

A. A. Genbach, N. O. JamankulovaAlmaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: dnellya@mail.ru**MAIN DIRECTIONS OF DEVELOPMENTS OF CAPILLARY-POROUS
HEAT EXCHANGERS OF NEW HEAT-REMOVING CLASS**

Abstract. The required information is received and developed on the basis of fundamental studies of capillary-porous systems operating in the field of mass forces. Integral and thermohydraulic characteristics of heat transfer were obtained depending on the pressure, heat flux, excess fluid, heating method, the material type, method for supplying coolant, type of intensifier and other factors. The required information is used in the design, engineering calculations and operation of different energy installations of power plants. Control of a heat transfer allows allocating new system in a separate heat-removing class. Heat exchange devices were designed to improve the reliability and efficiency, taking into account the ecology. Explosion-proof capillary-porous box-shaped heat exchanger was considered and the engineering calculation of its operational and limiting characteristics was given.

Key words: capillary-porous cooling system; thermohydraulic characteristics; capillary-porous heat exchanger; thermal energy installations.

УДК 536.248.2

А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК
КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ
НОВОГО ТЕПЛОТВОДЯЩЕГО КЛАССА**

Аннотация. Разработана и получена требуемая информация на основе фундаментальных исследований капиллярно-пористой систем, работающих в поле массовых сил. Интегральные и термогидравлические характеристики теплопередачи получены в зависимости от давления, теплового потока, избытка жидкости, метода нагрева, вида материала, способа подвода охладителя, вида интенсификатора и других факторов. Требуемая информация используется при проектировании, инженерном расчете и эксплуатации различных энергоустановок электростанций. Управление теплопередачей позволяет выделить новую систему в отдельный теплоотводящий класс. Разработаны теплообменные устройства с целью повышения надежности и эффективности с учетом экологии. Рассмотрен взрывобезопасный капиллярно-пористый коробчатый теплообменник и дан инженерный расчет его рабочих и предельных характеристик.

Ключевые слова: капиллярно-пористая система охлаждения; термогидравлические характеристики; капиллярно-пористый теплообменник; тепловые энергоустановки.

Разработка и исследование капиллярно-пористых систем охлаждения, работающих при совместном действии массовых и капиллярных сил, создающих недогрев и скорость потока в сечении и на поверхности структуры, позволили расширить отвод тепловых потоков, увеличив форсировку теплообмена [1-3] и интенсифицировать процессы теплопередачи [4-8]. Исследования кризиса теплообмена производилось с помощью голографической интерферометрии, оптико-поляризационного метода (фотоупругости) [1] и метода термоупругости [2, 3]. Интенсификация процессов теплообмена [4] достигалась за счет управления энергиями тепловой волны, характеристиками кипения [5] и параметрами теплообмена [6]. Экспериментальные данные обобщались с

помощью теории подобия, моделирования и аналогии явлений теплообмена [7], что позволило получить расчетные зависимости по определению тепловых потоков и температурных напоров в зависимости от режимных и конструктивных параметров структуры и теплообменной поверхности [8, 9].

Важнейшим фактором интенсификации энергетического производства является усиление режима экономии с учетом требований экологии. Необходимо удовлетворить растущие потребности в топливе, энергии и сырье главным образом за счет экономии материально-сырьевых ресурсов, улучшения использования вторичных ресурсов. Этому могут способствовать пористые системы.

Экономия энергии в промышленности особо остро ощущается в настоящее время, поскольку первичные энергоресурсы в обозримом будущем будут истощены, если их использовать так, как на современном этапе, а решение проблемы загрязнения биосферы больше не может откладываться, причем эту проблему надо решать не регионально, а в глобальном масштабе. Значительное количество объектов в тепловых энергетических установках теплоэлектростанций (ТЭУ ТЭС) нуждаются в утилизации тепла. Даже незначительный перечень оборудования и процессов выявляет существенные резервы получения экономии энергии, однако требует разработки новых технических решений.

В энергоустановках начинают внедряться пористые системы, выполненные в виде тепловых труб. Они позволяют с высокой интенсивностью и надежностью отводить и транспортировать высокие тепловые потоки, решая ряд экологических проблем, выдвинутых в результате антропогенного воздействия на окружающую природную среду: способствовать экономии природных ресурсов, воды, кислорода, снижать количество вредных выбросов.

Пористое охлаждение оказалось эффективным для лопаток газовых турбин. Воздух подвигался во внутренние полости лопасти и продавливался через пористую стенку. По сравнению с конвективным или конвективно-плечным охлаждением сокращался расход воздуха, однако требовалось тщательно очищать воздух от пыли и не допускать забивания пор частицами, содержащимися в продуктах сгорания.

Практическое применение теплопередающие устройства нашли в электрических машинах. Рассматривались системы охлаждения ротора с помощью центробежного термосифона, и статора – тепловыми трубами и испарительными контурами. Тепловые трубы создают внутри радиоэлектронных приборов области с равномерным температурным полем, термостабилизируют поверхности нагрева, конструктивно решают проблемы теплоотвода путем выноса их поверхности за пределы блоков и узлов.

Для утилизации теплоты вентиляционных выбросов применяется теплообменник с ребристыми тепловыми трубами. Стенка трубы может рассматриваться как дополнительное термическое сопротивление, однако эффективность теплопередачи внутри самой трубы настолько велика, что в аппарате утилизировалось до 70% сбросной теплоты. Основное преимущество теплообменников по сравнению с вращающим регенератором и устройством с промежуточным теплоносителем – их надежность. Выход из строя нескольких труб лишь незначительно снижало эффективность работы; нет вращающихся частей и связанных с ними шума и вибрации.

Областью применения пористых сетчатых материалов являлись системы охлаждения, аппараты пылегазоочистки и генерации пены, фильтрующие элементы для очистки сточных вод с достаточно широким диапазоном тонкости очистки фильтровальных сетчатых материалов – от 5 до 100×10^{-6} м, смесители, огнепреградители, аэраторы, глушители шума, химические башни, испарители, дистилляционные колонки.

Сетчатые материалы из вязаных сеток, обладающие высокой пористостью, применялись в звукопоглощающих конструкциях энергетических установок. Акустическая эффективность шумопоглощающих панелей, установленных с зазором 10×10^{-3} м в диапазоне частот (200...10000) Гц, составляла (5...10) дБ. Разработка предлагаемых пористых систем, работающих в поле массовых сил, в перспективе должна быть направлена на создание компактных, надежных и взрывобезопасных устройств для охлаждения теплонагруженных котлов и газотурбинных установок, утилизационных теплообменников, способных резко уменьшить низкотемпературную коррозию поверхностей нагрева и утилизировать теплоту уходящих газов котельных, металлургических печей, компрессорных станций. Пористые системы должны повысить надежность, экономичность и маневренность работы теплонагруженных элементов паровых котлов, турбин, котлов-утилизаторов, горелок, буров, снизить концентрацию оксидов азота в топочных камерах и улучшить экологические условия окружающей среды. Требуются решения задач по предотвращению загрязнения воды и почвы маслом и нефтепродуктами, утилизации низкопотенциального тепла в градир-

нях, прудах-охладителях, для отопления зданий, сооружений, теплиц и кондиционирования воздуха. Необходимы новые технические устройства пористых фильтров для пылегазоочистки. Пористые системы могут быть полезны при решении продовольственной программы и ряда задач по обеспечению электропожаробезопасности при обогреве шпилек и фланцев турбин и производственно-бытовых помещений [2-4, 6-9].

Ориентировочные значения коэффициентов теплообмена α , Вт/м²К и коэффициентов теплопередачи K , Вт/м²К, в теплообменных устройствах энергоустановок можно представить в общем виде:

1. При нагревании и охлаждении воздуха $\alpha = 1 \dots 50$;
2. При нагревании и охлаждении перегретого пара $\alpha = 20 \dots 100$;
3. При нагревании и охлаждении масел $\alpha = 50 \dots 1500$;
4. При нагревании и охлаждении воды $\alpha = 200 \dots 10000$;
5. При кипении $\alpha = 500 \dots 45000$;
6. При пленочной конденсации водяных паров $\alpha = 4000 \dots 15000$;
7. При капельной конденсации водяных паров $\alpha = 40000 \dots 120000$;
8. При теплопередаче от газа к газу 25;
9. При теплопередаче от газа к воде 50;
10. При теплопередаче от воды к воде 1000;
11. При теплопередаче от конденсирующих паров к воде 3500.

Для повышения надежности и эффективности стационарных теплообменников с учетом экологии нами разработаны следующие устройства [2, 4, 8, 9]:

- 1) Конденсаторы турбин на пористых структурах;
- 2) Интенсификаторы деаэрации в конденсато-сборниках;
- 3) Утилизаторы сбросной теплоты путем применения «триады»: тепловые трубы, вихревые трубы, тепловые насосы, создание электростанций без градирен и без дымовых труб;
- 4) Градири с пористыми элементами;
- 5) Пористые вставки для борьбы с кавитацией в конденсатных и питательных насосах;
- 6) Интенсификаторы теплообмена в подогревателях с пористыми элементами;
- 7) Пористые структуры в деаэраторах, повышающие эффективность дегазации;
- 8) Пористые структуры для повышения эффективности сепарации пара и теплообмена в сепараторах-пароперегревателях;
- 9) Маслоохладители на тепловых трубах, исключающие попадания масла в воду и наоборот;
- 10) Пористые маслоохладители;
- 11) Барботеры в пористых деаэраторах;
- 12) Пористые испарители;
- 13) Тепловые трубы в тепличном хозяйстве (управление фенофазами цветения, пористый полив, хранение плодов);
- 14) Волнистые пористые двухфазные теплообменники;
- 15) Пористые сетевые подогреватели;
- 16) Пористые отопители;
- 17) Пористые теплообменники на эффекте Коанда;
- 18) Пористые теплообменники в виде пенетратора;
- 19) Пористые теплообменники, использующие эффект разделения, концентрации, транспорта, стока и управления энергиями волны и газов;
- 20) Теплообменники на основе управляемых гибких пористых структур.

Рассмотрим в качестве иллюстрации применения капиллярно-пористых систем охлаждение плавильных агрегатов с целью их взрывобезопасности.

Конструктивное исполнение кессонов (рисунок) 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 стекающей избыточной жидкости по внешней поверхности

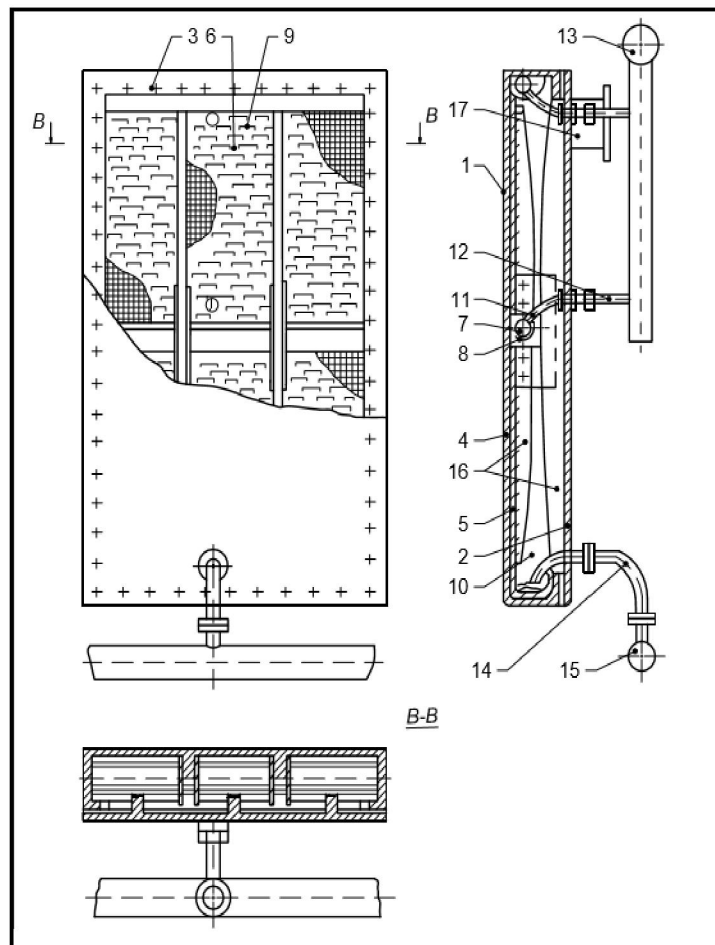


Рисунок 1 – Схема охлаждения кессона капиллярно-пористой системы с внутренним оребрением:
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – болт; 4 – стенка; 5 – капиллярно-пористая структура; 6 – пластина; 7 – артерия; 8 – корытце;
 9 – отверстие; 10 – канал; 11, 17 – патрубок; 12 – труба; 13, 15 – коллектор; 14 – сифон;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

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, 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 изготавливают 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.

Инженерный расчет рабочих и предельных характеристик капиллярно-пористой системы охлаждения может быть выполнен с использованием номограммного метода.

Для построения характеристик предварительно определяют геометрические параметры охлаждающей системы и пористой структуры.

Расчет производится на основе соотношения для тепловой мощности

$$Q = \frac{T_{CT}^H - T_{CT}^K}{\frac{1}{\alpha_H F_H} + \frac{1}{\alpha_K F_K}}, \text{ Вт.} \quad (1)$$

Величина коэффициента теплообмена испарителя α_n определяется по полученному нами критериальному уравнению [7], либо по расчетным зависимостям [3,6,8].

Задаваясь температурой стенки в конденсаторе $T_{CT}^K = \text{const}$ для ряда значений температуры пара T_n , определяют необходимые физические параметры жидкости в конденсаторе, и строится график $\alpha_n = f(T_n)$. Из формулы

$$Q = \alpha_K F_K (T_n - T_{Ж}^K), Bm, \quad (2)$$

где $T_{Ж}^K = 0,5(T_n + T_{CT}^K)$, находят для ряда значений T_n соответствующие значения Q .

Задаваясь несколькими значениями T_{CT}^H , определяют параметры жидкости в испарителе при выбранной температуре пара и строят графики для $\alpha_n = f(T_{CT}^H)$ по упомянутым формулам и по формуле

$$\alpha_n = \frac{Q}{(T_{CT}^H - T_n) F_n}, Bm / m^2 K. \quad (3)$$

Точка пересечения кривых дает искомую температуру T_{CT}^H .

Таким образом, может быть нанесена сетка эквидистантных линий в плоскости $Q = f(T_{CT}^H)$ для различных значений T_{CT}^K , причем следует учитывать теплопередающие возможности, ограниченные кризисными явлениями [2, 3, 9].

Для построения номограммы необходимо также знать закономерности теплообмена охлаждающей системы с окружающей средой ($\alpha_K^B = \text{const}$). Для этого, например, задаются коэффициенты теплообмена с внешней средой, либо принимают условия построения температуры окружающей среды ($T_{OC} = \text{const}$).

Величина Q определяется по формуле, характеризующей теплообмен наружной стенки конденсатора с окружающей средой

$$Q = \alpha_K^B F_K (T_{CT}^K - T_{OC}), Bm. \quad (4)$$

Тогда каждой величине Q (или T_{CT}^K) соответствует определенное значение T_{CT}^K (или Q). Следовательно, изменением внешних условий теплообмена с окружающей средой можно регулировать T_{CT}^H при заданном тепловыделении.

В случае, если задается температура стенки охлаждаемого элемента, необходимо задаться рядом значений критерия Рейнольдса Re , по которому вычисляют ряд значений чисел Стантона и, определив величину α_n , уточняют T_{CT}^H .

Если температура стенки будет превышать заданное значение, необходимо уменьшить величину Re и, следовательно, отводимую тепловую нагрузку.

Таким образом, на основе проведенных фундаментальных исследований на моделях и натуре теплогидравлических характеристик теплопередачи, получена требуемая информация для разработки, проектирования, инженерного расчета и эксплуатации капиллярно-пористых систем в различных тепловых энергетических установках электростанций.

Дальнейшая разработка высокоэффективных аппаратов с пористыми структурами позволяет превращать энергопроизводства в экологически чистые, улучшать условия охраны труда, существенно экономить природные ресурсы, интенсифицировать процессы в альтернативных источниках, предохранять воздух, воду и почву от загрязнений, в том числе «тепловых», решать методические задачи и долгосрочные проблемы выработки, транспорта и аккумуляирования энергии.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. An experimental study of thermal stress in porous materials by methods of holography and photoelasticity // Experimental thermal and fluid science, avenue of the Americas. – New-York, 1992. – Vol. 5, N 6. – P. 697-702.

- [2] Генбач А.А., Бурмистров А.В. Исследование теплового состояния цилиндров паровых турбин // Промышленность Казахстана. 2011, март-апрель. – № 2 (65). – С. 91-93.
- [3] Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А. Предельное состояние поверхности при термическом воздействии // ТВТ. – 1991. – Т. 29, № 5. – С. 923-934.
- [4] 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.
- [5] Поляев В.М., Генбач А.А. Управление внутренними характеристиками кипения в пористой системе // Криогенная техника и кондиционирование: Сб. трудов МГТУ. – 1991. – С. 224-237.
- [6] 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.
- [7] Поляев В.М., Генбач А.А. Теплообмен в пористой системе, работающей при совместном действии капиллярных и гравитационных сил // Теплоэнергетика. – 1993. – № 7. – С. 55-58.
- [8] Поляев В.М., Генбач А.А. Интенсивность теплообмена пористой системы в гравитационном поле // Известия вузов. Энергетика. – 1993. – № 1, 2. – С. 91-95.
- [9] Поляев В.М., Генбач А.А. Предельные тепловые нагрузки в пористых структурах // Известия вузов. Авиационная техника. – 1991. – № 1. – С. 33-37.

REFERENCES

- [1] Polyayev V.M., Genbach A.N., Genbach A.A. An experimental study of thermal stress in porous materials by methods of holography and photoelasticity. *Experimental thermal and fluid science, avenue of the Americas*, New-York, volume 5, number 6, November, 1992, pp. 697-702. (in Eng.).
- [2] Genbach A.A., Burmistrov A.V. Issledovanie teplovogo sostoyaniya tsilindrov parovykh turbin. *Promyshlennost Kazakhstana*, 2011, N 2 (65), pp. 91-93. (in Russ.).
- [3] Polyayev V. M., Genbach A.N., Genbach A.A. A limit condition of a surface at thermal influence, *TVT*, 1991, Vol. 29, N 5, pp. 923-934. (in Russ.).
- [4] 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, pp. 639-644. (in Eng.).
- [5] Polyayev V.M., Genbach A.A. Upravlenie vnutrennimi kharakteristikami kipeniya poristoy sistemy. *Sbornik trudov MGTU*, 1991, pp. 224-237. (in Russ.).
- [6] Polyayev V.M., Genbach A.A. Upravleniye teploobmenom v poristyykh strukturah. *Isvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika i transport*, 1992, Vol.38, N6. pp. 105-110. (in Russ.).
- [7] Polyayev V.M., Genbach A.A. Teploobmen v poristoy sisteme, rabotayushey pri sovmestnom deystvii kapillyarnyykh i gravitatsionnykh sil. *Teploenergetika*, 1993, N 7, pp. 55-58. (in Russ.).
- [8] Polyayev V.M., Genbach A.A. Intensivnost teploobmena poristoy sistemy v gravitatsionnom pole. *Isvestiya vuzov. Energetika*, 1993, N 1,2, pp. 91-95. (in Russ.).
- [9] Polyayev V.M., Genbach A.A. Predelnye teplovye nagruzki v poristyykh strukturah. *Isvestiya vuzov. Aviatzionnaya tekhnika*, 1991, N1. pp. 33-37. (in Russ.).

А. А. Генбач, Н. О. Джаманкулова

Алматы энергетика және байланыс университеты, Алматы, Қазақстан

ЖАҢА ЖЫЛУДЫ БӨЛІП АЛУШЫ КЛАСҚА ЖАТАТЫН КАПИЛЛЯРЛЫҚ-КЕУЕКТІК ЖЫЛУ АЛМАСТЫРҒЫШТАР ЖАСАУДЫҢ НЕГІЗГІ БАҒЫТТАРЫ

Аннотация. Массалық күштер өрісінде жұмыс істейтін капиллярлық-кеуектік жүйелерді жасап, зерттеудің негізінде қажетті мәліметтер алынған. Жылу берілудің қысымға, жылулық ағынға, сұйықтың артық шамасына, кыздыру әдісіне, материалдың түріне, салқындатқышты жеткізу тәсіліне, интенсификатор түніне және басқа факторларға тәуелді болатын интегралдық және жылу гидравликалық сипаттамалары алынды. Талап етілетін мәліметтер электр станцияларының әртүрлі энергетикалық қондырғыларын жобалау, инженерлік есептеу және пайдалану кезінде қолданылады. Жылу берілуді басқару жаңа жүйені айрықша жылуды бөліп алушы класқа өткізуге мүмкіндік береді. Экологияны ескере отырып, жүйенің сенімділігі мен тиімділігін жоғарылату мақсатында жылу алмастырғыш қондырғылар жасалды. Жарылыстан қорғалған капиллярлық-кеуектік қораптық жылу алмастырғыш қарастырылып, оның жұмыстық және шектік сипаттамаларының инженерлік есептеулері берілген.

Түйін сөздер: салқындатудың капиллярлық-кеуектік жүйесі, жылу гидравликалық сипаттамалары, капиллярлық-кеуектік жылу алмастырғыш, жылулық энергетикалық қондырғылар.