

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА ПОКРЫТОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРОЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ТЕПЛОЭНЕРГОУСТАНОВОК

---

---

**Аннотация.** Создана модель динамики паровых пузырей, рождающихся на твердой поверхности в пористых структурах и парогенерирующей стенке (подложке). Модель основана на кино-фотосъемке скоростной камерой СКС-1М. Составлена аналитическая модель на основе теории термоупругости. Определено предельное состояние плохотеплопроводного пористого покрытия и металлической подложки. Тепловые потоки рассчитывались от времени спонтанного появления парового зародыша ( $10^{-8}$ ) до времени разрушения материала ( $10^2 + 10^3$  с), т.е. описан интервал времени от процесса релаксации до макропроцесса (разрушения).. Вероятнее, что разрушение будет происходить под действием сил сжатия и сдвига. Интервалы теплового потока, в пределах которых происходит разрушение для кварцевого покрытия  $q_{\max} \approx 7 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>,  $q_{\min} \approx 8 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> и для граничного  $q_{\max} \approx 1 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>,  $q_{\min} \approx 21 \times 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. С увеличением удельного теплового потока в нагреваемом слое и, следовательно, уменьшением времени нагрева, растет роль напряжений сжатия. Несмотря на высокую сопротивляемость сжатию разрушения от сжимающих термонапряжений происходит в более благоприятных условиях мгновенно и в ничтожно малых объемах.

**Ключевые слова:** модель динамики паровых пузырей, капиллярно-пористые покрытия, интервалы тепловых потоков, уравнения теплопроводности, теплоэнергоустановки.

• • •

**Түйіндеме.** Кеуекті конструкциялардағы қатты бетке және бу шығаратын қабырғада өндірілген будың көпіршіктері динамикасының моделі жасалды. Модель жылдамдығы жоғары СКС-1М камерасымен кинотүсірілімге негізделген. Нашар жылу өткізетін кеуекті жабынның және металдың субстратының шектік күйі анықталады. Жылу ағындары бу шығынының ( $10^{-8}$ ) өздігінен пайда болған уақытынан материалдың бұзылу уақытына дейін ( $10^2 + 10^3$  с), есептелген.

Релаксация процесінен макропроцеске (жойылу) дейінгі уақыт аралығы сипатталған. Жойылу сығымдау және жылжыту күштерінің өсерінен болуы мүмкін. Мұндай бұзылу орын алған жылу ағынының аралығы кварцты құмды герметикалы герметикалық  $q_{\max} \approx 7 \times 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ,  $q_{\min} \approx 8 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$  және шекаралық  $q_{\max} \approx 1 \times 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ,  $q_{\min} \approx 21 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$  үшін өртүрлі. Жылытылатын қабаттағы жылу ағынының артуы артады, демек, қыздыру уақыты қысқарады, қысылған кернеулердің рөлі артады. Сығылудың жоғары қарсылыққа қарамастан, компрессорлы жылу кернеулерінен сынған кезде, қолайлы жағдайларда бірден және өте аз мөлшерде жүреді.

**Түйінді сөздер:** көпіршікті будың динамикасының моделі, капиллярлы-кеукеткі қаптамалар, жылу ағындарының аралығы, жылу теңдеуі, жылу электр станциясы.

• • •

**Abstract.** A model of vapor bubble dynamics was established, which are appeared at the solid surface in porous structures and steam generating wall. The model is based on movie and still photography by high-speed camera SKS-1M. The analytical model was established on theory of thermo elasticity when a heat flow goes to core of the vapor bubble, which has a "dry" spot and micro layer shaped like a frustum of a cone. Limit state of the weak heat conductive porous coating and metal plate were determined. Heat flows were calculated from time of spontaneous appearance of steam seed ( $10^{-8}$ ) up to time of material destruction ( $10^2 + 10^3 \text{ c}$ ), i.e time interval was described from the relaxation process up to macro process (destruction Breakup of surfaces under impact of the compression force activates much earlier than under the tension force. Probably breakup will occur under impact of compression force and shear force. Intervals of heat flow where such breakups take place are different for quartz surfaces  $q_{\max} \approx 7 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ ,  $q_{\min} \approx 8 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  and boundary  $q_{\max} \approx 1 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ ,  $q_{\min} \approx 21 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ . When specific heat flow in the heated layer gets increased, and therefore time for heating gets reduced, that leads to compression stress increase. Despite high resistance to breakup compression from compressive heat stresses it occurs in more favorable conditions immediately and in miniscule low volumes.

**Key words:** model of vapor bubble dynamics, capillary porous surfaces, intervals of heat flows, heat conductivity equation, heat and power units.

**Введение.** Успехи в применении капиллярно-пористых материалов в технике привлекали многих исследователей и изобретателей создавать на их основе различные устройства. Повышалась интенсивность теплоотводящих систем и форсировка протекающих в них процессов [1-3]. Использование пористых материалов помимо систем охлаждения позволяло создавать агрегаты, в которых решались проблемы взрывобезопасности, охраны труда и долговечности [4-6].

Этому способствовала возможность управлять процессами парообразования за счет избытка жидкости в порах и капиллярных структурах, создаваемого совместными действиями капиллярных и массовых сил [7-9]. В тепловых энергетических установках (ТЭУ) капиллярно-пористые материалы используются для охлаждения высокофорсированных детонационных горелочных устройств [3], создания пароохладителей в паровых котлах [9], маслоохладителей, исключаящих попадание масла в охлаждающую воду и воды в систему подшипников [10], лабиринтных уплотнений [11], и в других устройствах [11-15]. Основные области практического применения капиллярно-пористых систем представлены в [3,8,21,22].

Внедрение оборудования и технологических процессов в энергетике должно производиться, прежде всего, с эколого-экономических позиций. Предлагаемые разработки капиллярно-пористых систем будут способствовать проведению процессов, существенно улучшая и сохраняя природную среду. Капиллярно-пористые системы позволяют достигнуть экономии топлива, сырья, воздуха, воды, тепла, повысить надежность охлаждения и взрывопожаробезопасность работы оборудования, способствовать высокоэффективному разрушению горных пород, бетонов, металлов, уменьшить низкотемпературную коррозию поверхностей, сократить загрязнение биосферы ядовитыми газами, пылью, теплом, ускорить решение проблем продовольственной программы, получить большой экономический и социальный эффекты в области экологии и охраны труда.

Основными преимуществами капиллярно-пористых систем являются высокая интенсивность, большая теплопередающая способность, надежность, компактность, простота в изготовлении и эксплуатации, они улучшают режимные и технологические показатели, и имеют невысокие капитальные и эксплуатационные расходы.

На основе проведенного исследования разработаны новые технические решения для улучшения эксплуатационных характеристик ТЭУ применительно к мощным энергоблокам ТЭС. Авторы [16] проводят сравнительный анализ методов расчета теплоотдачи по кипению воды с недогревом в вертикальных каналах, причем считают очаговую коррозию оболочек твэлов ядерных реакторов аналогом капиллярно-пористой структуры [17,18]. Однако исследования теплообмена по регулярной структурированной поверхности не проводи-

лось. По мнению авторов [19,20] поверхностное кипение на пористых поверхностях может влиять на развитие коррозии из-за эрозионного воздействия на поверхность теплообмена при схлопывании пузырей пара в недогретой жидкости. Поэтому требуется исследовать парообразование жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле капиллярных и массовых сил с учетом скорости и недогрева, которые создаются избытком жидкости.

Оценка интенсивности теплообмена для кипения жидкости в большом объеме и тонких пленках на гладкой поверхности показала на их равные возможности [16-18] при высоких тепловых потоках, и на более высокие показатели теплопередачи, чем у систем с капиллярно-пористым покрытием [19,20]. Потребовалось провести исследования теплопередающих возможностей покрытий, работающих в поле капиллярных и массовых сил, и установить величины критических нагрузок, приводящих к пережогу теплообменных поверхностей нагрева.

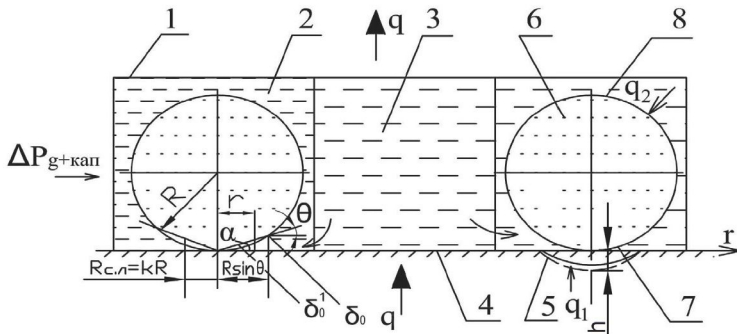
### **Модель генерации пара в отдельной ячейке пористой структуры**

Рассмотрим рост парового пузыря радиусом  $R$  в отдельной ячейке пористой структуры (рисунок 1). Полагаем, что тепловой поток  $q$ , определяющий рост парового пузыря, поступает от поверхности нагрева  $q_1$  с учетом «сухого» пятна через микрослой жидкости, находящийся под паровым пузырем, аналогично теории Д.А. Лабунцова, а часть теплоты  $q_2$  подводится от перегретой жидкости, окружающей растущий пузырь, поскольку величина перегрева жидкости в пористой структуре может достигать больших величин, что увеличивает запас энтальпии прилегающих слоев жидкости.

Охлаждающаяся жидкость транспортируется за счет совместного действия капиллярных и массовых сил  $\Delta P_{g+кап}$ . «сухое» пятно в основании пузыря описывается радиусом  $r$ , который в момент отрыва пузыря пропорционален  $R_{с.п.} = kR$ , причем микрослой жидкости под пузырем образует угол  $\alpha$  со сторонами  $\delta'_o$  и  $\delta_o$ .

Паровой пузырь представим в виде объема шарового сегмента, из которого следует вычесть усеченный конус, образованный микрослоем. Толщина микрослоя  $\delta_o$ , питающая паровой пузырь за счет его испарения, за время роста пузыря будет постоянной величиной, поскольку капиллярные и гравитационные силы обеспечивают под-

течение свежих порций охлаждающей жидкости к основанию пузыря. В модели роста парового пузыря имеет место непосредственный переход от развитого пузырькового кипения к возможному наступлению кризиса, когда нарушиться баланс сил и толщина микрослоя устремиться к нулю ( $\delta_0 \rightarrow 0$ ), что очень важно для исследования предельного состояния системы.



1 - скелет пористой структуры; 2 - ячейка генерации пара; 3 - ячейка питания жидкостью; 4 - парогенерирующая поверхность; 5 - фронт распространения температурной волны в объеме теплогенерирующей поверхности (нержавеющая сталь и медь (пунктирная линия)); 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

Межфазная поверхность 8 и парогенерирующая стенка 4 образуют средний за время роста парового пузыря динамический угол  $\theta$ . Поскольку задача решается для не очень низких давлений, то динамические процессы, имеющие место в начальной стадии развития парового пузыря, не рассматриваются. Тогда силы вязкости и поверхностного натяжения будут так же соизмеримы с инерционными силами и могут не приниматься во внимание.

Объем шарового сегмента вычисляются по формуле:

$$W_{\text{сег.}} = \pi(2R - h)^2 \left( R - \frac{2R^1 - h^1}{3} \right) = \frac{\pi}{3} R^3 (1 + \cos\theta)^2 (2 - \cos\theta),$$

где  $h^1 = R (1 - \cos\theta)$ .



Производная  $dw_{cer} / dt$  составит:

$$\frac{dw_{cer}}{dt} = \pi R^2 (1 + \cos\theta)^2 (2 - \cos\theta) \frac{dR}{dt}$$

Толщина микрослоя под паровым пузырем представляет собой усеченный конус, ограниченный со стороны пузыря «сухим» пятном 7, будет:

$$\delta_o^I = k R t g \alpha^I, \quad \delta_o = R \sin \theta t g \alpha^I,$$

где,  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Для модели пузыря (рисунок 1), рассмотрим решение задачи термоупругости для определения предельного состояния среды на примере хрупкого покрытия из горной породы и металлической паро-генерирующей поверхности подложки.

Для термического разрушения пористого покрытия оценим влияния величины удельного теплового потока  $q$ , подводимого к поверхности и времени воздействия  $t$  его на создание разрушающих напряжений, гранулометрический состав шелухи  $\delta$  (отрывающихся частиц при разрушении), а для металла – глубину проникновения температурного возмущения с разрушением поверхности 5. В некоторых работах решающая роль при разрушении отводится термическим напряжениям растяжения, так как значение предела прочности пористых покрытий, состоящих из горных пород на сжатие в 10 и более раз выше предела прочности на растяжение, а в металле – в несколько раз. Возможно, что растягивающие напряжения вызывают лишь растрескивание покрытия, а не определяют шелушение его, т.е. они не являются решающими для термического разрушения, а основными разрушающими напряжениями являются сдвиговые [3].

Рассматривалась свободная со всех сторон пластина (произвольной формы в плане) толщиной  $2h$ . К поверхности  $z=+h$ , начиная с момента времени  $t=0$ , подводился постоянный удельный тепловой поток  $q=const$ . Нижняя поверхность  $z=-h$  и боковые края пластины считались теплоизолированными [15].

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

Задаваясь предельными значениями напряжения сжатия  $\sigma_{\text{пр.сж}}$  и растяжения  $\sigma_{\text{пр.раст}}$  для каждого данного покрытия и металла, получаем функциональную зависимость теплового потока  $q$ , необходимого для разрушения от времени подачи и глубины проникновения. Кроме того, приравнивая 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, получим в каждом конкретном случае функциональные зависимости теплового потока  $q$  от времени воздействия его на среду [15].

### Результаты расчетов

Для пластины, выполненных из кварца, гранита, тешенита и металла функциональные зависимости  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  рассчитывались на ПК. Приняты обозначения (рисунки 2-5):

$U$  – коэффициент поперечного сжатия;

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения;

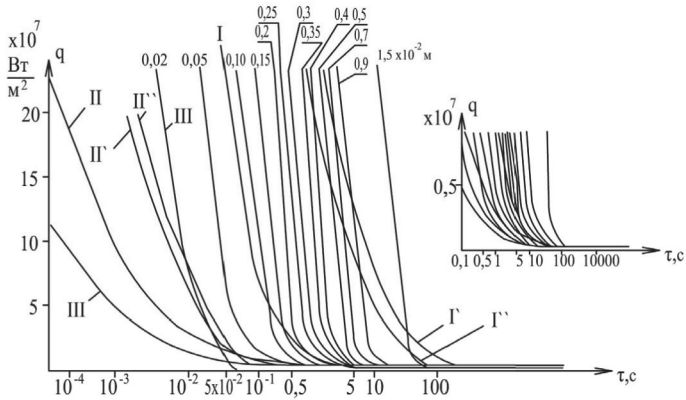
$E$  – модуль упругости.

Результаты расчетов для гранитного покрытия представлены на графике (рисунки 2-5). В случае кварцевого покрытия тепловые потоки подсчитаны для весьма широких интервалов времени ( $10^{-8} - 10^{-3}$ ) с. Нижний предел этого интервала ( $10^{-8}$ ) с – время релаксации.

Для интервалов времени порядка ( $10^{-8} - 10^{-3}$ ) соотношения для  $q_1$  и  $q_2$ , представляющие кривые гиперболического типа в координатах ( $q$ ,  $t$ ), теряют физический смысл так как в данной задаче за основу принималось уравнение теплопроводности. Для учета микропроцессов в него необходимо добавить член типа  $K^I \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$  поскольку термо-

разрушение – макропроцесс, принимаем его протекающим за время ( $5 \times 10^{-3} - 10^3$ ). Изменение тепловых потоков  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  от времени на пластинах, выполненных из гранитного покрытия, приведены на рисунке 2.

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 получаем частицы с толщинами  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , ...,  $\delta_i$ . Максимальная толщина частиц, отрывающихся под действием сил сжатия для покрытий из кварца и гранита, составляет  $(0,25-0,3) \times 10^{-2}$  м.



I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения ( $\Gamma'$ ,  $\Gamma''$  - медь и нержавеющая сталь,  $h = 0,1 \times 10^{-3} \text{ м}$ ); II – оплавление поверхности ( $\text{II}'$ ,  $\text{II}''$  - медь и нержавеющая сталь,  $h = 0,1 \times 10^{-3} \text{ м}$ ).

Рисунок 2 -Зависимость тепловых потоков, вызывающих напряжения сжатия пористого покрытия из гранита в зависимости от времени действия для различной толщины отрывающихся частиц

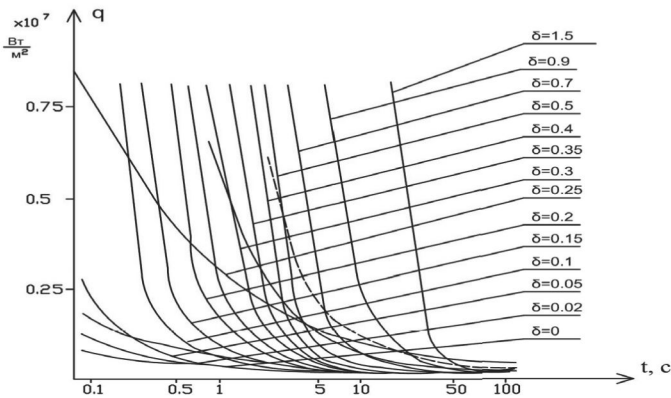
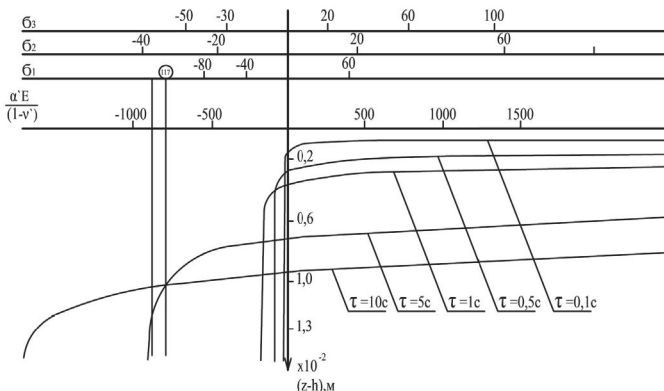


Рисунок 3 - Зависимость  $q = f(t)$ , представленная на рисунке 2. в диапазоне  $q = (0,25 \dots 0,75) \times 10^7 \text{ Вт/м}^2$

Участки кривых сжатия, определяющие отрыв частиц с толщинами  $\delta > 0,3 \times 10^{-2} \text{ м}$  для больших тепловых потоков и малых  $t$ , экраниру-



ются кривой плавления II, а в случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени – кривой растяжения. Причем, кривая плавления покрытия из кварца проходит значительно выше, чем таковая у гранита, что объясняет его устойчивое хрупкое разрушение.



$$q_1=0,142 \times 10^7 \text{ Вт/м}^2, q_2=0,042 \times 10^7 \text{ Вт/м}^2, q_3=0,075 \times 10^7 \text{ Вт/м}^2,$$

II7 – предел прочности на растяжение

Рисунок 4 - Эпюры напряжений по толщине гранитной пластины при различных тепловых потоках и времени их действия

Взаимосвязь напряжений сжатия и растяжения (рисунок 4) представляет собой эпюры напряжений внутри пластины для различных интервалов времени от начала рассматриваемого процесса. При малых  $t$ , порядка  $10^{-2}$  с, возникают только напряжения сжатия. Начиная с  $t \approx 10^{-1}$  с, в некоторой области  $\Delta(h - z_1)$ , напряжение сжатия переходит в напряжение растяжения, причём для различных интервалов времени они находятся на различной глубине от поверхности пластины. В области перехода напряжения сжатия в напряжение растяжения будут, по видимому, наблюдаться наибольшие напряжения сдвига слоев покрытия. Во времени сдвиговые напряжения достигают предельных значений позже разрушающих напряжения сжатия и, очевидно, раньше максимальных напряжений растяжения. Разрушение от сжатия может происходить как на некоторой глубине (до  $0,3 \times 10^{-2}$  м<sup>2</sup>), так и в малом поверхностном слое  $\delta$  за весьма короткий промежуток времени  $t$ . Время отрыва частиц тешенитного покрытия определенное

скоростной киносъёмкой, камерой СКС-1М [3], составляет (0,11...0,47) с и хорошо согласуется с приведенными данными ( $t_{\min}$  = от 0,1с и более) см. рисунок 5.

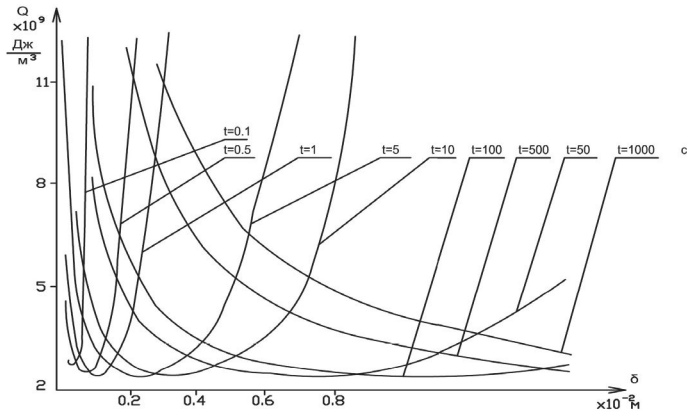


Рисунок 5 - Изменение удельной энергии разрушения гранитного покрытия в зависимости от  $\delta$  для различных  $t$ .

На рисунке 5, дан расчет удельной энергии  $Q$  разрушения единицы объёма гранитного покрытия. В зависимости от толщины  $\delta$  отрывающихся частиц вычисляется энергия  $Q$ . Кривые имеют явно выраженные минимумы.

**Выводы.** Создана модель генерации паровых пузырьков на твердой поверхности с пористым покрытием, в основу которой положены кинофотограмметрические наблюдения за внутренними характеристиками кипения жидкости. Высокая форсировка теплопередачи обеспечивается комбинированным действием капиллярных и массовых сил. Паровой пузырь представлен в виде объёма шарового сегмента с микрослоем жидкости и «сухим» пятном в его основании. Для такой модели решена задача термоупругости и определено предельное состояние системы хорошо- и плохотеплопроводимых материалов (пористое покрытие на металлической подложке). Определены тепловые потоки, подводимые к поверхности, время их воздействия на создание разрушающих напряжений, размеры отрывающихся частиц и глубины проникновения температурной волны в подложку. Тепловые потоки подсчитывались от времени взрывообразного появ-

ления первого зародыша ( $10^{-8}$ с) до времени разрушения материалов ( $10^2 + 10^3$  с), т.е. от времени релаксации до времени, описывающего микропроцесс. Установлена взаимосвязь в процессе разрушения только напряжением сжатия, плавлением либо напряжением растяжения. Размеры отрывающихся частиц подтверждены скоростной съемкой, каждой толщине  $\delta_i$  отрывающейся частицы под действием сил сжатия соответствуют свои предельные значения тепловых потоков, которые находятся в пределах приведенных интегралов.

### Обозначения:

Q – удельная энергия, Дж/м <sup>3</sup> ;	цы), м;
h – высота, толщина пленки, м;	R – радиус шара, м;
q – тепловая нагрузка, Вт/м <sup>2</sup> ;	R <sub>с.п.</sub> – радиус «сухого» пятна, м;
$\sigma$ – коэффициент поверхности натяжения;	$\Delta P_{g+кап}$ – суммарный действующий напор (массовый и капиллярный), Па;
$\sigma_{пр.сж.}$ – предельные напряжения сжатия, Н/м;	k – коэффициент пропорциональности, м <sup>2</sup> ;
$\sigma_{пр.раст}$ – предельные напряжения растяжения, Н/м;	g – ускорение свободного падения, м/с <sup>2</sup> ;
T – температура, К;	$\alpha$ – коэффициент линейного расширения, К <sup>-1</sup> ;
T <sub>p</sub> – температура разрушения, К;	W <sub>сер.</sub> – объем парового сегмента;
T <sub>пл</sub> – температура плавления, К;	$\pi$ – число Пи.
t – время, с;	
$\delta$ – толщина (отрывающейся части-	

### Список литературы

1. *Polyaev V.M., et al., Methods of monitoring Energy Processes// Experimental thermal and fluid science, International of thermodynamics. Experimental Heat transfer, and Fluid Mechanics. Avenue of the Americas – New York, 1995.-V. 10.- April – p. 273-286.*
2. *Polyaev V.M... Genbach A.A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces// Thermal Engineering. – Moscow, 1993. –Vol.40.- No7.- P. 551-554.*
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. *Polyaev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in a porous cooling System Second world conference of experimental heat transfer,*

fluid mechanics and thermodynamics // *Dubrovnik, Yugoslavia*, 23 – 28 June, 1991. – P.639 – 644.

5. Поляев В.М., Генбач А.А., Минашкин Д.В. Процессы в пористом электрическом теплообменнике // *Известия вузов. Машиностроение*. - 1991. - № 4–6. - С. 73–77.

6. Поляев В.М., Генбач А.А. Анализ законов трения и теплообмена в пористой структуре // *Вестник МГТУ, сер.Машиностроение*. - 1991. - С.86 – 96.

7. Поляев В.М., Генбач А.А., Боcharова И.Н. Влияние давления на интенсивность теплообмена в пористой системе. // *Известия вузов. Машиностроение*. - 1992. - № 4–6. - С.68 -72.

8. Генбач А.А., Бакытжанов И.Б. Защита от землетрясений фундаментов ТЭС с помощью пористых геоэкранов // *Поиск, МОН РК*. - 2012. - № 1(2). - С.289 – 297.

9. Генбач А.А., Данильченко И. Пористый пароохладитель паровых котлов // *Промышленность Казахстана*. - 2012. - № 1 (70). - С.72-75.

10. Генбач А.А., Олжабаева К.С. Визуализация термического воздействия на пористый материал в ТЭУ ЭС // *Вестник Национальной инженерной академии РК*, 2012. - № 3 (45). - С.63 – 67.

11. Генбач А.А., Исламов Ф.А. Исследование присопловой галтели в энергоустановках // *Вестник КазНТУ*, 2013. - № 3 (97). - С.245–248.

12. Генбач А.А., Исламов Ф.А. Моделирование процесса задевания ротора турбины // *Вестник КазНТУ*. - 2013. - № 6(100). - С. 235–240.

13. Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы // *Известия вузов. Энергетика*. - 1991.- № 12. - С. 97–101.

14. Поляев В.М. Генбач А.А. Управление теплообменов в пористой структуре // *Известия Российской академии наук. Энергетика и транспорт*. - 1992. - Т 38. - №6 – С. 105-110.

15. Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Модель генерации пара на твердой поверхности, покрытой пористой структурой для элементов теплоэнергоустановок // *Вестник КазНТУ*. - 2017.- №4 (122). - С.49-56.

16. 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. - № 9-10. - P.2482-2493.

17. Ose Y., Kunugi T., Numerical Study on Subcooled Pool Boiling, *Progr. In Nucl. Sci. and Technology* 2, 2011. - P. 125-129.

18. Krepper E., et al., CFD Modeling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design / *Nucl. Eng. and Design*, 237.- 2007. - № 7. - P. 716-731

19. *Ovsyanik A.V.* Modelling of Processes of Heat Exchange at Boiling Liquids (in Russian)// Gomel State Technical University named after P.O., Sukhoy, Gomel, Belarus, 2012

20. *Alekseik, O.S., Kravets V.Yu.*, Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 64, 2013.-№ 4/8. - P.26-31.

21. *Genbach A.A., Jamankylova N.O., Bakic Vukman V.* The processes of Vaporization in the Porous Structures Working With The Excess of Liquid/ Thermal Science, 2017. - Vol. 21, №1A, P. 363-373. DOI:10.2298/TSCI160326313G

22. *Genbach A.A., Olzhabayeva K.S., Iliev I.K.* Boiling Process in oil Coolers on Porous Elements/ Thermal Science, 2016. - Vol. 20.-№ 5.- P.1777-1789. DOI: 10.2298/TSCI150602166G

**Генбач А.А.**, доктор технических наук, профессор ВАК

**Бондарцев Д.Ю.**, докторант PhD, кафедра тепловые энергетические установки (ТЭУ)

**Илиев И.К.**, PhD, профессор, кафедра «Теплотехника, гидравлика и экология» (ТГЕ)