2(428), pp. 81–88.
- [8] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Fracture of capillary-porous coatings in case of intensive heat-and-mass transfer. *Russian metallurgy*, 2018, no. 10, pp. 40–46 (in Russ.).
- [9] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliev I.K. Limit thermal fluxes and thermal stresses in porous coatings of a heat-energy installation. *Thermal Science*, 2019, vol. 23, iss. 2, pp. 849–860, doi: 10.2298/TSCI171016139G
- [10] Genbach A.A., Islamov F.A. Limit thermal fluxes and thermal stresses in porous coatings of a heat-energy installation. *Transactions of Academenergo*, 2018, no. 1, pp. 73–80 (in Russ.).
- [11] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in Porous Structures. *Proceedings, Russian Academy of Sciences, Power Engineering and Transport*, 1992, vol. 38, iss. 6, pp. 105–110 (in Russ.).
- [12] Jamialahmadi M., Müller-Steinhagen H., Abdollahi H., Shariati A. Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, iss. 9–10, pp. 2482–2493, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052
- [13] Ose Y., Kunugi T. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling. *ASME/JSME 2011 8th Thermal Engineering Joint Conference*, 2011, vol. 2, pp. 125–129.
- [14] Krepper E., Končar B., Egorov Y. CFD Modeling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design. *Nuclear Engineering and Design*, 2007, vol. 237, iss. 7, pp. 716–731, doi: 10.1016/j.nucengdes.2006.10.023
- [15] Ovsyanik A.V. *Modelirovaniye protsessov teploobmena v kipyashchikh zhidko-styakh* [Modelling of Processes of Heat Exchange at Boiling Liquids]. Gomel, GSTU im. P.O. Sukhogo publ., 2012. 284 p.
- [16] Alekseik O.S., Kravets V.Yu. Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2013, 64, 4/8, pp. 26–31.

- [17] Polyayev V.M., Genbach A.A. Analysis of the laws of friction and heat transfer in a porous structure. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 1991, no. 4, pp. 86–96 (in Russ.).
- [18] Polyayev V.M., Genbach A.A., Bocharova I.N. Effect of pressure on heat transfer intensity in a porous system. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1992, no. 4–6, pp. 68–72 (in Russ.).
- [19] Polyayev V.M., Genbach A.A. The field of application of porous systems. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 1991, no. 12, pp. 97–101 (in Russ.).
- [20] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliev I.K. Investigation of a high-forced cooling system for the elements of heat power installations. *Journal of machine Engineering*, 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 106–117, doi: 10.5604/01.3001.0012.0937
- [21] Genbach A.A., Bondartsev D.Yu., Iliev I.K. Modelling of capillary coatings and heat exchange surfaces of elements of thermal power plants. *Bulgarian Chemical Communications*, 2018, vol. 50, special iss. G, pp. 133–139.
- [22] Polyayev V.M., Mayorov V.A., Vasil'yev L.L. *Gidrodinamika i teploobmen v poristyykh elementakh konstruksiy letatel'nykh apparatakh* [Hydrodynamics and heat transfer in porous structural elements of aircraft]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1998. 168 p.
- [23] Kovalev S.A., Solov'yev S.L. *Ispareniye i kondensatsiya v teplovykh trubakh* [Evaporation and condensation in heat pipes]. Moscow, Nauka publ., 1989. 112 p.
- [24] Kupetz M., Jeni Heiew E., Hiss F. Modernization and extension of steam turbine power plants in Eastern Europe and Russia. *Teploenergetika*, 2014, no. 6, pp. 35–43 (in Russ.), doi: 10.1134/S0040363614060058
- [25] Grin' E.A. Possibilities of fracture mechanics in relation to the problems of strength, resource and justification of safe operation of thermal mechanical power equipment. *Teploenergetika*, 2013, no. 1, pp. 25–32 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.06.2019

Информация об авторах

ГЕНБАЧ Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Тепловые энергетические установки». Алматинский университет энергетики и связи (050013, Казахстан, Алматы, ул. Байтурсынова, д. 126, e-mail: natalja-genbach@rambler.ru).

БОНДАРЦЕВ Давид Юрьевич — доктор философии, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки». Алматинский университет энергетики и связи (050013, Казахстан, Алматы, ул. Байтурсынова, д. 126, e-mail: d.bondartsev@inbox.ru).

Information about the authors

GENBACH Aleksandr Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Thermal Power Plants. Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynov St., Bldg. 126, e-mail: natalja-genbach@rambler.ru).

BONDARTSEV David Yurievich — Doctoral PhD, Department of Thermal Power Plants. Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, Baitursynov St., Bldg. 126, e-mail: d.bondartsev@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Анализ кризиса теплопередачи в капиллярно-пористой системе охлаждения элементов теплоэнергоустановок. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 12, с. 21–35, doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-21-35

Please cite this article in English as:

Genbach A.A., Bondartsev D.Y. An Analysis of Heat Exchange Crisis in the Capillary Porous System for Cooling Parts of Heat and Power Units. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 12, pp. 21–35, doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-21-35