

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

SERIES OF GEOLOGY AND TECHNICAL SCIENCES

ISSN 2224-5278

Volume 2, Number 428 (2018), 229 – 235

A. A. Genbatch¹, D. Yu. Bondartsev²¹Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Kazakhstan,²Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, JSC «TrestSredazenergomontazh», Kazakhstan.

E-mail: d.bondartsev@saem.kz

EXPERIMENTAL METHOD OF INVESTIGATION OF THE HEAT TRANSFER CRISIS IN A CAPILLARY-POROUS COOLING SYSTEM

Abstract. The crisis of heat exchange in grid porous structures at boiling water is studied. The study relates to heat and power installations of power plants. Experiments were carried out on an electric testing bench and on a rocket type burner, in which combustion chambers and supersonic nozzles were cooled with various capillary-porous structures. The model and mechanism of the heat exchange processes are described, the optimal dimensions of the cells of the porous structures are determined, and computational equations for determining the critical heat flow for a wide variation of pressure in the system and the parameters of the porous structures (pore sizes, structure thickness, permeability, geometric dimensions of the cooling surface and its orientation) are obtained. Experimental installations for determining integral (average) heat-exchange parameters in a capillary-porous cooling system are produced: operation scheme and a measurement technique, a cooling element with tubular arteries structure, a perforated clamping plate and micro arteries. Studies were carried out until the wall and the capillary-porous structures were overburnt.

Keywords: heat transfer crisis, capillary-porous structure, heat and power installations, steam bubble, capillary forces, mass forces, heat transfer control, permeability.

УДК 536.248.2

А. А. Генбач¹, Д. Ю. Бондарцев²¹АУЭС, Казахстан,²АУЭС, АО «Трест Средазэнергомонтаж»**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ КРИЗИСА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Аннотация. Исследован кризис теплообмена при кипении воды в сетчатых пористых структурах. Изучение относится к тепловым энергетическим установкам электростанций. Эксперименты проводились на электрическом стенде и на горелке ракетного типа, в которой охлаждались камеры сгорания и сверхзвуковые сопла различными капиллярно-пористыми структурами. Описаны модель и механизм процессов теплообмена, определены оптимальные размеры ячеек пористых структур, получены расчетные уравнения для определения критического теплового потока для широкого изменения давления в системе и характеристик пористых структур (размеры пор, толщины структуры, проницаемости, геометрических размеров поверхности охлаждения и ее ориентации). Разработаны экспериментальные установки для определения интегральных (средних) теплообменных характеристик в капиллярно-пористой системе охлаждения: приведена схема функционирования и методика измерений, устройство охлаждающего элемента с трубчатыми артериями, перфорированной прижимной пластиной и микроартериями. Исследования проводились вплоть до пережога стенки и капиллярно-пористых структур.

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

Введение. Применение пористых материалов в котлотурбинной технике привлекали многих исследователей создавать различные устройства. Повышались 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 порых и капиллярах структур, 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 [22, 23].

Основные области практического применения капиллярно-пористых систем нами защищены патентами и авторскими свидетельствами на изобретения. Внедрение оборудования и технологических процессов в энергетике должно производиться прежде всего с эколого-экономических позиций. Предлагаемые разработки будут способствовать проведению процессов, существенно улучшая и сохраняя природную среду [3, 5, 8-11].

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 таких 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.

Авторы [12] 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 [13,14]. Однако исследования теплообмена по регулярной структурированной поверхности не проводилось. По мнению авторов [15,16] 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 [12-14] при высоких тепловых потоках, и на более высокие показатели теплопередачи, чем у систем с капиллярно-пористым покрытием [15, 16]. Требуется провести исследования теплопередающих возможностей покрытий, работающих в поле капиллярных и массовых сил, и установить величины критических нагрузок, приводящих к пережогу теплообменных поверхностей нагрева. Разработана методика исследования капиллярно-пористых систем применительно к различным элементам энергоустановок. Системы отличаются тем, что имеют преимущественно гравитационный подвод жидкости и по интенсивности теплопередачи занимают промежуточное положение между тонкопленочными и пористыми испарителями с преимущественно капиллярным подводом жидкости (тепловыми трубами). Поэтому такие системы следует выделить в отдельный класс теплоотводящих систем.

Проведенные исследования позволяют дать рекомендации по выбору теплохолодоносителя, учесть вид его циркуляции, определить геометрию и материал аппаратов и интенсификаторов теплообмена, с учетом условий и ориентаций работы системы под давлением или разрежением, подводом и видом энергии, ориентации системы. Обобщение экспериментальных результатов и методика расчета тепло- и массообмена в капиллярно-пористых системах в соответствии с разработанной методикой представлены в [17-23].

Исследование различных факторов, влияющих на теплообмен в структурах, показывают, что особый интерес вызывают предельные состояния поверхности нагрева, когда система способна переносить максимальные потоки энергии и вещества. Однако в этом случае требуется знать величины тепловых потоков и термических напряжений с целью обеспечить надежную долговечную работу установки. Так можно получить максимальный перенос энергии и вещества для следующих условий: используется чистая жидкость, циркулирующая по принудительной схеме в закрытых эллиптических теплообменниках под давлением в перфорированных и профилированных поверхностях нагрева, выполненных из нержавеющей стали. Система работает с избытком жидкости, а наличие массовых сил обеспечивает вынужденное течение теплоносителя с недогревом. Энергия подводится к вертикально расположенной поверхности по периметру сверхзвуковым высокотемпературным пульсирующим вращающимся факелом [1, 3, 11,19].

Методы. Разработаны экспериментальные установки, которые позволяют исследовать интегральные характеристики теплопередачи: удельные тепловые потоки q , расходы жидкости и пара $m_{ж}$, $m_{п}$, распределение температурного поля по высоте и длине теплообменной поверхности. 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 структуры; способность подпитки структуры из микроартерий по высоте теплообменной поверхности; ориентация поверхности относительно гравитационных сил; плоские, трубчатые и искривленные поверхности охлаждения; геометрия: влияние давления вплоть до кризисных явлений с пережогом стенки.

Для исследования механизма теплообмена привлекаются методы голографии, обобщение подобных и аналогичных явлений [1, 3, 11, 20, 23]. Управление теплообменом проводится за счет эллиптических систем, путем комбинированного действия капиллярных и массовых сил [1,3]. Изучение теплообмена носит практический характер, предназначено для создания различных тепловых энергоустановок: пористых кожухов для трубопроводов, пароохлаждателей паровых котлов, пористых покрытий из плохотеплопроводного материала, уплотнений в паровых турбинах и ряда других энергоустановок [1, 3, 7, 10, 22].

На рисунке 1, показана схема функционирования пористой системы охлаждения, методика измерения температуры поверхности нагрева $t_{ст}$ и расходов жидкости: $m_{ж}^б$, m_1 , m_2 , $m_{сл}$, $m_к$, $m_{ц.в.}$, $m_{воз}$ и пара $m_{п}$. Принятые индексы: б – бак, сл – слив, к – конденсат, ц.в. – циркуляционная вода, воз. – воздух. Измерялись температуры жидкости $t_{ж}^б$, $t_{ж}^{сл}$, $t_{ж}^{вых}$, $t_{ж}^{вх}$, пара $t_{п}$, электрической изоляции $t_{эл}^н = t_{диф}$.

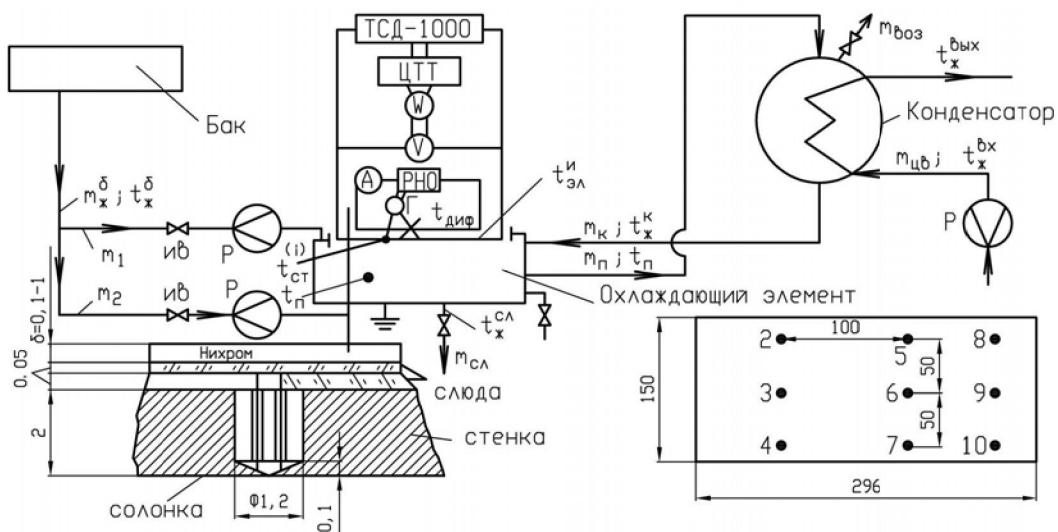


Рисунок 1 – Схема функционирования пористой системы и методика измерений:
 ТСД-1000 – сварочный трансформатор; УТТ – универсальный трансформатор тока; W – ваттметр; V – вольтметр;
 А – амперметр; РНО – регулятор напряжения; Г – гальванометр; Р – ротаметр; ИВ – игольчатый вентиль

На рисунке 2, представлен охлаждающий элемент с капиллярно-пористой структурой. Он позволяет изучить схемы подвода жидкости из трубчатых артерий 3, влияние высоты теплообменной поверхности h , степень прижатия структуры с помощью перфорированной пластины 10 и интенсивность раздачи охладителя микроартериями 11.

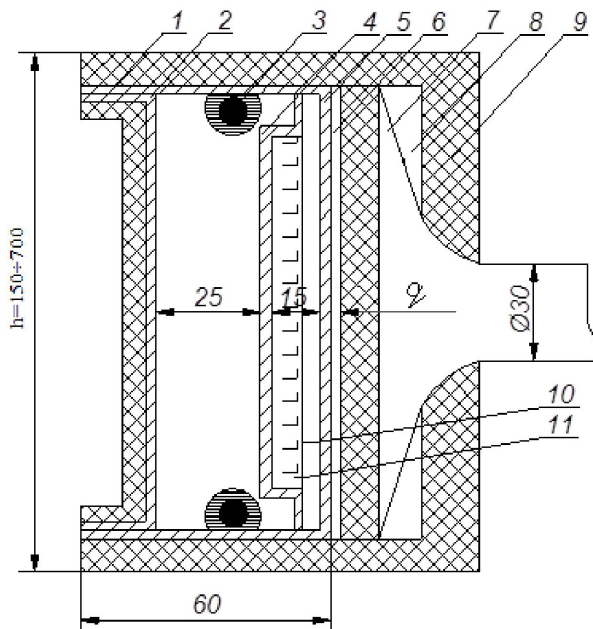


Рисунок 2 – Охлаждающий элемент с капиллярно-пористой структурой: 1 – корпус, 2 – крышка, 3 – трубчатая артерия, 4 – вставка, 5 – капиллярно-пористая структура, 6 – электроизоляция (слюда), 7 – основной нагреватель, 8 – охранный нагреватель, 9 – теплоизоляция, 10 – перфорированная прижимная пластина, 11 – микроартерия

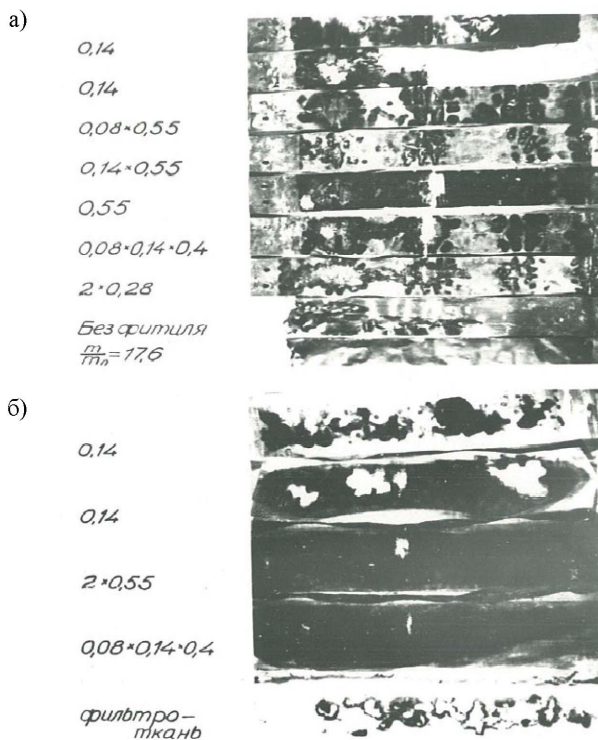


Рисунок 3 – Перегоревшие нагреватели (а) и капиллярно-пористые структуры (б) фитиля. Избыток жидкости изменялся от $m_{ж}/m_{ц} = 1$ до 17,6

Исследования теплообмена проводились до возникновения кризиса кипения с пережогом поверхности и капиллярно-пористой структуры (рисунок 3 а, б), причем избыток жидкости $m_{ж}/m_{п} =$ от 1 до 17,6.

Условия проведения опытов. Подвод электрической энергии к основному нагревателю осуществляется от сварочного трансформатора типа ТСД-1000, выходное напряжение которого составляет следующие фиксированные значения: 2,5; 5; 7,5 и 10 (см. рисунок 1). Электрический ток, питающий нагреватель, измеряется по схеме с универсальным трансформатором типа УТТ-6М2 кл.0,2. Вторичный ток составляет до 5 А, первичный – 100–2000 А. Падение напряжения на нагревателе измеряется вольтметром типа Д523 кл. 0,5. Наибольшая возможная погрешность при измерении тока – $\pm 0,6\%$, падение напряжения – $\pm 1\%$, мощности – $\pm 1,6\%$. Электрическая энергия на охранный нагреватель подается от регулятора напряжения типа РНО.

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

Температуры жидкости слива и пара измеряются хромель-копелевыми термопарами, изготовленными из проволоки диаметром $0,1 \cdot 10^{-3}$ м. Диаметр головки спая термопар составляет $0,4 \cdot 10^{-3}$ м. Электроды термопар изолируются двухканальными сололками диаметром $1 \cdot 10^{-3}$ м, которые крепятся клеем БФ-2 внутри инъекционных игл, имеющих диаметр $1,2 \cdot 10^{-3}$ м.

Для измерения температуры стенки электроды термопар диаметром $0,2 \cdot 10^{-3}$ м привариваются к ней электрической дугой, образующейся во время разрядки конденсаторов. Для этого нормально к поверхности стенки толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м производится сверление на глубину $1,9 \cdot 10^{-3}$ м диаметром $1,2 \cdot 10^{-3}$ с точностью $\pm 0,05 \cdot 10^{-3}$ м. Электроды термопар изолируются фарфоровой сололкой диаметром $1,2 \cdot 10^{-3}$ м и выводятся по поверхности стенки между двумя слоями слюды с толщиной $0,05 \cdot 10^{-3}$ м, приклеенной к поверхности нагревателя. Холодные концы термопар термостатируются в тающем льде. Электроды термопар соединяются с двумя двенадцатиточечными переключателями ПП-63 кл. 0,05. Для исключения влияния наведенных блуждающих токов на показания термопар установка и приборы заземляются. Расходы охлаждающей и циркуляционной жидкости определяются электрическими ротаметрами типа РЭД с вторичным электронным прибором типа КСДЗ 43 кл. 1, тарированным объемным методом. Расходы сливающейся жидкости и конденсата фиксируются с помощью мерной емкости со шкалой давления $0,5 \cdot 10^{-3}$ л, а время наполнения – секундомером типа С-П-16 с ценой деления 0,1 секунда.

Наибольшая возможная погрешность при определении расхода жидкости ротаметрами не превышает $\pm 3\%$, а объемным методом – $\pm 2\%$. Условный коэффициент проницаемости исследован в [3]. Разброс значений величины K_y при обобщении опытных данных не превышает $\pm 16\%$.

Эффективная теплопроводность смоченной сетчатой структуры определялась по формуле:

$$\lambda_{эф} = \lambda_{ж} \left[1 + \frac{1}{0,5 * a * b + c} \right] \text{ Вт/мК,}$$

где $a = 8 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$, $C = 1,35$ для сеток 12X18N9T; $a = 1,8 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$, $C = 0,73$ для латунных сеток.

Невязка баланса по подведенному током теплу и теплу, отведенному циркуляционной и избыточной воды с учетом $Q_{из}$, не превышает $\pm 12\%$, а по подведенному паром теплу в конденсаторе и теплу, отведенному циркуляционной водой – $\pm 11\%$. Расхождение материального баланса между расходом охлаждающей жидкости, расходом слива и конденсата оставляет не больше $\pm 10\%$. Методика измерений и обработки опытных данных опубликована в работах [2-4].

Заключение. Исследован кризис теплопередачи в капиллярно-пористых структурах в системе охлаждения элементов теплоэнергетических установок. Кризис теплообмена представлен на основе гидродинамических условий при совместном действии гравитационных и капиллярных сил. Предложенная модель кризиса, полученная с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих одномерное течение однофазной жидкости, отражает физическую картину процесса за счет ввода в общий градиент давления вязкостного члена и учета истинной скорости жидкости в пористой структуре с помощью расходного влагосодержания, что позволило получить расчетную формулу. Установлены критические величины высоты теплообменной поверхности и толщины

структуры для двух режимов гидродинамики жидкости, которым отвечает минимальная величина гидростатического напора, создающего оптимальное соотношение избытка в зависимости от геометрических параметров. Используя систему дифференциальных уравнений, описывающую одномерное течение однофазной жидкости, за счет ввода в общий градиент давления вязкого члена на основании закона Дарси и учета истинной скорости жидкости в пористой структуре с помощью критического влагосодержания, решена задача по определению критических тепловых нагрузок, в которых наряду с капиллярным потенциалом действует потенциал гравитационных сил.

Вывод. Исследования проведены для двух случаев: жидкость движется только в сечении пористой структуры и жидкость может свободно стекать по поверхности пористого тела. Следовательно, исследованные критического влагосодержания, условного коэффициента проницаемости и избытка жидкости величины учитывают влияние гравитационных сил, выраженное через скорость потока жидкости (направленное течение) и возможный недогрев жидкости до температуры насыщения. Мы доказали, что экспериментальная установка с подводом теплоты электрическим током оказалась эффективной, а так же поставить опыты с другим источником тепла сверхзвуковым факелом огнеструйной горелки. Опыты проводились для сетчатых структур и в будущем требуется провести многочисленные эксперименты с другими пористыми покрытиями в виде естественных минеральных сред, что позволит расширить результаты исследования и облегчит их применение.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Поляев В.М., Генбач А.А. Методы мониторинга энергетических процессов, Экспериментальная тепловая и жидкостная наука // Международная термодинамика. Экспериментальная теплопередача и механика жидкости. – Avenue of the Americas, New York, USA, 1995. – Vol. 10. – С. 273-286.
- [2] Поляев, В.М., Генбач А.А. Теплообмен в пористой системе при наличии как капиллярных, так и силовых сил // Тепловая инженерия. – 40 (1993), 7. – С. 551-554.
- [3] Поляев В.М., Генбач А.А. Предельное состояние поверхности при тепловом воздействии // Теплофизика Высоких Температур. – 29 (1991), 5. – С. 923-934.
- [4] Поляев В.М., Генбач А.А. Контроль теплопередачи в системе пористого охлаждения // Труды, 2-я Всемирная конференция по экспериментальному теплообмену, механике жидкости и термодинамике. – Дубровник, Югославия, 1991. – С. 639-644.
- [5] Поляев В.М., Генбач А.А. Процессы в пористом эллиптическом теплообменнике // Известия вузов, Машиностроение. – (1991), 4-6. – С. 73-77.
- [6] Генбач А.А., Бахытжанов И.Б. Защита от землетрясений Основы ТЭС с помощью пористых геожранов // Поиска, МОН РК. – (2012), 1. – С. 289-298.
- [7] Генбач А.А., Данильченко И. Паровые котлы с пористым пароохладителем // Промышленность Казахстана. – 70 (2012), 1. – С. 72-75.
- [8] Генбач А.А., Олжабаева К.С. Визуализация термического воздействия на пористый материал в тепловых энергетических установках электростанций // Бюллетень Национальной инженерной академии РК. – 45 (2012), 3. – С. 63-67.
- [9] Генбач А.А., Исламов Ф.А. Исследование сопловых филлетов в электроустановках // Вестник КазНТУ. – 97 (2013), 3. – С. 245-248.
- [10] Генбач А.А., Исламов Ф.А. Моделирование процесса паровой турбины // Вестник КазНТУ. – 100, (2013), 6. – С. 235-240.
- [11] Поляев В.М., Генбач А.А. Контроль теплообмена в пористых структурах // Труды Российской академии наук, Энергетика и транспорт. – 38 (1992), 6. – С. 105-110.
- [12] Jamialahmadi M. и др. Экспериментальные и теоретические исследования по переохлаждению проточного кипения чистых жидкостей и многокомпонентных смесей // Интерн. J Теплопередача. – 51 (2008), 9-10. – С. 2482-2493.
- [13] Ose Y., Kunugi T. Численное исследование кипения с переохлажденным пулом // Progr. In Nucl. Sci. and Technology. – 2, (2011). – С. 125-129.
- [14] Krepper E., и др. CFD Моделирование переохлажденной кипящей концепции, валидация и применение к конструкции сборки топлива // Nucl. Eng. and Design. – 237 (2007), 7. – С. 716-731.
- [15] Овсяник А.В. Моделирование процессов теплообмена на кипящих жидкостях // Гомельский государственный технический университет им. П.О., Сухой, Гомель, Беларусь, 2012.
- [16] Алексей О.С., Кравец В.Ю. Физическая модель кипения пористой структуры в ограниченном пространстве. Восточно-Европейский журнал корпоративных технологий. – 64 (2013), 4/8. – С. 26-31.
- [17] Поляев В.М., Генбач А.А. Анализ законов трения и теплообмена в пористой структуре // Вестник МГТУ, Серия машиностроения. – (1991), 4. – С. 86-96.
- [18] Поляев В.М., Генбач А.А., Влияние давления на интенсивность теплообмена в пористой системе // Известия вузов, Машиностроение. – (1992), 4-6. – С. 68-72.
- [19] Поляев В.М., Генбач А.А. Область применения пористой системы // Известия Вузов, Энергетика. – (1991), 12. – С. 97-101.

[20] Генбач А.А., Джаманкулова Н.О., Бакич Вукман В. Процессы испарения в пористых структурах, работающих с избытком жидкости // Thermal Science. – 2017. – Vol. 21, N 1A. – P. 363-373.

[21] Генбач А.А., Олжабаева К.С., Илиев И.К. Процесс кипения в масляных охладителях на пористых элементах // Thermal Science. – 2016. – Vol. 20, N 5. P. 1777-1789.

[22] Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Установки для исследования различных условий теплообмена в капиллярно-пористых структурах энергооборудования // Вестник КазНУ. – 2017. – № 1(119). – С. 183-189.

[23] Genbach A.A., Bondartsev D.Iu., Iliev I.K. Equipment for study of various heat exchange conditions in capillary-porous structures of power equipment // 6-th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development TE-RE-RD 2017, 8-10 June 2017. – P. 37-42.

Обозначения:

$t_{ст}$, $t_{ж}^6$, $t_{ж}^{сл}$, $t_{ж}^{ввх}$, $t_{ж}^{вх}$, $t_{п}$, $t_{эл}^п$, $t_{диф}$ – температуры стенки, жидкости в баке, жидкости слива, жидкости на выходе и входе, пара, электрической изоляции, дифференциальной температуры, °С;

$m_{ж}^6$, m_1 , m_2 , $m_{сл}$, m_k , $m_{ц.в.}$, $m_{воз}$, $m_{п}$ – расходы жидкости в баке, на входе в верхнюю и нижнюю магистрали, конденсата, циркуляционной воды, воздуха, пара, кг/с;

h , L – высота и длина поверхности нагрева, м;

$\lambda_{ж}$, $\lambda_{эф}$ – коэффициенты теплопроводности жидкости и эффективности, Вт/мК;

V – скорость, м/с;

y , z – координаты по направлению движения жидкости и пара (z), м;

ρ – плотность кг/м³;

ε – пористость;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

β – угол наклона системы охлаждения к вертикали, град;

σ – коэффициент поверхности натяжения, Н/м;

$R [y]$ – радиус (мениска?) жидкости, м;

$\nu_{ж}$ – коэффициент кинетической вязкости жидкости, м²/с;

K – коэффициент проницаемости, м²;

K_y – условный коэффициент проницаемости, м²;

$K_{т.т.}$ – коэффициент проницаемости фитилей тепловых труб (т.т.), м²;

$F_{ф}$ – сечение пористой структуры (фитиля), м²;

$G_{ж} [y]$ – удельный расход жидкости, кг/м²с;

$q_{кр}$ – критический тепловой поток, Вт/м²;

r – теплота парообразования, Дж/кг;

$\phi'_{кр}$ – критическое расходное влагосодержание;

b_r , $\delta_{ф}$ – гидравлический размер пор и толщина фитиля, м;

P – давления, Па;

$\Delta P_{г+к}$ – суммарный действующий напор (массовый и капиллярный), Па;

$\Delta T_{кр}$ – критический температурный напор, К;

$\bar{D}_{о.кр}$ – размер парового конгломерата, отвечающий условию $\Delta T - \Delta T_{кр}$, м;

f – частота генерации паровых пузырей, с⁻¹;

C – теплоемкость, Дж/кгК;

$R_{с.п.}$ – радиус «сухого» пятна, м;

τ – время, с;

T_n – температура насыщения, К;

$\Delta T = T_{ст} - T_n$ – температурный напор, К (°С);

$U_{кр}$ – критическая скорость пара, м/с;

$\lambda_{кр}$ – критическая длина волны между паровыми столбиками, м;

\bar{n} – средняя плотность центров парообразования, м⁻²;

F , F_n – поверхность нагрева (охлаждения) и поверхность занятая паром, м²;

$m = m_{ж}/m_{п}$ – избыток жидкости;

δ – толщина, м.

А. А. Генбач¹, Д. Ю. Бондарцев²

¹ АЭЖБУ, Казакстан,

² АЭЖБУ, АО «Трест Средазэнергомонтаж», Казакстан

ЖЫЛДЫҚ ЕСЕПТІЛІКТІ ДАҒДАРЫСТАНДЫҚТЫҢ КЕЗ КЕЛГЕН ТЕҢІЗДІК ЖҮЙЕСІНІҢ ЗЕРТТЕУ ЖҮЙЕСІ

Аннотация. Терілген пористы құрылымдардағы судын әсерінен термоөңдеу. Электр қондырғыларының энергетикалық қондырғыларына деген тәуелділігі. Эксперименттер электрлік стендте және горелке ракеталық типтегі болды, ол камералармен шаншылып, әртүрлі капиллярлық-пористым құрылымдармен жабдықталған. Капиллярлық-пористік жүйе салқындатудың интегралдық (орташа) жылу сипаттамаларын анықтауға арналған экспериментальдық қондырғыларды әзірледі: функционирования және әдістерін өлшеу сызбасы, түтікшелі артериялардың элементтері, перфорированной пластиналар және микроартериялар. Капиллярлық-пористы құрылымды стенкиге дейінгі аралықты зерттеді.

Түйін сөздер: жылу тасымалдау дағдарысы, капиллярлық-кеуекті құрылым, жылуэнергетикалық қондырғылар, будың көпіршігі, капиллярлық күштер, жаппай күштер, жылуды басқару, өткізгіштігі.

Сведения об авторах:

Генбач А.А. – доктор технических наук, профессор АУЭС,

Бондарцев Д.Ю. – докторант АУЭС, ведущий инженер, АО «Трест Средазэнергомонтаж», d.bondartsev@saem.kz