

**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 2224-5227

Volume 3, Number 313 (2017), 41 – 47

A.A. Genbach, N.O. JamankulovaAlmaty University of Power Engineering & Telecommunications, Almaty, Republic of Kazakhstan
dnellva@mail.ru**RESEARCH AND CALCULATION OF HIGH-FORCED
CAPILLARY-POROUS HEAT EXCHANGER**

Abstract. A capillary-porous cooling system for caissons of melting units has been studied, developed and calculated. The experimental type of the mesh porous structure $(2 \times 0.55) \cdot 10^{-3}$ m is defined. The heat transfer capacity of the cooling system is increased six times. The hydraulic resistance at boiling of water will be 40.4 times less than in mesh heat pipes, and even more so for the wicks of heat pipes with fibrous, powder and ceramic materials. The caisson allows to carry out cooling of furnaces is explosion-proof due to the maintenance of a trace amount of liquid in the porous structure. The system of caisson of the lining of the unit and the cooling scheme of the caisson by a capillary-porous system is presented. The hydraulic resistance in the capillary-porous structure, the criterial heat transfer equation, taking into account the excess fluid, which determines the speed and underheating of the flux, and the heat-storage capacity of the wall, are obtained by us as a result of experimental studies.

Key words: capillary-porous system; hydraulic resistance; cooling system; caisson; heat flux.

УДК 536.248.2

А.А. Генбач, Н.О. Джаманкулова

Алматинский Университет Энергетики и Связи, Алматы, Республика Казахстан

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО
КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА**

Аннотация. Исследована, разработана и рассчитана капиллярно-пористая система охлаждения кессонов плавильных агрегатов. Определен экспериментальный вид сетчатой пористой структуры $(2 \times 0.55) \cdot 10^{-3}$ м. Увеличена в шесть раз теплопередающая способность системы охлаждения. Гидравлическое сопротивление при кипении воды будет в 40,4 раза меньше, чем в сетчатых тепловых трубах, и тем более для фитилей тепловых труб с волокнистыми, порошковыми и керамическими материалами. Кессон позволяет проводить охлаждение печей взрывобезопасно за счет содержания малого количества жидкости в пористой структуре. Представлена система кессонирования футеровки агрегата и схема охлаждения кессона капиллярно-пористой системой. Гидравлическое сопротивление в капиллярно-пористой структуре, критериальное уравнение теплообмена с учетом избытка жидкости, определяющим скорость и недогрев потока, и теплоаккумулирующей способностью стенки получены нами в результате экспериментальных исследований.

Ключевые слова: капиллярно-пористая система; гидравлическое сопротивление; система охлаждения; кессон; тепловой поток.

Капиллярно-пористый теплообменник предназначен для обеспечения взрывобезопасности работы плавильных агрегатов в металлургии. Он содержит весьма малое количество жидкости и, в случае прогара элемента охлаждения, исключается попадание воды в расплав, которое приводит к взрыву печи, как это имеет место для водяной и испарительной систем охлаждения, выполненных в виде кессонов.

Следующим этапом разработок теплообменника явилось исследование капиллярно-пористой структуры. Для расширения отвода тепловых нагрузок применяется управление процессами теплопередачи. Для этого исследуется разделение энергии кипящего потока в структуре на энергию тепловой волны и энергию парового потока [1].

Для этого имитируется процесс взрывообразного рождения парового зародыша. Следующим шагом по управлению теплообменом является совместное действие массовых и капиллярных сил

для транспорта охладителя, создающих недогрев и вынужденную скорость потока в структуре [2]. Также система способна на порядок увеличить критические тепловые нагрузки и может быть выделена в отдельный класс теплообменников, отличающихся высокой форсировкой и интенсивностью теплопередачи. Кроме того, массовые силы позволяют управлять формой, очертаниями и интенсивностью генерации внутренних характеристик кипящего потока в капиллярно-пористой структуре и интенсифицируют процессы теплопередачи [3,4]. Разрабатываются физико-математические модели процессов кипения в пористой структуре для всех режимов кипения (начального, переходного, развитого и кризиса (предельного) [5-8]. Обобщение опытных данных на основе теории подобия, моделирования и аналогий позволяет получить критериальное уравнение для расчета теплообмена кипящих и пенных потоков в пористых структурах [9] и создать инженерную методику расчета. Приведем пример расчета такой системы применительно к теплообменнику, выполненному в виде кессона.

На рис. 1 показана схема кессонированной гарниссажной футеровки плавильного агрегата. Приняты следующие обозначения:

q_{pi} , q_u , q_{oc} - удельные тепловые потоки от расплава, уносимые системой охлаждения и поступающие в окружающую среду; t_p , t_n , t_m , t_{cm} - температуры расплава, пленки, металла и ограждающей стенки.

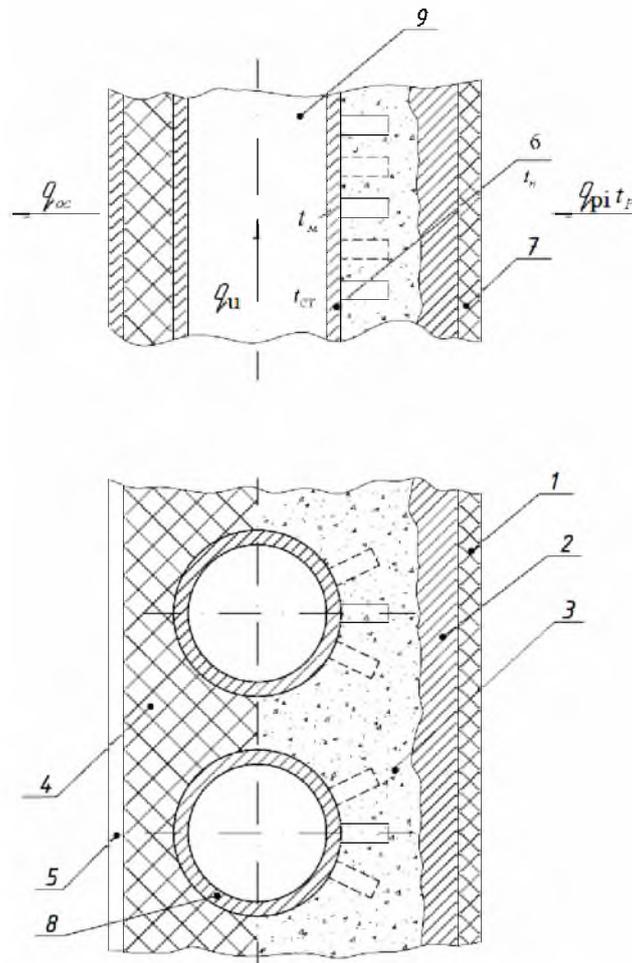


Рисунок 1 - Схема кессонированной гарниссажной футеровки: 1 – пленка расплава; 2 – гарниссаж; 3 – огнеупорная набивка; 4 – тепловая изоляция; 5 – металлическая обшивка; 6 – изменение температуры по толщине футеровки; 7 – изменение вязкости в гарниссажном слое; 8 – стенка кессона; 9 – кессон

На рисунке 2 представлена схема охлаждения кессона капиллярно-пористой системы с ребрами жесткости, выполненными в виде распорок. Из рисунка 2 видно, что капиллярно-пористая структура, выполненная малой толщины (доли миллиметров), ежесекундно содержит

малое количество охладителя, не опасное для образования взрывчатой смеси в случае его попадания в расплав (штейн) плавильной печи.

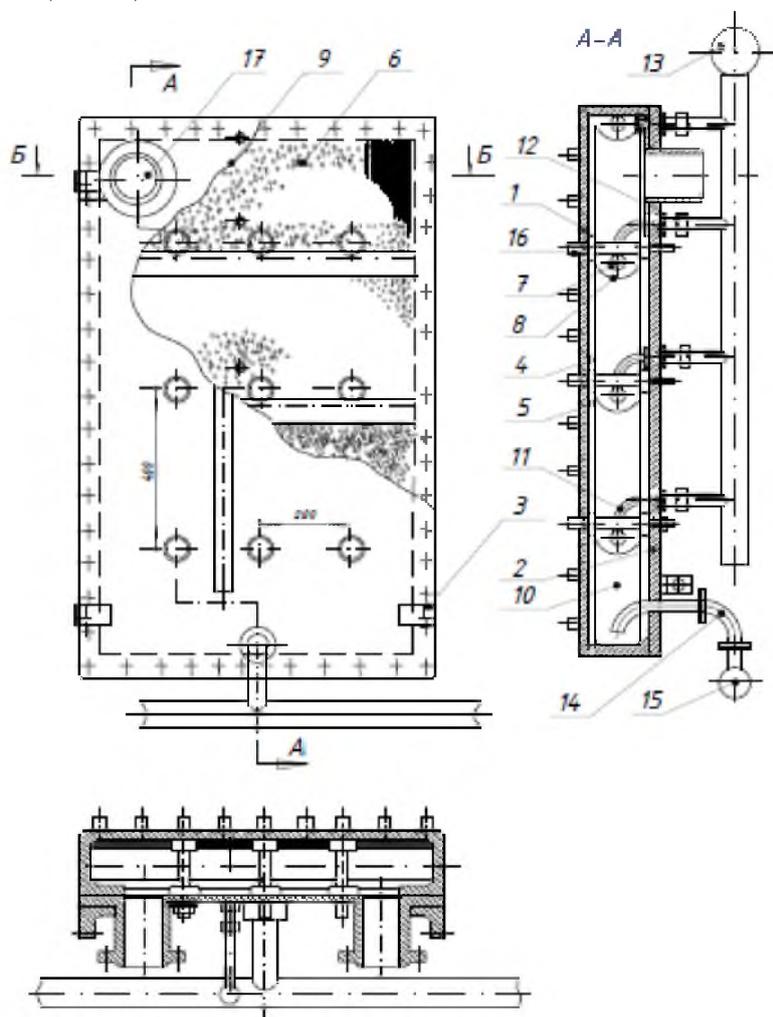


Рисунок 2 - Схема охлаждения кессона капиллярно-пористой системы с распорками: 1- корпус; 2 - крышка; 3 – болт; 4 – стенка; 5 - капиллярно-пористая структура; 6 – пластина; 7 – артерия; 8 – корытце; 9 – отверстие; 10 – канал; 11, 17 – патрубок; 12 – труба; 13, 15 – коллектор; 14 – сифон; 16 – распорки

Конструктивное исполнение кессонов (рис. 2) 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, 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 стекаемой 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 кессоны снабжаются распорками 16. В случае выполнения распорок в виде ребер они 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 кверху.

Произведем расчет капиллярно-пористой системы охлаждения, выполненной в виде коробчатой формы (кессона).

Гидравлическое сопротивление определяется по закону Дарси

$$\Delta p = \mu_{жс} \cdot m_{жс} \cdot l / (p_{жс} \cdot F_{\phi} \cdot K_y), \text{ Н/м}^2;$$

где K_y - условный коэффициент проницаемости, определенный нами экспериментально [2];

$$K_y = 5.5 \cdot 10^{-7} \cdot (b_e/d)^{-1.29} = 5.5 \cdot 10^{-7} \cdot (0.55/0.2)^{-1.29} = 1.49 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2;$$

b_e - гидравлический диаметр структуры; $b_e = 2 \cdot 5.5 \cdot 10^{-3} / 2 = 0.55 \cdot 10^{-3}$ м; d - средний диаметр проволоки сетки; $d = 0.2 \cdot 10^{-3}$ м; $\mu_{жс}$ - динамическая вязкость жидкости; при $p = 146$ бар, $t_c = 360$ °С, $\mu_{жс} = 77.5 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $m_{жс}$ - расход жидкости;

$$m_{жс} = \beta \cdot q \cdot F_u / \gamma = 1.1 \cdot 6 \cdot 10^5 \cdot 0.942 / 1027 \cdot 10^3 = 0.605 \text{ кг/с};$$

β - коэффициент избытка жидкости; оптимальное значение определено нами экспериментально, $\beta = 1,1$ [5]; q_u - тепловая нагрузка, $q_u = 6 \cdot 10^5$ Вт/м² (принимается максимальное значение); r - теплота парообразования, $r = 1027 \cdot 10^3$ Дж/кг; F_u - поверхность теплообмена; примем $F_u = 1 \cdot 0.942 = 0.942$ м²; $p_{жс}$ - плотность жидкости; $p_{жс} = 610$ кг/м³; F_{ϕ} - живое сечение капиллярно-пористой сетчатой структуры

$$F_{\phi} = l \cdot \delta_{\phi} = 1 \cdot 1.04 \cdot 10^{-3} = 1.04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

ε - пористость структуры; $\varepsilon = 0.7$; δ_{ϕ} - толщина структуры; $\delta_{\phi} = 2 \cdot 0.52 \cdot 10^{-3} = 1.04 \cdot 10^{-3}$ м.

Тогда

$$\Delta P = \frac{77.5 \cdot 10^{-6} \cdot 0.605 \cdot 1}{610 \cdot 1.04 \cdot 10^{-3} \cdot 1.49 \cdot 10^{-7}} = 494 \text{ Па}.$$

Гидравлическое сопротивление сетчатой структуры, работающей только в поле капиллярных сил, как это имеет место в тепловых трубках, будет равно

$$\Delta P = \frac{77.5 \cdot 10^{-6} \cdot (0.605/6) \cdot 1}{610 \cdot 1.04 \cdot 10^{-3} \cdot 7.14 \cdot 10^{-10}} = 2 \cdot 10^4 \text{ Па},$$

где $0.605/6$ – пересчет на величину критической тепловой нагрузки, которая в тепловых трубках в шесть раз меньше; величина K_y в поле капиллярных сил [2] равна

$$K_y = 4.305 \cdot 10^{-10} \cdot (b_e/d)^{0.5} = 4.305 \cdot 10^{-10} \cdot (0.55/0.2)^{0.5} = 7.14 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2,$$

т.е. гидравлическое сопротивление предлагаемой структуры будет в $494/2 \cdot 10^4 = 404$ раза меньше. При сравнении сетчатых структур с металлокерамическими, войлочными и порошковыми материалами, для которых максимальное значение проницаемости может составить $11 \cdot 10^{-10}$ м², т.е. всего в $\frac{1.1 \cdot 10^{-9}}{7.14 \cdot 10^{-10}} = 1,54$ раза больше, чем для сетчатых структур, работающих в поле капиллярных сил, а гидравлическое сопротивление – в 1.54 раза меньше.

Таким образом, в предлагаемой капиллярно-пористой структуре, работающей при комбинированном действии массовых и капиллярных сил, гидравлическое сопротивление при кипении воды будет в 40,4 раза меньше, чем в тепловых трубках с мелкоячеистыми сетками, и тем более с волокнистыми и керамическими материалами, что позволяет охлаждать поверхности нагрева больших размеров применительно к кессонам плавильных печей.

Для расчета коэффициента теплоотдачи воспользуемся критериальным уравнением [9], полученным нами в результате обобщения опытных данных при кипении воды в капиллярно-

пористой структуре, работающей в поле капиллярных и массовых сил:

$$St'_u \cdot Pr_{ж}^{0.6} \cdot (F_n/F_{\phi})^{0.74} = 59 \cdot N_g^{0.3} \cdot \bar{m}^a \cdot \left(\frac{\lambda_{\phi}}{\lambda_{ж}}\right) \cdot k_{cm}^{-1} \cdot \bar{N}_p^{0.23} \cdot Re_n^{-0.53}, \quad (2)$$

где St'_u - число Стантона, $St'_u = a_u / (G_{ж} \cdot C_{Pж})$, $a_u = q_u / (t_{cm} - t_n)$, $Bm/m^2 \cdot K$; N_g - критерий Бонда: $N_g = (1 + \cos \beta) \cdot p_{ж} \cdot g \cdot b_z^2 / \sigma$; σ - коэффициент поверхностного натяжения, $\sigma = 0,00416$ Н/м; $\beta = 90^\circ$ - угол наклона испарителя; $\bar{m} = 1,1$ - параметр, учитывающий избыток жидкости; $G_{ж}$ - удельный расход жидкости, $G_{ж} = p_{ж} \cdot w_{ж} = q_u \cdot F_n / (\varepsilon \cdot F_{\phi} \cdot r)$, $кг/м^2 \cdot с$; $p_{ж}$ - плотность жидкости, $p_{ж} = 610$ $кг/м^3$;

$$N_g = (1 + \cos 90^\circ) \cdot 610 \cdot 9,81 \cdot (0,55 \cdot 10^{-3})^2 / 0,00416 = 0,435;$$

q_u - тепловая нагрузка, $q_u = 6 \cdot 10^5$ Вт/м²; $C_{Pж}$ - изобарная теплоемкость жидкости, $C_{Pж} = 9185$ Дж/кг · К; F_n - поверхность испарителя, $F_n = 0,942$ м²; ε - пористость структуры ($\varepsilon = 0,7$); F_{ϕ} - площадь поперечного сечения фитиля, м²; $F_{\phi} = 1,04 \cdot 10^{-3}$ м²; r - теплота парообразования, $r = 1027 \cdot 10^3$ Дж/кг;

$$G_{ж} = 6 \cdot 10^5 \cdot 0,942 / (0,7 \cdot 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot 1027 \cdot 10^3) = 776$$
 $кг/м^2 \cdot с$;

$Pr_{ж} = \nu_{ж} / a_{ж}$ - критерий Прандтля; $\nu_{ж}$ - коэффициент кинематической вязкости, $0,13 \cdot 10^{-8}$ м²/с; $a_{ж}$ - коэффициент температуропроводности жидкости,

$$a_{ж} = \lambda_{ж} / (\rho_{ж} \cdot C_{Pж}) = 0,457 / 610 \cdot 9185 = 8,1 \cdot 10^{-8}$$
 м²/с;

$$Pr_{ж} = 0,13 \cdot 10^{-8} / 8,1 \cdot 10^{-8} = 1,606$$
;

$a = 0$ - коэффициент при параметре \bar{m} в уравнении (2), т.к. $q_u > 5 \cdot 10^4$ Вт/м²; $\lambda_{\phi}, \lambda_{ж}$ - коэффициенты теплопроводности (эффективный и жидкости);

$$\lambda_{\phi} / \lambda_{ж} = 1 + (0,5 \cdot a' \cdot b_z + c)^{-1}, \quad (3)$$

где для латуни $a' = 1,8 \cdot 10^3$ м⁻¹; $c = 0,73$;

$$\lambda_{\phi} / \lambda_{ж} = 1 + (0,5 \cdot 1,8 \cdot 10^3 \cdot 0,00055 + 0,73)^{-1} = 1,816;$$

k_{cm} - коэффициент, учитывающий теплоаккумулирующую способность стенки,

$$k_{cm} = 1 + \left[\frac{(p \cdot C \cdot \lambda)_{ж}}{(p \cdot C \cdot \lambda)_{cm}} \right]^{0,5},$$

где для латунной стенки $p = 8,5 \cdot 10^3$ $кг/м^3$; $C = 392$ Дж/кг · К; $\lambda = 109$ Вт/м · К,

$$k_{cm} = 1 + \left[\frac{(610 \cdot 9185 \cdot 0,457)_{ж}}{(8500 \cdot 392 \cdot 109)_{cm}} \right]^{0,5} = 1,084;$$

N_p - критерий давления, $N_p = \sigma / (P_n \cdot b_z)$; $N_p = 0,00461 / (14,6 \cdot 10^6 \cdot 0,00055) = 5 \cdot 10^{-7}$;

Re_n - критерий Рейнольдса; $Re_n = b_z \cdot w_n / \nu_n$,

где w_n - средняя скорость пара, $w_n = q_u / (r \cdot p_n)$ м/с; p_n - плотность пара, $p_n = 101,01$ $кг/м^3$;

ν_n - кинематическая вязкость пара, $\nu_n = 0,2 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $w_n = 600000 / (1027000 \cdot 101,01) = 0,0058$ м/с; $Re_n = 0,00055 \cdot 0,0058 / 0,2 \cdot 10^{-6} = 13,9$.

Тогда число Стантона из критериального уравнения (2) равно

$$St'_u = 8,2 \cdot 10^{-4}.$$

Коэффициент теплоотдачи α_u равен

$$\alpha_u = St'_u \cdot G_{жс} \cdot C_{Ржс} = 8,2 \cdot 10^{-4} \cdot 776 \cdot 9185 = 5898 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Далее находится температура стенки кессона

$$t_{ст.и} = q_u/\alpha_u + t_n = 600000/5898 + 350 = 470 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Полученное значение температуры стенки удовлетворяет условиям надежной работы оборудования. Следовательно, структуру с такими геометрическими характеристиками следует принять.

Таким образом, по сравнению с другими существующими охлаждающими системами (металлокерамическими, войлочными или порошковыми) сетчатая капиллярно-пористая структура, работающая в поле массовых сил, имеет ряд преимуществ. Коэффициент проницаемости становится меньше и уменьшается гидравлическое сопротивление всей структуры. Не требуется дополнительных установок для питания или привода такой системы, т.к. движение жидкости происходит за счет массовых и капиллярных сил в подобранной экспериментально капиллярно-пористой структуре.

Гидравлическое сопротивление при кипении воды будет в 40,4 раза меньше, чем в тепловых трубах с мелкоячеистыми сетками, и тем более с волокнистыми, порошковыми или керамическими материалами. Это позволяет охлаждать кессонные поверхности больших габаритов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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, V.10, april, -pp. 273-286.
- [2] Генбач А.А., Федоров В.Н., Шелгинский А.Я. Интенсивность теплообмена при кипении жидкости в капиллярно-пористых структурах в поле массовых сил //Труды МЭИ. – 1980. – Вып.448. – Теплообменные процессы и установки. – С.27-32.
- [3] Поляев В.М., Генбач А.А. Плотность центров парообразования и выброс капель из пористой структуры // Известия вузов. Машиностроение. -1990, №9. -С.50-55.
- [4] Поляев В.М., Генбач А.А. Отрывной диаметр и частота отрыва паровых пузырей в пористых структурах// Вестник МГТУ. Соз. Машиностроение. -1990. №1-С.69-72.
- [5] Поляев В.М., Генбач А.А. Начальная область парообразования в пористых структурах, работающих с избытком жидкости// Известия вузов. Энергетика.-1991.№2.-с.84-87.
- [6] Поляев В.М., Генбач А.А. Механизм процессов парообразования в пористой системе охлаждения // Теория рабочих процессов в узлах и трактах энергетических установок: Сборник трудов МАИ. – М., 1991. – С.81-90.
- [7] Поляев В.М., Генбач А.А., Минашкин Д.В. Визуализация процессов в пористом эллиптическом теплообменнике // Известия вузов. Машиностроение. – М., 1991. .№10–12. – С.75-80.
- [8] Поляев В.М., Генбач А.А. Пористое охлаждение камер сгорания и сверхзвуковых сопел // Тяжелое машиностроение. – М.,1991. №7. – С.8-10.
- [9] Polyayev V., Genbach A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces // Thermal Engineering. - M. 1993. V.40, number 7. - pp.551-554.

REFERENCES

- [1] 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, V.10, april, -pp. 273-286 (in Eng.).
- [2] Genbach A.A., Fedorov V.N., Shelginsky A.Y. The intensity of the boiling heat transfer fluid in the capillary-porous structure in the field of mass forces // heat and mass exchange processes and plants: Proceedings of MPEI, Issue 448, Moscow, 1980 pp. 27-32 (in Russ.).
- [3] Polyayev V.M., Genbach A.A. The density of nucleation sites and the release of droplets from the porous structure // Proceedings of the universities. Mechanical Engineering. - 1990. №9. - pp. 50-55 (in Russ.).
- [4] Polyayev V.M., Genbach A.A. Detachable diameter and frequency separation of vapor bubbles in porous structures // Bulletin MSTU series Mashinostroenie.-1990. №1, pp. 69-72 (in Russ.).
- [5] Polyayev V.M., Genbach A.A. The initial area of evaporation in porous structures, working with excess fluid // Proceedings of the universities. Energy. - 1991. № 2. - pp. 84-87. (in Russ.).
- [6] Polyayev V.M., Genbach A.A. The mechanism of evaporation processes in porous cooling system (Mechanism prosessov paroobrazovaniya v poristyh sisteme okhlzhdeniya.) Teoriya rabochih processov v uzlah i traktah energeticheskikh ustanovok:Sbornik trudov MAI, M., 1991, pp.81-90. (in Russ.).
- [7] Polyayev V.M., Genbach A.A., Minashkin D.V. Visualization of processes in porous elliptical coil // Proceedings of the universities. Mechanical Engineering-1991. № 10-12, pp.75-80. (in Russ.).

[8] Polyayev V.M., Genbach A.A. Transpiration cooling of the combustion chambers and supersonic nozzles // Tyazholoe Mashinostroenie. - 1991. №7. - pp. 8-10. (in Russ.).

[9] Polyayev V., Genbach A. Heat Transfer in a Porous System in the Presence of Both Capillary and Gravity Forces // Thermal Engineering. - M. 1993. V.40, number 7. - pp.551-554. (in Eng.).

УДК 536.248.2

А.А. Генбач, Н.О. Джаманкулова

Алматы энергетика және байланыс университеты, Қазақстан Республикасы, Алматы

**ЖОҒАРҒЫ ҮДЕМЕЛІ КАПИЛЛЯРЛЫҚ-КЕУЕКТІК
ЖЫЛУАЛМАСТЫРҒЫШТЫ ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ЕСЕПТЕУ**

Андатпа. Балқыту агрегаттарының кессондарын салқындатудың капиллярлық-кеуектік жүйесі зерттеліп, әзірленіп және есептелді. 2×10^{-3} м торлы кеуекті құрылымның тәжірибелік түрі анықталды. Салқындату жүйесінің жылу беру қасиеті алты есе артты. Әсіресе, талшықты, ұнтақты және керамикалық материалды жылулық құбырлардың бітелелері үшін, судың қайнау кезінде гидравликалық кедергісі торлы жылулық құбырларға қарағанда 40,4 есе аз болады. Кессон кеуектік құрылымдағы сұйықтың аз мөлшері есебінен пештердің салқындатуын жарылыссыз жүргізуге мүмкіндік береді. Агрегат қаптауының кессондау жүйесі және капиллярлық-кеуектік жүйесімен кессонды салқындату сұлбасы көрсетілген. Біздің тәжірибелік зерттеулерде капиллярлық-кеуектік құрылымдағы гидравликалық кедергі, ағынның жылдамдығы мен толық қызбауын анықтайтын, сұйықтық артығын ескеретін жылуалмасудың критериалық теңдеуі және қабырғаның жылуаккумуляторлық қасиеті алынды.

Тірек сөздер: капиллярлық-кеуекті жүйе; гидравликалық кедергі; салқындату жүйе; кессон; жылулық ағын.