

**NEWS**

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES**

ISSN 2224-5278

Volume 2, Number 422 (2017), 245 – 251

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

Almaty university of power engineering &amp; telecommunications, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: dnellya@mail.ru

**DEVELOPMENT OF THE HIGH-FORCED CAPILLARY-POROUS  
HEAT-REMOVING SYSTEMS**

**Abstract.** The capillary-porous cooling system of caissons of flowing furnaces is developed. As the main reason of accidents, is associated with the stress raisers, the problem of definition of the destructive heat fluxes is solved. The decision is given for the porous coatings and metallic materials. The heat fluxes causing destruction of material by stretching, compression and melting are defined. Time effect of action of heat fluxes is revealed. Various depth of penetration of a thermal wave in the neighborhood of stress raisers and the size of the coming-off particles of the porous coating is considered. The constructive scheme of a capillary - porous cooling system of a caisson with z-shaped plates of rigidity is submitted and installation of an evaporative and condensation capillary - porous cooling system of details (caissons) of a flowing furnace is shown.

**Key words:** capillary-porous structure; stress raisers; cooling system of caissons; heat flux.

УДК 536.248.2

**А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова**

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ  
КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕПЛОТВОДЯЩИХ СИСТЕМ**

**Аннотация.** Разработана капиллярно-пористая система охлаждения кессонов плавильных печей. Поскольку главная причина аварий, связана с концентраторами напряжений, то решается задача по определению разрушающих тепловых потоков. Решение дано для пористых покрытий и металлических материалов. Определены тепловые потоки, вызывающие разрушение материалов растяжением, сжатием и плавлением. Выявлено влияние времени действия тепловых потоков. Рассмотрена различная глубина проникновения тепловой волны в окрестностях концентраторов напряжений и размер отрывающихся частиц пористого покрытия. Представлена конструктивная схема капиллярно-пористой системы охлаждения кессона с z-образными пластинами жесткости и показана установка испарительно-конденсационной капиллярно-пористой системы охлаждения деталей (кессонов) плавильной печи.

**Ключевые слова:** капиллярно-пористая структура; концентраторы напряжений; система охлаждения кессонов; тепловой поток.

Концентраторы напряжений, имеющие место в высокофорсированных капиллярно-пористых системах и в самих структурах, являются источником многих аварий и несчастных случаев. Данный вопрос особенно актуален для создаваемых взрывобезопасных систем охлаждения металлургических печей, поскольку концентратор напряжения способствует прогару охлаждаемого элемента, когда происходит попадание теплоносителя в расплав агрегата. Хрупкие разрушения являются наиболее опасными, они влекут за собой полное разрушение кессона и повреждения другого оборудования, а иногда и человеческие жертвы. Такие поломки происходят внезапно.

Трещины в металле кессона могут образовываться вследствие усталости или цикловой (термической) усталости материала.

Поскольку в концентраторах напряжений, в конечном счете, сосредотачивается теплота, то представляет интерес произвести оценку удельных тепловых потоков  $q_1$ , вызывающих различные виды напряжений  $\sigma_1$  в элементах кессона. Следует ожидать, что удельные тепловые потоки могут достигать величин порядка ( $10^6$ - $10^7$ ) Вт/м<sup>2</sup> и более.

Это предположение следует из того, что выделение теплоты может происходить под одинокими паровыми пузырями. Особо опасные тепловые потоки возникают в режимах пуска и остановки печи, происходят фазовые изменения теплоносителя (рабочего тела). При этом возникают взрывообразно за ( $10^{-6}$ - $10^{-7}$ ) паровые пузыри на поверхности кессона, либо происходит схлопывание пузырей в процессе концентрации пара [1]. Возникает предельное состояние поверхности нагрева и пористого покрытия, которое исследовано методом термоупругости [2]. За счет совместного действия капиллярных и массовых сил в пористых структурах создается недогрев и вынужденная скорость потока, что расширяет пределы отвода тепловых нагрузок [3-4]. Наличие избытка охладителя позволяет управлять интегральными характеристиками теплообмена [5]. На основе теории подобия, моделирования и аналогий получено критериальное уравнение для расчета отводимых удельных тепловых потоков [6]. Обобщение произведено для кипящего теплоносителя и для пенного многофазного потока, который применяется для пылеподавления и пылеулавливания микроскопической пыли [7]. Интенсификации теплообмена и пеногенерации способствуют управление внутренними (термогидравлическими) характеристиками [1, 8]. Это делает предлагаемую пористую систему охлаждения не узкоцелевой, а также эффективной при разработке условий охраны труда и окружающей среды в металлургической промышленности [9]. Расчет отводимых тепловых потоков кессоном можно произвести на основе физико-математических моделей теплопередачи [10]. Управление процессами теплопереноса производится за счет разделения энергии кипящего теплоносителя на энергию тепловой волны и энергию парового потока [11], применения интенсификаторов пограничного слоя [12] и изменения геометрии капилляров и пор структуры [13].

При термическом воздействии на концентратор, через некоторое время часть поверхности нагревается до определенной температуры, в других же частях элемента сохраняется начальная температура. Поэтому внутри металла и пористого покрытия возникает градиент температуры, вследствие чего металл расширяется неравномерно. Окружающие ненагретые слои оказывают сопротивление этому расширению. В результате возникают термические напряжения, как в нагретой части, так и в окружающем ненагретом массиве. Эти напряжения могут достигать разрушающих значений.

В работе [2] приведено решение задачи о термоупругих напряжениях для идеализированных процессов. Доминирующую роль в процессе разрушения играли нормальные сжимающие напряжения. Разрушение концентратора происходило в результате потери устойчивости в тонком слое, прилежащем к свободной поверхности. Поэтому рассматривалось напряженное состояние верхнего слоя, толщина которого зависит от коэффициента теплоотдачи и структуры металла и пористого покрытия.

В нагреваемом металле и покрытии бурно возрастает плотность вакансий, которые быстро объединяются в полости, так как интенсивность процесса объединения вакансий пропорциональна квадрату их плотности. Если полости вакансий могут превращаться в дислокации, то материал приобретает пластические свойства и не разрушается под действием теплоты. Таковы все металлы. Этим свойством обладают также и некоторые капиллярно-пористые структуры.

Если же в материале дислокации не образуются, то растущие полости вакансий концентрируют на своих краях напряжения и ведут к разрушению структуры в то время, когда термические напряжения еще не достигают предела пластической текучести. Происходит хрупкое термическое разрушение.

Для познания механизма процесса разрушения проведены опыты с применением методов фотоупругости и голографии [2, 11]. Оценка напряженного состояния моделей в сходственные моменты времени производилось путем фотографической регистрации картин изохром и подсчета порядка полос в различных точках исследуемых направлений.

Модели изготавливались квадратной формы из листового материала ЭД-6М толщиной  $5 \cdot 10^{-3}$  м. На поверхность пластин наносилась координатная сетка, а в модели выполнялись канавки, имитировавшие пористую структуру концентратора и имеющие различные заглабления, и радиусы закругления. Нагревательные элементы представляли нихромовую фольгу с шириной полосы  $5 \cdot 10^{-3}$  м и клеивались в модели клеем холодного отверждения.

Решение задачи термоупругости позволяет определить предельное состояние пористой среды и металлической парогенерирующей поверхности [2].

При термическом разрушении пористой структуры и металлической стенки требуется выяснить влияние величины удельного теплового потока, подводимого к поверхности, и времени его воздействия на создание разрушающих напряжений, размеры отрывающихся частиц от покрытия и глубину проникновения температурного возмущения (глубину захлаживания).

При возрастании величины  $q_1$  за очень короткий промежуток времени динамические эффекты становятся весьма значительными, напряжения сжатия достигают больших значений, часто в несколько раз превышающих предел прочности материала на сжатие. Поэтому необходимо учесть эти напряжения в механизме термического разрушения материала. Требуется выяснить, какой вид напряжений достигает раньше предельных значений. Рассмотрим пластину толщиной  $2h$ . К поверхности  $z=+h$ , начиная с момента времени  $t=0$ , подводится постоянный удельный тепловой поток. Нижняя поверхность  $z=-h$  и боковые края пластины – теплоизолированы.

Для пластин, выполненных из пористых материалов, меди и нержавеющей стали функциональные зависимости  $q_1$   $q_2$   $q_3$  рассчитывались на ПК. Термомеханические характеристики структур и металлов представлены в [2]. Результаты расчетов показаны на рисунке 1.2.

В случае пористой гранитной пластины (покрытия) тепловые потоки подсчитаны для широкого интервала времени – ( $10^{-4}$ - $10^4$ ) с. Нижний предел этого интервала ( $10^{-4}$  с) – время релаксации. Для интервала времени  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  с соотношения для величин  $q_1$ ,  $q_2$  и  $q_3$  описывают микропроцессы динамики процессов паровых пузырей. Поскольку терморазрушение это макропроцесс, принимаем его протекающим за время  $5 \cdot 10^{-3}$ - $10^4$  с.

Участки кривых сжатия, определяющие глубину проникновения металла или размер отрывающихся частиц покрытия  $\delta > 0,3 \cdot 10^{-2}$  м и для больших величин  $q$  и малых  $t$ , экранируются кривой плавления II, а случае малых тепловых потоков и значительных интервалов времени – кривой растяжения I. Кривая плавления пористой поверхности с пористостью  $\varepsilon=5\%$  проходит значительно выше, чем у поверхности с  $\varepsilon=30\%$ , что объясняет ее устойчивое хрупкое терморазрушение.

Для металлов кристаллы разрушаются при напряжениях до  $10^{-5} \cdot E$ , где  $E$  – модуль Юнга. Процесс состоит из стадий зарождения трещин и их развития. В результате термического воздействия возникают микротрещины в области концентраторов напряжений (включений, неоднородностей). Высокие внутренние напряжения также могут появляться вследствие неоднородного протекания пластической деформации, после чего наступает хрупкое разрушение, аналогичное пористому материалу. Пластическая деформация при этом рассматривается как первопричина разрушения, хотя она может задерживать рост трещин.

В основе разрушения, с одной стороны лежат разрывы межатомных связей, обусловленные тепловыми флуктуациями, а с другой – разрушение есть кинетический термоактивационный процесс, когда происходит перемещение вакансий к трещинам, рост которых определяет кинетику разрушения. В окрестности острия концентратора возникает высокая интенсивность напряжений и наступает пластическое течение материала или распространение хрупкой трещины. Устанавливается предельное равновесие хрупких тел с трещинами.

Таким образом, механизм разрушения металлов принципиально отличается от механизма разрушения пористых материалов. Ряд термомеханических свойств также различен. Несмотря на это, на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности при граничных условиях второго рода проведена аналогия в поведении материалов в предельном состоянии. Выявлены зависимости тепловых потоков от времени их действия и глубины проникновения температурных возмущений либо от размера отрывающихся частиц покрытия, что позволяет предсказывать и предотвращать возникновение таких состояний для металлической парогенерирующей поверхности и подбирать оптимальные тепловые нагрузки для пористых материалов из естественных минеральных сред (горных пород).

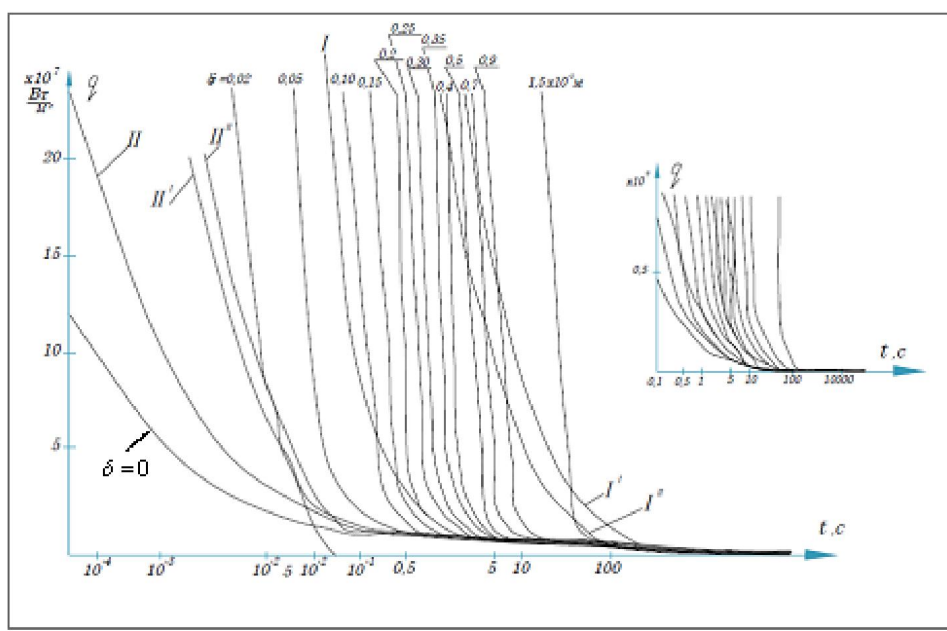


Рисунок 1 – Зависимость тепловых потоков  $q$ , вызывающих напряжения сжатия в области концентраторов напряжений пористого гранитного покрытия в зависимости от времени действия для различной глубины проникновения тепловой волны  $\delta$  или толщины отрывающихся частиц:  
 I – напряжения растяжения, достаточные для разрушения (I', I'' – медь и нержавеющая сталь,  $h = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м),  
 II – оплавление поверхности (II', II'' – медь и нержавеющая сталь,  $h = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м),  $h$  – толщина стенки

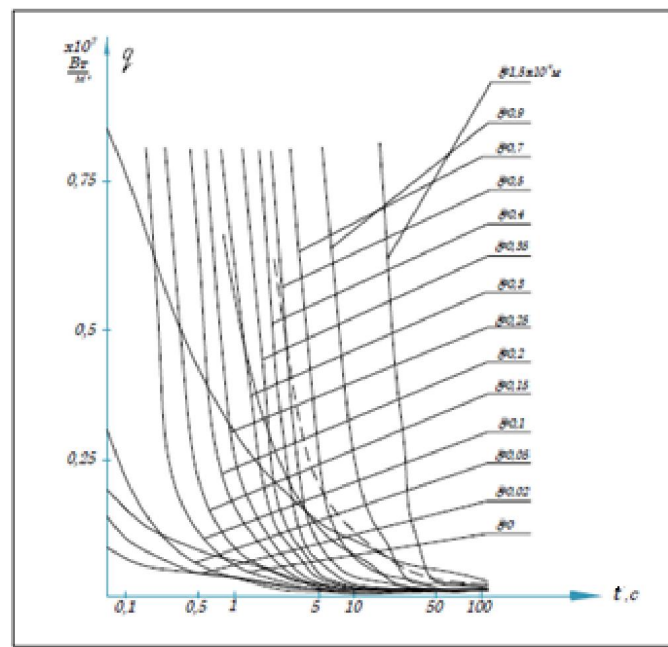


Рисунок 2 – Зависимость  $q = f(t)$ , представленная на рисунке 1 в диапазоне  $q = (0,25 - 0,75) \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>

Нами разработана конструктивная схема капиллярно-пористой системы охлаждения кессона с пластинами жесткости (рисунок 3).

Конструктивное исполнение кессонов представляет коробчатую форму. Они состоят из корпуса 1 и съемной крышки 2, герметично скрепляемые по периметру болтами 3. Внутренняя поверхность стенки 4 покрыта капиллярно-пористой структурой 5, прижатой перфорированными пластинами 6. Артерии 7 соединены с верхними концами структуры, через торец которой к охлаждаемой поверхности подается жидкость массовыми и капиллярными силами. Нижние концы структуры обычно свободны и погружены в корытца 8, где скапливается жидкость за счет утечек,

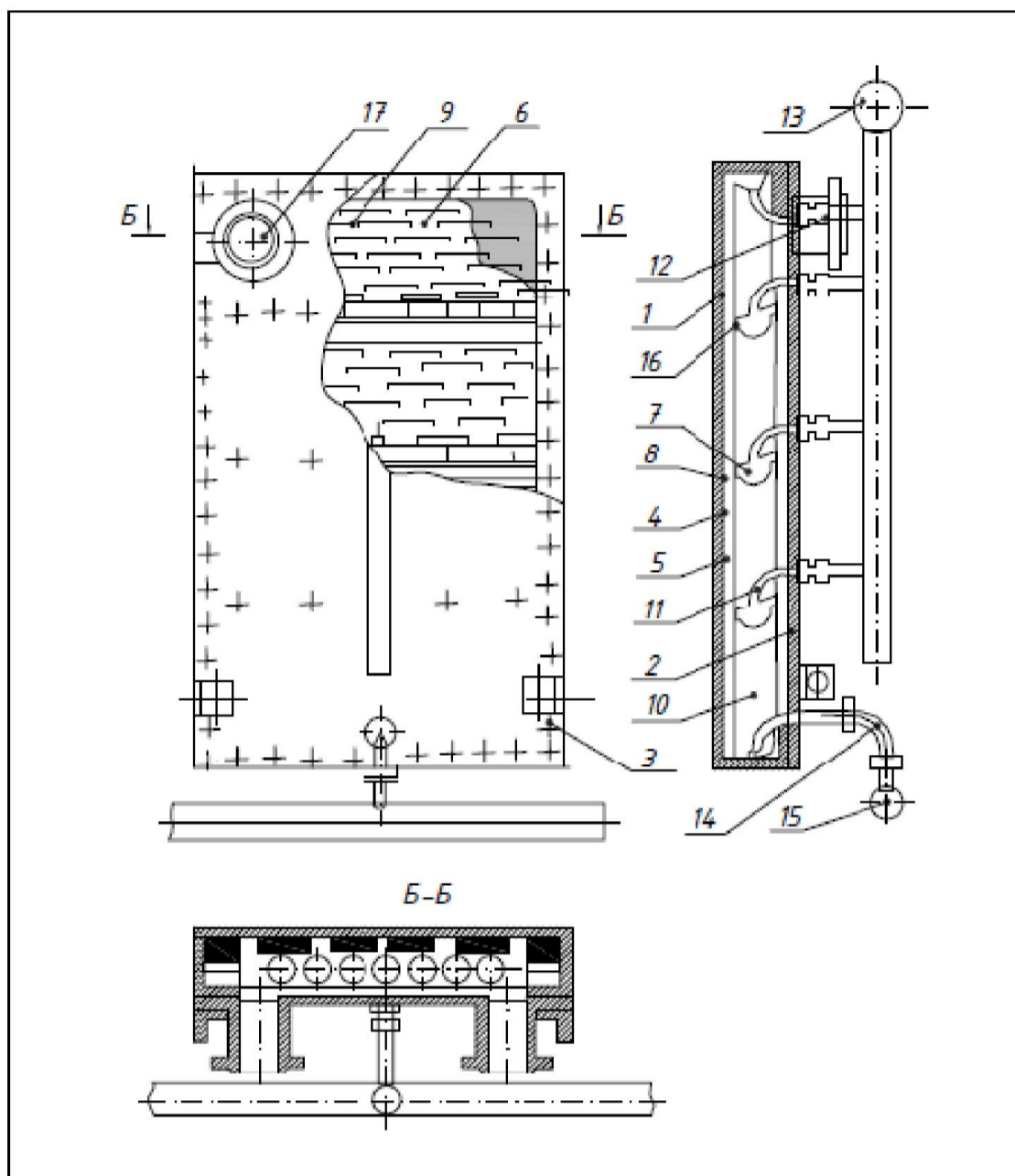


Рисунок 3 – Схема охлаждения кессона капиллярно-пористой системы охлаждения кессона с пластинами жесткости:  
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – болт; 4 – стенка; 5 – капиллярно-пористая структура; 6 – пластина; 7 – артерия; 8 – корытце;  
 9 – отверстие; 10 – канал; 11,17 – патрубок; 12 – труба; 13,15 – коллектор; 14 – сифон; 16 – пластины жесткости

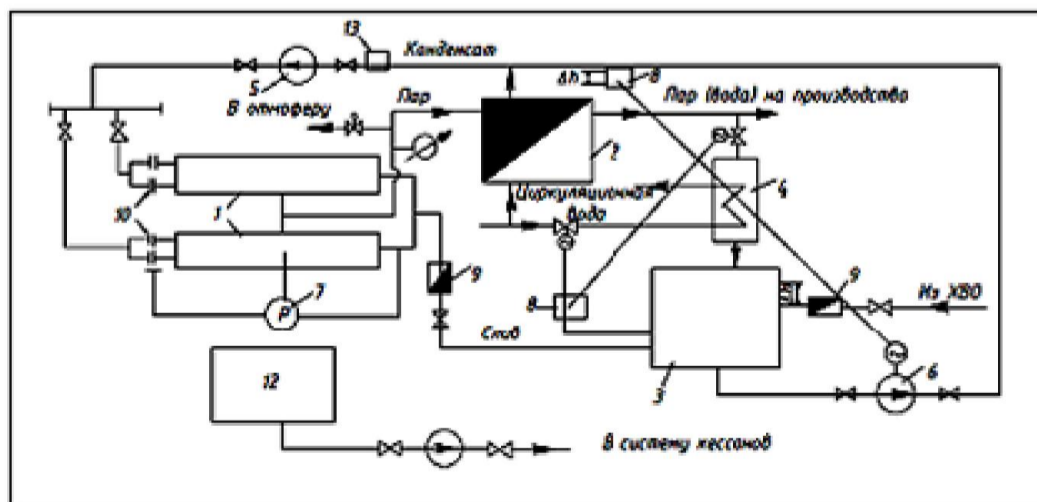


Рисунок 4 – Установка испарительно-конденсационной капиллярно-пористой системы охлаждения деталей (кессонов) плавильной печи: 1 – охлаждаемая деталь; 2 – паро-паровой теплообменник; 3 – бак питания; 4 – конденсатор линии подпитки; 5 – конденсатный насос; 6 – насос подпитки; 7 – контактный манометр; 8 – регулятор уровня; 9 – обратный клапан; 10 – регулирующий вентиль; 11 – манометр; 12 – аварийно-ремонтный бак; 13 – охладитель конденсата

каплеуноса или избытка. На поверхности пластин выштампованы углубления с отверстиями 9, которые обеспечивают выход пара из структуры в канал 10, а также служат уловителями выбрасываемых из структуры капель и стекающей избыточной жидкости по внешней поверхности пластины. Артерия соединена с патрубком 11, с разводящими трубами 12 и коллектором 13. Избыток охлаждающей жидкости скапливается в нижней части кессона и сифоном 14 удаляется в нижний коллектор 15 и далее в накопитель для возврата в систему. С целью облегчения конструкции и сохранения достаточной жесткости кессона снабжаются распорками 16, выполненными в виде Z-образных перфорированных пластин или ребрами жесткости. Ребра могут располагаться снаружи или внутри корпуса и крышки кессона. На крышке, в верхней ее части, приварены патрубки 17 с фланцами для соединения с паропроводом. Структура может быть вытянутой в вертикальном или горизонтальном направлении, верхний или нижний концы которой (либо оба) соединены с артерией. Перфорированные пластины изготавливаются по форме и размерам в соответствии со структурой. Выштампованные перфорированные углубления в них могут иметь форму усеченного конуса, либо продольных пазов с отверстиями, обращенных вверх.

На рисунке 4 показана установка капиллярно-пористой системы охлаждения деталей (кессонов) плавильной печи.

#### 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. – 1991. – Dubrovnik, Yugoslavia, 23-28 June. – P. 639-644.
- [4] Поляев В.М., Генбач А.А. Области применения пористой системы. // Известия вузов. Энергетика. – 1991. – № 12. – С. 97-101.
- [5] Поляев В.М., Генбач А.А. Управление теплообменом в пористых структурах // Известия Российской академии наук. Энергетика и транспорт. – 1992. – Т. 38, № 6. – С. 105-110.
- [6] Поляев В.М., Генбач А.А. Теплообмен в пористой системе, работающей при совместном действии капиллярных и гравитационных сил // Теплоэнергетика. – 1993. – № 7. – С. 55-58.
- [7] Генбач А.А., Кульбакина Н.В. Пылеподавление и пылеулавливание с помощью циркуляционного пеногенератора с пористой структурой // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 2010. – № 4. – С. 62-65.
- [8] Поляев В.М., Генбач А.А. Управление внутренними характеристиками кипения в пористой системе // Криогенная техника и кондиционирование: Сб. трудов МГТУ. – 1991. – С. 224-237.
- [9] Поляев В.М., Генбач А.А. Применение пористой системы в энергетических установках // Промышленная теплоэнергетика. – 1992. – № 1. – С. 40-43.
- [10] Поляев В.М., Генбач А.А. Расчет тепловых потоков в пористой системе охлаждения // Известия вузов. Авиационная техника. – 1992. – № 2. – С. 71-74.
- [11] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Methods of Monitoring Energy Process // Experimental thermal and fluid science, International of Thermodynamics, Experimental Heat Transfer, and Fluid Mechanics, avenue of the Americas. – New York, 1995. – Vol. 10, april. – P. 273-286.
- [12] Генбач А.А., Гнатченко Ю.А. Системы охлаждения теплонагруженного элемента детонационного горелочного устройства – Камеры сгорания, диффузора, конфузора // Вестник Каз НТУ. – Алматы, 2007. – № 4(61) июль. – С. 87-91.
- [13] Генбач А.А., Пионтковский М.С. Пористый пылегазоуловитель с управляемой геометрией микроканалов // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 2010. – № 4. – С. 59-61.

#### REFERENCES

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.A. Skorost' rosta parovykh puzyrej v poristykh strukturah // *Izvestija vuzov. Mashinostroenie*. 1990, N 10, P. 56-61 (in Russ.).
- [2] Polyayev V. M., Genbach A.N., Genbach A.A. Predel'noe sostojanie poverhnosti pri termicheskom vozdejstvii // *Teplofizika vysokikh temperatur (TVT)*. 1991, Vol. 29, N 5, P. 923-934 (in Russ.).
- [3] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System, *Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics*. 1991, Dubrovnik, Yugoslavia, 23-28 June, P. 639-644 (in Eng.).
- [4] Polyayev V.M., Genbach A.A. Oblasti primenenija poristoj sistemy. // *Izvestija vuzov. Energetika*. 1991, N 12, P. 97-101 (in Russ.).
- [5] Polyayev V.M., Genbach A.A. Upravlenie teploobmenom v poristykh strukturah // *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Energetika i transport*. 1992, Vol. 38, N 6, P. 105-110 (in Russ.).
- [6] Polyayev V.M., Genbach A.A. Teploobmen v poristoj sisteme, rabotajuschej pri sovmestnom dejstvii kapilljarnyh i gravitacionnyh sil // *Tepljoenergetika*. 1993, N 7, P. 55-58 (in Russ.).

- [7] Genbach A.A., Kulbakina N.V. Pylepodavlenie i pyleulavlivanie s pomosh'ju cirkuljacionogo penogeneratora s poristoj strukturoj // Energetika i toplivnye resursy Kazakhstana. **2010**, N 4, P. 62-65 (in Russ.).
- [8] Polyayev V.M., Genbach A.A. Upravlenie vnutrennimi harakteristikami kipenija v poristoj sisteme // *Kriogennaja tehnika i kondicionirovanie: Sbornik trudov MGTU*. Moscow, **1991**, P. 224-237 (in Russ.).
- [9] Polyayev V.M., Genbach A.A. Primenenie poristoj sistemy v energeticheskikh ustanovkakh // *Promyshlennaja teploenergetika*. **1992**, N 1, P. 40-43 (in Russ.).
- [10] Polyayev V.M., Genbach A.A. Raschet teplovyh potokov v poristoj sisteme ohlazhdenija // *Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika*. **1992**, N 2, P. 71-74 (in Russ.).
- [11] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. Methods of Monitoring Energy Process // *Experimental thermal and fluid science, International of Thermodynamics, Experimental Heat Transfer, and Fluid Mechanics, avenue of the Americas*. New York, **1995**. Vol. 10, april. P. 273-286 (in Eng.).
- [12] Genbach A.A., Gnatchenko. Y.A. Sistemy ohlazhdenija teplonagruzhenного элемента detonacionного gorelochnого ustrojstva – Kamery sgoranija, diffuzora, konfuzora // *Vestnik Kaz NTU*. Almaty, **2007**, N 4(61), July, P. 87-91 (in Russ.).
- [13] Genbach A.A., Piontkovskiy M.S. Poristyj pylegazoulovitel' s upravljaemoj geometriej mikrokanalov // *Energetika i toplivnye resursy Kazakhstana*. **2010**. N 4. P. 59-61 (in Russ.).

**А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова**

Алматы энергетика және байланыс университеты, Алматы, Қазақстан

### **ЖОҒАРЫ ӨНІМДІ КАПИЛЛЯРЛЫҚ-КЕУЕКТІ ЖЫЛУ ШЫҒАРАТЫН ЖҮЙЕЛЕРДІ ДАМЫТУ**

**Аннотация.** Балкыту пештерінің кессондарын салқындатудың капиллярлы кеуекті жүйесі құрастырылған. Апаттардың басты себебі кернеулерді шоғырлатқыш болғандықтан қиратушы жылу ағынын анықтау бойынша сұрақтар қарастылады. Шешім кеуекті қаптамалар мен металлдық материалдарға арналып берілген. Созылу, сығу және балқу әсерінен материалдың бұзылуын туындататын анықталған. Жылу ағындарының әсер ету уақыты айқындалды. Кернеулерді шоғырлағыштың маңайында жылу ағындарының әртүрлі ену тереңдігі мен кеуекті қаптың ыдырау бөлшектерінің өлшемдері қарастырлған. z-пішінді қатаңдық пластиналары бар кессонды салқындатудың капиллярлы кеуекті жүйесінің конструкторлық сұлбасы ұсынылған және балкыту пешінің бөлшектерін (кессондарын) капиллярлы кеуекті салқындату жүйесінің буландыру конденсациялық қондырғысы көрсетілген.

**Түйін сөздер:** капиллярлы кеуекті жүйесі; кессондарды салқындатудың жүйесі; кернеулер шоғырлатқыш; жылу ағыны.