

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 2 (2023)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/ABAC7746>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/LWXO2607>***А. А. Генбач¹, Д. Ю. Бондарцев², Н. А. Генбач³**

Алматинский университет энергетики и связи имени Г. Даукеева,

Республика Казахстан, г. Алматы

e-mail: a.genbach@aues.kz

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ

Разработаны стенды и установки и исследованы процессы кипения жидкости в капиллярно-пористых структурах оптическими методами: голографической интерферометрией, скоростной киносъёмкой и фотографированием. Схемы стендов составлены на основе разработок по применению оптической голографии для исследования динамических объектов и быстропотекающих процессов. Даны условия опытов и методика обработки внутренних характеристик кипения. Приводятся результаты обработки опытных данных в виде интерферограммы в зависимости от вида структуры, тепловой нагрузки, избытка жидкости, времени «жизни», плотности центров парообразования. Наблюдение проводится при следующих удельных тепловых потоках: 4×10^4 Вт/м²; 6.7×10^4 Вт/м²; 9.4×10^4 Вт/м² и 12×10^4 Вт/м². Для структуры вида 0.14×0.4 изучается подвод жидкости против действия гравитационных сил. Для определения отрывного диаметра пузыря производится покадровая обработка пленок. В качестве исходного параметра для набора частоты кадров и диафрагмы кино- и фото-съёмочной аппаратуры служит средняя продолжительность «жизни» парового пузыря, которая в зависимости от величины q предполагается равной $1/50 \dots 1/4000$ секунды. В качестве источника когерентного излучения используется гелиево-неоновый лазер. С целью исключения сложной юстировки системы пластинка обрабатывается (проявляется) на месте экспонирования.

Ключевые слова: экспериментальные установки, капиллярно-пористые структуры, фотокамера, лазер, энергооборудование.

Введение

Для исследования процессов тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых структурах применяется визуализация с использованием голографической интерферометрии, фотоупругости, фото- и кинографирования [1–3].

Методы визуализации помогают понять механизм процесса кипения и управлять интенсивностью и форсировкой теплообмена в поле комбинированного действия капиллярных и массовых сил [4–6].

Обобщение экспериментальных данных позволяет получить критериальные уравнения теплообмена для развитого и кризисного процесса кипения жидкостей.

Материалы и методы

Для визуализации процессов тепломассопереноса в пористой системе охлаждения методом фотографирования, скоростной киносъёмки и голографической интерферометрии теплообменная система (рис. 1) выполняется из алундовой трубы с наружным диаметром 21×10^{-3} м.

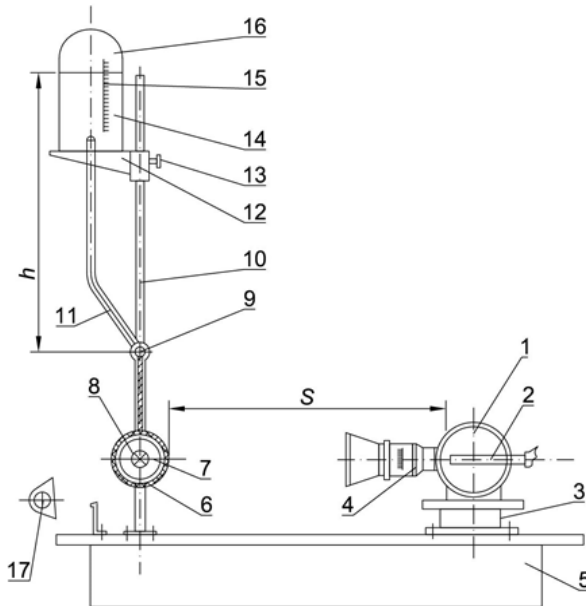


Рисунок 1 – Схема стэнда для киносъёмки СКС-1М:

- 1 – камера; 2 – визир; 3 – штатив; 4 – объектив; 5 – плита; 6 – пористая структура; 7 – алундовая трубка; 8 – лампа КГ-220-1000-3; 9 – артерия; 10 – штатив; 11 – трубка; 12 – кронштейн; 13 – стопорный винт; 14 – вода; 15 – шкала; 16 – бак; 17 – прожектор

Применительно к энергоустановкам [2, 3] используются одно, двух – и трехслойные сетки с ячейками: 0,4, 0,14x0,4, 0,08x0,14x0,4. Тепловым источником служит галоидная кварцевая лампа типа КГ 220-1000-3, расположенная внутри трубы. Основные параметры лампы: напряжение – 220 В; мощность – 1000 Вт; световой поток – 26000 лм; светоотдача – 26 лм/Вт; полная длина – 180×10^{-3} м.

Свет от лампы просвечивает стенку алундовой трубы. Яркость свечения стенки достаточная для фотографирования и скоростной киносъемки на пленке чувствительностью 350...700 единиц ГОСТа. Тепловая нагрузка регулируется напряжением, подаваемым на электроды лампы через ЛАТР-9А, и замеряется ваттметром типа Д539 кл. 0.5.

Наблюдение проводится при следующих удельных тепловых потоках: 4×10^4 Вт/м²; 6.7×10^4 Вт/м²; 9.4×10^4 Вт/м² и 12×10^4 Вт/м², а также для промежуточных значений q . Исследуются критические нагрузки, фотографируются динамические режимы работы системы в экстремальных условиях, когда прекращается доступ жидкости до полного пересыхания структуры, а затем жидкость вновь подается в артерию. Для структуры вида 0,14x0,4 изучается подвод жидкости против действия гравитационных сил [4–6].

Съемка осуществляется после наступления стабильного теплового режима, что обычно занимает 5...7 минут. Расход охлаждающей жидкости принимается оптимальным. В некоторых случаях расход воды регулируется так, чтобы капли не было [7].

Визуальные наблюдения процессов тепломассопереноса производятся методом скоростной киносъемки камерой СКС-1М. Фото и киносъемка также осуществляются с помощью фотоаппаратов «Зенит», «РФК-5М» и киноаппаратов «Красногорск» и «Киев-16с».

В качестве объективов используются: И-61Л (фокусное расстояние $f = 50 \times 10^{-3}$ м; светосила $d = 1:28$, 10-11 ($f = 135$, $d = 1:4$), Вега-7 ($f = 50$, $d = 1:2$) и РО ($f = 50$, $d = 1:2$).

Для съемки применяется кино – и фотопленка типа А-2 шириной 16×10^{-3} м и номинальной чувствительностью 180...350 единиц ГОСТа. Время экспонирования составляет от 1/100 до 1/1000 секунды, диафрагма – от 2.8 до 16. В отдельных случаях устанавливается нейтральный 4-кратный фильтр, что позволяет при небольших скоростях киносъемки и срабатывания затвора фотоаппарата вести съемку с максимально открытой диафрагмой.

В качестве исходного параметра для набора частоты кадров и диафрагмы кино- и фото-съемочной аппаратуры служит средняя продолжительность «жизни» парового пузыря, которая в зависимости от величины q предполагается равной 1/50...1/4000 секунды. Фотографирование производится с расстояния

0.4...0.7 м. Число действующих центров парообразования, отнесенное к единице поверхности нагрева, определяется по формуле:

$$\bar{n} = \left[\frac{\bar{M}}{F} \right] \times \frac{[\bar{\tau}_p + \bar{\tau}_o]}{\bar{\tau}_p},$$

где \bar{M} – среднее число пузырей, одновременно «сидящих» на поверхности;

$\bar{\tau}_p$ – среднее время роста пузыря;

$\bar{\tau}_p$ – средний интервал времени между отрывом и появлением следующего пузыря [5].

Оценка надежности величины \bar{M} под которой понимается математическое ожидание, производится с помощью доверительного интервала. Вероятность нахождения внутри интервала принимается равной 0.95. Величины доверительного интервала для \bar{M} не превышают $\pm 20\%$ от абсолютного значения \bar{M} .

Для определения отрывного диаметра пузыря производится покадровая обработка пленок. Записываются размеры всех лопнувших пузырей и вычисляются среднее значения. Доверительный интервал при надежности 0.95 не превышает $\pm 20\%$.

Частота отрыва вычисляется по формуле:

$$\bar{f} = \bar{\tau}^{-1} = \frac{K}{\Delta\tau\bar{n}F},$$

где K – общее число пузырей, отрывающихся от поверхности за время $\Delta\tau$.

Определение скорости роста пузыря на поверхности нагрева осуществляется на экране «Микрофота», где измеряется диаметр отдельных пузырей через определенный интервал времени. За начало отсчета принимается момент времени, предшествующий появлению кадра с видимым паровым зародышем.

Для исследования процессов парообразования в пористых структурах методом голографической интерферометрии интерферометр собирается по двухлучевой схеме с плоским волновым фронтом в опорном пучке (рис. 2).

В качестве источника когерентного излучения используется гелиево-неоновый лазер 1 типа ЛГ-38 (мощность излучения 60×10^{-3} Вт, длина волны 0.6328×10^{-6} м). Светоделительный кубик 2 делит лазерный луч на опорный и сигнальный пучки. Опорный пучок разворачивается зеркалом 5 и, сформированный коллиматором 6, направляется в плоскость голограммы 10. Сигнальный пучок расширяется объективом 7 и с помощью зеркала 8 направляется на диффузный экран 9. От случайных лучей опорный пучок

защищен диафрагмой 4. Ступенчатый нейтральный светофильтр 3 позволяет выбирать необходимое соотношение интенсивностей опорного и сигнального пучков на стадиях регистрации и восстановления голограммы. Используется голографические пластинки ВЛ-Л.

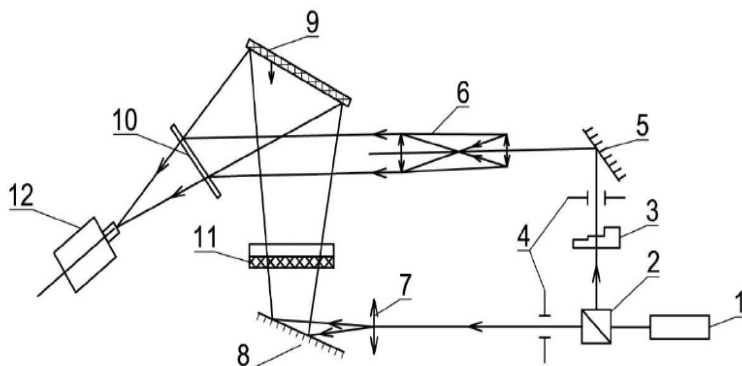


Рисунок 2 – Оптическая схема голографического интерферометра «на просвет»:

- 1 – лазер ЛГ-38; 2 – светоделительный кубик;
- 3 – ступенчатый нейтральный светофильтр; 4 – диафрагма;
- 5 – зеркало; 6 – коллиматор; 7 – объектив; 8 – зеркало;
- 9 – диффузный экран; 10 – плоскость голограммы;
- 11 – охлаждающий элемент; 12 – РФК-5М

Перед опытом получают голограмму исходного состояния объекта (диффузного экрана без системы охлаждения). Время экспонирования голограммы – 8 с. С целью исключения сложной юстировки системы пластинка обрабатывается (проявляется) на месте экспонирования. Затем в сигнальный пучок вводится охлаждаемый элемент 11. Регистрация интерферограмм при различных тепловых режимах производится фотокамерой 12 типа «РФК-5М», оснащенной объективом с фокусным расстоянием 210×10^{-3} м и относительным отверстием 1:4.5, на пленку КН-3. Фокусировка камеры осуществляется на мнимое изображение диффузного экрана, восстановленного голограммой. Скорость съемки – 5 кадров в секунду, время экспонирования – 1/50 с. При съемке кинокамерой «Красногорск» частота съемки составляет 8 кадров в секунду. Величина экспозиции при регистрации фотоаппаратом «Зенит» – 1/50...1/30 с.

При обработке голографических фотоматериалов учитывается, что фотопластинки, выпускаемые промышленностью, сенсублизированы к длине волны 0.6328×10^{-6} м. Используется также фотопленка типа Микрат-900 и ФПГ-В2. В связи с низкой чувствительностью фотоматериалов время экспонирования голограмм составляет до десятков секунд. Продолжительность проявления при температуре 20°C принимается от 2 до 10 минут в зависимости от условий экспонирования. Далее следует промывка в проточной воде и фиксирование в обычном или кислом фиксаже в течение нескольких минут с последующей окончательной промывкой.

Описанная схема составлена на основе разработок по применению оптической голографии для исследования динамических объектов и быстропротекающих процессов. Сборка механических элементов лазерных установок, юстировка оптического квантового генератора и оптического квантового усилителя, а затем оптической голографической схемы производится в соответствии с [1].

Результаты и обсуждение

На рис. 3 качестве примера приводится явление выброса капель жидкости из капиллярно-пористой структуры вида 0.14×0.4 для тепловой нагрузки $q = 94 \text{ кВт/м}^2$; избытка жидкости по отношению к расходу пара $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = 1.1$.



Рисунок 3 – Явление выброса капель жидкости из паровой структуры вида 0.14×0.4 ; $q = 94 \times 10^3 \text{ Вт/м}^2$; $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = 1.1$.

Выводы

Таким образом, разработаны установки для оптических методов исследования и показаны результаты обработки опытных данных в виде выброса капель жидкости, динамики развития паровой и жидкостной фаз для

различных условий теплообмена (вид структуры, q , $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}}$, τ , $\bar{\tau}_{\text{жид}}$, \bar{n}).
Дана методика обработки опытных данных.

Список использованных источников

1 **Chang, Y. H.** Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works. Applied Thermal Engineering. – Volume 154. – 25 May 2019. – P. 284–293. – <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.092> [статья на англ. яз.]

2 **Chuang, T. J.** Investigating effects of heating orientations on nucleate boiling heat transfer, bubble dynamics, and wall heat flux partition boiling model for pool boiling. Applied Thermal Engineering. – Volume 163. – 25 December 2019. – 114358. – <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114358> [статья на англ. яз.]

3 **Kimihide Odagiri, Hosei, Nagano.** Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe // International Journal of Thermal Sciences. – Volume 140. – June 2019. – P. 530–538. – <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.008> [статья на англ. яз.]

4 **Jian, Li.** Pore scale simulation of evaporation in a porous wick of a loop heat pipe flat evaporator using Lattice Boltzmann method. International Communications in Heat and Mass Transfer. – Volume 102, March 2019. – P. 22–33. – <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.01.008> [статья на англ. яз.]

5 **Alekseik, O. S., Kravets V. Yu.** Physycal model of boiling process on porous surface in limited space // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2013. – 4, 8 (64). – С. 26–31. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.16448> [статья на англ. яз.]

6 **Xing Yang, et al.** Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. – Vol. 140. – September 2019. – P. 25–40. – <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109> [статья на англ. яз.]

7 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloev, H. I., Genbach, N. A.** Boiling crisis in porous structures // Energy. – 2022. – 259. – 125076. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076> [статья на англ. яз.]

8 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Iliev, I. K., Georgiev, A. G.** Scientific method of creation of ecologically clean capillary-porous systems of cooling of power equipment elements of power plants on the example of gas turbines // Energy. – 2020. – 199. – 117458. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117458> [статья на англ. яз.]

9 **Genbach, A. A., Bondartsev, D. Yu., Beloev, H. I.** Comparison of Cooling Systems in Power Plant Units // Energies. – 2021. – 14. – 63–65. – <https://doi.org/10.3390/en14196365> [статья на англ. яз.]

10 Polyayev, 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. – 1991. – Dubrovnik, Yugoslavia, 23–28 June. – P. 639–644. [статья на англ. яз.]

Материал поступил в редакцию 20.06.23.

*А. А. Генбач¹, Д. Ю. Бондарцев², Н. А. Генбач

Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

Материал 20.06.23 баспаға түсті.

ЭНЕРГИЯ ЖАБДЫҒЫНЫҢ ТҮТІК-КЕУЕКТІ ҚҰРЫЛЫМДАРЫНДА ЖЫЛУ АЛМАСУЫН КӨРСЕТУ

Текшелер мен қондырғылар әзірленіп, түтік-кеуекті құрылымдарда оптикалық әдіспен сұйықтықтың қайнау үдерісі зерттелді: голографиялық интерферометриямен, жыздам кино түсірумен және фототүсірумен. Текшелердің сұлбасы динамикалық нысандар мен жыздам ағып өтетін үдерістерді зерттеу үшін оптикалық голографияны пайдалану бойынша әзірлеме негізінде жасалды. Тәжірибе шарттары және қайнаудың ішкі сипаттамаларын оңдеу әдістемелері берілді. Құрылым түріне, жылу жүктемесіне, сұйықтық артықтығына, «өмір сүру» уақытына, буга айналу орталығының тығыздығына байланысты интерферограмма түрінде тәжірибелі деректерді оңдеу нәтижелері келтіріледі. Қадағалау келесі меншікті жылу ағындарында жүргізіледі: $4 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$; $6.7 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$; $9.4 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$ және $12 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2$. 0.14×0.4 түріндегі құрылым үшін гравитациялық күш әрекетіне қарсы сұйықтықты келтіру игерілуде. Көпіршіктің үзбелі диаметрін анықтау үшін қабықшаны кадрлап оңдеу жүргізіледі. Кадрлардың жиілігін және кино және фототүсіру аппаратурасының диафрагмасын жинау үшін бастапқы параметр ретінде бу көпіршігі «өмірінің» орташа ұзақтығы қызмет атқарады, ол q шамасына байланысты $1/50 \dots 1/4000$ секундқа тең. Когерентті сәулелену көзі ретінде гелий-неондық лазер пайдаланылады. Жүйенің күрделі туралануын болдырмау үшін табақша экспонирлеу орнында оңделеді (пайда болады).

Кілтті сөздер: эксперименттік қондырғылар, көрсету, фотокамера, лазер, энергия жабдығы.

*A. A. Genbach¹, D. Yu. Bondartsev², N. A. Genbach³

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Material received on 20.06.23.

VISUALIZATION OF HEAT EXCHANGE IN CAPILLARY POROUS STRUCTURES OF POWER EQUIPMENT

Stands and facilities were developed and processes of liquid boiling in capillary porous structures were studied by optical methods: holographic interferometry, high-speed shooting and photographing. The stand schemes are based on the developments of the optical holography application for the study of dynamic objects and high-speed processes. The conditions of the experiments and the methodology of processing the internal characteristics of boiling are given. The results of processing the experimental data in the form of an interferogram depending on the type of structure, heat load, liquid excess, life time and the density of evaporation sites are given. The observation is carried out at the following specific heat fluxes: 4×10^4 W/m²; 6.7×10^4 W/m²; 9.4×10^4 W/m² and 12×10^4 W/m². For the structure of 0.14x0.4 form, the fluid supply is studied against the action of gravitational forces. To determine the diameter of a bubble at departure, a framing films processing is performed. As an initial parameter for setting the frame rate and the diaphragm of the film and photo instrument, the average life time of the vapor bubble is used, which is assumed to be 1/50...1/4000 second depending on the value of q. A helium-neon laser is used as a source of coherent radiation. In order to avoid complicated system calibration, the plate is processed (visualized) at the exposure site.

Keywords: experimental facilities, visualization, picture camera, laser, power equipment.

Теруге 20.06.2023 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2023 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

17,5 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,67. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4103

Сдано в набор 20.06 2023 г. Подписано в печать 30.06 2023 г.

Электронное издание

17,5 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,67. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 4103

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz