

ISSN 2518-1467 (Online),  
ISSN 1991-3494 (Print)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ  
ҰЛТТЫҚ ҒЫЛЫМ АКАДЕМИЯСЫНЫҢ

# Х А Б А Р Ш Ы С Ы

---

---

## ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

## THE BULLETIN

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES  
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

1944 ЖЫЛДАН ШЫҒА БАСТАҒАН  
ИЗДАЕТСЯ С 1944 ГОДА  
PUBLISHED SINCE 1944

1

---

АЛМАТЫ  
АЛМАТЫ  
ALMATY

2018

JANUARY  
ЯНВАРЬ  
ҚАҢТАР

---

---

*NAS RK is pleased to announce that Bulletin of NAS RK scientific journal has been accepted for indexing in the Emerging Sources Citation Index, a new edition of Web of Science. Content in this index is under consideration by Clarivate Analytics to be accepted in the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index, and the Arts & Humanities Citation Index. The quality and depth of content Web of Science offers to researchers, authors, publishers, and institutions sets it apart from other research databases. The inclusion of Bulletin of NAS RK in the Emerging Sources Citation Index demonstrates our dedication to providing the most relevant and influential multidiscipline content to our community.*

*Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясы "ҚР ҰҒА Хабаршысы" ғылыми журналының Web of Science-тің жаңаланған нұсқасы Emerging Sources Citation Index-те индекстелуге қабылданғанын хабарлайды. Бұл индекстелу барысында Clarivate Analytics компаниясы журналды одан әрі the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index және the Arts & Humanities Citation Index-ке қабылдау мәселесін қарастыруда. Web of Science зерттеушілер, авторлар, баспашылар мен мекемелерге контент тереңдігі мен сапасын ұсынады. ҚР ҰҒА Хабаршысының Emerging Sources Citation Index-ке енуі біздің қоғамдастық үшін ең өзекті және беделді мультидисциплинарлы контентке адалдығымызды білдіреді.*

*НАН РК сообщает, что научный журнал «Вестник НАН РК» был принят для индексирования в Emerging Sources Citation Index, обновленной версии Web of Science. Содержание в этом индексировании находится в стадии рассмотрения компанией Clarivate Analytics для дальнейшего принятия журнала в the Science Citation Index Expanded, the Social Sciences Citation Index и the Arts & Humanities Citation Index. Web of Science предлагает качество и глубину контента для исследователей, авторов, издателей и учреждений. Включение Вестника НАН РК в Emerging Sources Citation Index демонстрирует нашу приверженность к наиболее актуальному и влиятельному мультидисциплинарному контенту для нашего сообщества.*

Б а с р е д а к т о р ы

х. ғ. д., проф., ҚР ҰҒА академигі

**М. Ж. Жұрынов**

Р е д а к ц и я а л қ а с ы:

**Абиев Р.Ш.** проф. (Ресей)  
**Абишев М.Е.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Аврамов К.В.** проф. (Украина)  
**Аппель Юрген** проф. (Германия)  
**Баймуқанов Д.А.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Байпақов К.М.** проф., академик (Қазақстан)  
**Байтулин И.О.** проф., академик (Қазақстан)  
**Банас Иозеф** проф. (Польша)  
**Берсимбаев Р.И.** проф., академик (Қазақстан)  
**Велихов Е.П.** проф., РҒА академигі (Ресей)  
**Гашимзаде Ф.** проф., академик (Әзірбайжан)  
**Гончарук В.В.** проф., академик (Украина)  
**Давлетов А.Е.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Джрбашян Р.Т.** проф., академик (Армения)  
**Қалимолдаев М.Н.** проф., академик (Қазақстан), бас ред. орынбасары  
**Лаверов Н.П.** проф., академик РАН (Россия)  
**Лупашку Ф.** проф., корр.-мүшесі (Молдова)  
**Мохд Хасан Селамат** проф. (Малайзия)  
**Мырхалықов Ж.У.** проф., академик (Қазақстан)  
**Новак Изабелла** проф. (Польша)  
**Огарь Н.П.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Полещук О.Х.** проф. (Ресей)  
**Поняев А.И.** проф. (Ресей)  
**Сагиян А.С.** проф., академик (Армения)  
**Сатубалдин С.С.** проф., академик (Қазақстан)  
**Таткеева Г.Г.** проф., корр.-мүшесі (Қазақстан)  
**Умбетаев И.** проф., академик (Қазақстан)  
**Хрипунов Г.С.** проф. (Украина)  
**Юлдашбаев Ю.А.** проф., РҒА корр.-мүшесі (Ресей)  
**Якубова М.М.** проф., академик (Тәжікстан)

«Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының Хабаршысы».

**ISSN 2518-1467 (Online),**

**ISSN 1991-3494 (Print)**

Меншіктенуші: «Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы»РҚБ (Алматы қ.)

Қазақстан республикасының Мәдениет пен ақпарат министрлігінің Ақпарат және мұрағат комитетінде  
01.06.2006 ж. берілген №5551-Ж мерзімдік басылым тіркеуіне қойылу туралы куәлік

Мерзімділігі: жылына 6 рет.

Тиражы: 2000 дана.

Редакцияның мекенжайы: 050010, Алматы қ., Шевченко көш., 28, 219 бөл., 220, тел.: 272-13-19, 272-13-18,  
www: nauka-nanrk.kz, bulletin-science.kz

---

© Қазақстан Республикасының Ұлттық ғылым академиясы, 2018

Типографияның мекенжайы: «Аруна» ЖК, Алматы қ., Муратбаева көш., 75.

Г л а в н ы й р е д а к т о р  
д. х. н., проф. академик НАН РК  
**М. Ж. Журинов**

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:

**Абиев Р.Ш.** проф. (Россия)  
**Абишев М.Е.** проф., член-корр. (Казахстан)  
**Аврамов К.В.** проф. (Украина)  
**Апель Юрген** проф. (Германия)  
**Баймуканов Д.А.** проф., чл.-корр. (Казахстан)  
**Байпаков К.М.** проф., академик (Казахстан)  
**Байтулин И.О.** проф., академик (Казахстан)  
**Банас Иозеф** проф. (Польша)  
**Берсимбаев Р.И.** проф., академик (Казахстан)  
**Велихов Е.П.** проф., академик РАН (Россия)  
**Гашимзаде Ф.** проф., академик (Азербайджан)  
**Гончарук В.В.** проф., академик (Украина)  
**Давлетов А.Е.** проф., чл.-корр. (Казахстан)  
**Джрбашян Р.Т.** проф., академик (Армения)  
**Калимолдаев М.Н.** академик (Казахстан), зам. гл. ред.  
**Лаверов Н.П.** проф., академик РАН (Россия)  
**Лупашку Ф.** проф., чл.-корр. (Молдова)  
**Моход Хасан Селамат** проф. (Малайзия)  
**Мырхалыков Ж.У.** проф., академик (Казахстан)  
**Новак Изабелла** проф. (Польша)  
**Огарь Н.П.** проф., чл.-корр. (Казахстан)  
**Полещук О.Х.** проф. (Россия)  
**Поняев А.И.** проф. (Россия)  
**Сагьян А.С.** проф., академик (Армения)  
**Сатубалдин С.С.** проф., академик (Казахстан)  
**Таткеева Г.Г.** проф., чл.-корр. (Казахстан)  
**Умбетаев И.** проф., академик (Казахстан)  
**Хрипунов Г.С.** проф. (Украина)  
**Юлдашбаев Ю.А.** проф., член-корр. РАН (Россия)  
**Якубова М.М.** проф., академик (Таджикистан)

**«Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан».**

**ISSN 2518-1467 (Online),**

**ISSN 1991-3494 (Print)**

Собственник: РОО «Национальная академия наук Республики Казахстан» (г. Алматы)

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Комитете информации и архивов Министерства культуры и информации Республики Казахстан №5551-Ж, выданное 01.06.2006 г.

Периодичность: 6 раз в год

Тираж: 2000 экземпляров

Адрес редакции: 050010, г. Алматы, ул. Шевченко, 28, ком. 219, 220, тел. 272-13-19, 272-13-18.

www: nauka-nanrk.kz, bulletin-science.kz

---

© Национальная академия наук Республики Казахстан, 2018

Адрес типографии: ИП «Аруна», г. Алматы, ул. Муратбаева, 75

E d i t o r i n c h i e f

doctor of chemistry, professor, academician of NAS RK

**M. Zh. Zhurinov**

E d i t o r i a l b o a r d:

**Abiyev R.Sh.** prof. (Russia)  
**Abishev M.Ye.** prof., corr. member. (Kazakhstan)  
**Avramov K.V.** prof. (Ukraine)  
**Appel Jurgen,** prof. (Germany)  
**Baimukanov D.A.** prof., corr. member. (Kazakhstan)  
**Baipakov K.M.** prof., academician (Kazakhstan)  
**Baitullin I.O.** prof., academician (Kazakhstan)  
**Joseph Banas,** prof. (Poland)  
**Bersimbayev R.I.** prof., academician (Kazakhstan)  
**Velikhov Ye.P.** prof., academician of RAS (Russia)  
**Gashimzade F.** prof., academician ( Azerbaijan)  
**Goncharuk V.V.** prof., academician (Ukraine)  
**Davletov A.Ye.** prof., corr. member. (Kazakhstan)  
**Dzhrbashian R.T.** prof., academician (Armenia)  
**Kalimoldayev M.N.** prof., academician (Kazakhstan), deputy editor in chief  
**Laverov N.P.** prof., academician of RAS (Russia)  
**Lupashku F.** prof., corr. member. (Moldova)  
**Mohd Hassan Selamat,** prof. (Malaysia)  
**Myrkhalykov Zh.U.** prof., academician (Kazakhstan)  
**Nowak Isabella,** prof. (Poland)  
**Ogar N.P.** prof., corr. member. (Kazakhstan)  
**Poleshchuk O.Kh.** prof. (Russia)  
**Ponyaev A.I.** prof. (Russia)  
**Sagiyani A.S.** prof., academician (Armenia)  
**Satubaldin S.S.** prof., academician (Kazakhstan)  
**Tatkeyeva G.G.** prof., corr. member. (Kazakhstan)  
**Umbetayev I.** prof., academician (Kazakhstan)  
**Khripunov G.S.** prof. (Ukraine)  
**Yuldashbayev Y.A.,** prof. corresponding member of RAS (Russia)  
**Yakubova M.M.** prof., academician (Tadjikistan)

**Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.**

**ISSN 2518-1467 (Online),**

**ISSN 1991-3494 (Print)**

Owner: RPA "National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan" (Almaty)

The certificate of registration of a periodic printed publication in the Committee of Information and Archives of the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan N 5551-Ж, issued 01.06.2006

Periodicity: 6 times a year

Circulation: 2000 copies

Editorial address: 28, Shevchenko str., of. 219, 220, Almaty, 050010, tel. 272-13-19, 272-13-18,  
<http://nauka-nanrk.kz/>, <http://bulletin-science.kz>

---

© National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, 2018

Address of printing house: ST "Aruna", 75, Muratbayev str, Almaty

A. A. Genbatch<sup>1</sup>, D. Yu. Bondartsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (AUPET), Kazakhstan,

<sup>2</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (AUPET), JS «TrestSredazenergomontazh».  
E-mail: d.bondartsev@saem.kz

## INVESTIGATION OF THE HEAT EXCHANGE CRISIS IN POROUS STRUCTURES FOR HIGH PRESSURES

**Abstract.** The crisis of heat exchange in the boiling of water in porous structures is studied. The study relates to heat power plants of power stations. The experiments were carried out on a rocket type burner. The combustion chambers and supersonic nozzles were cooled with various porous structures. The mechanism of the heat exchange processes is described and optimal cell sizes of the porous structures are determined, and the design equation of the critical heat flux for high pressures is obtained.

**Keywords:** crisis of boiling, capillary-porous structures, cooling systems, the mechanism of heat exchange crisis.

УДК 536.248.2

A. A. Генбач<sup>1</sup>, Д. Ю. Бондарцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Доктор технических наук, профессор АУЭС,

<sup>2</sup>Докторант АУЭС, ведущий инженер, АО «Трест Средазэнергомонтаж»

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА В ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ ДЛЯ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ

**Аннотация.** Исследован кризис теплообмена при кипении воды в пористых структурах. Изучение относится к тепловым энергетическим установкам электростанций. Эксперименты проводились на горелке ракетного типа. Охлаждались камеры сгорания и сверхзвуковые сопла различными пористыми структурами. Описан механизм процессов теплообмена и определены оптимальные размеры ячеек пористых структур, получено расчетное уравнение критического теплового потока для высоких давлений.

**Ключевые слова:** кризис кипения, капиллярно-пористые структуры, системы охлаждения, механизм кризиса теплообмена.

**Введение.** Главной задачей в силовых энергетических установках электростанций является создание системы охлаждения высокотемпературных деталей и узлов. К ним можно отнести топочные экраны высокофорсированных котельных агрегатов, камеры сгорания, сопла и лопатки газотурбинных агрегатов [8].

В системах охлаждения протекают процессы пузырьчатого кипения жидкости (воды). При высоких тепловых нагрузках не исключается наступление кризисной ситуации с возможным перегревом теплообменной стенки. Для исследования кризиса кипения нами собиралась экспериментальная установка, схема которой и условия проведения экспериментов представлены в работах [6, 7].

**Методы.** Расчет величины  $q_{кр}$  применительно к исследованной пористой системе может выводиться в зависимости от недогрева и скорости потока по уравнениям работы [2], из которых следует, что недогрев жидкости позволяет несколько расширить теплопередающие возможности в пористой системе охлаждения. Поскольку процессы теплопередачи протекают в тонких пористых структурах, то даже незначительный избыток свободно стекающей пленки по внешней стороне структуры, определяемый параметром  $\tilde{m}$ , при данном гидростатическом давлении  $\Delta P_d$  и условном

коэффициенте проницаемости  $K_y$ , создает ядро жидкости, из которого непрерывно будет подсаиваться недогретый охладитель за счет разности температур и капиллярных сил.

К тому же гравитационный потенциал способствует разрушению паровых конгломератов в пористой структуре, облегчая транспорт недогретой жидкости. Тепловой поток будет расходоваться дополнительно на подогрев подтекающих относительно холодных порций жидкости.

Избыток жидкости в пористой системе создает направленное движение потоку, что приводит к деформации паровых пузырей в структуре, уменьшению их диаметра, росту частоты образования пузырей [3]. При увеличении скорости потока возрастает энергия, затрачиваемая на вытеснение жидкости из пристенного пограничного слоя, а следовательно, увеличивается скорость генерации пара  $V_{кр}$  и величина  $q_{кр}$ . Однако при некотором значении скорости потока жидкости, определяемой параметром  $\tilde{m}_{кр}$ , энергии, затрачиваемой на выдавливание жидкости из двухфазного пристенного слоя, будет недостаточно, и возникает кризис теплопередачи. Конечно, увеличение  $q_{кр,v}$  будет достигнуто при больших расходах жидкости, что приведет к росту затрат энергии на привод нагнетательных машин.

По достижению определенной величины расходного влагосодержания  $\bar{\varphi}_{кр}^1$  скорость потока не будет способствовать увеличению величины  $q_{кр}$ , а в некоторых случаях может привести даже к снижению величины  $q_{кр}$ , поскольку затрудняется эвакуация пара из пристенной зоны. Увеличение скорости жидкостной пленки, прилегающей к стенке, за счет параметра  $\tilde{m}$ , начнет уступать доминирующему влиянию падения влагосодержания  $\bar{\varphi}^1$  в той же зоне, которое в большей степени скажется на величину  $q_{кр}$ , даже уменьшая ее. Поэтому требуется в каждом отдельном случае устанавливать оптимальное соотношение избытка жидкости  $\tilde{m}$  в зависимости от вида пористой структуры.

Гидродинамическая модель кризиса кипения жидкости в большом объеме на технической поверхности не отражает влияния теплофизических свойств стенки, хотя оно имеет место, что может быть объяснено колебательным движением границы раздела “пар-жидкость”. Это приводит к волнообразному движению поверхности нагрева. Поэтому в отдельных местах такой поверхности следует ожидать резонансные явления, когда температура стенки будет снижаться за счет большого отбора пара, а это означает, что чем выше теплофизические свойства стенки, тем интенсивнее будет происходить отвод величины  $q$ .

Для пористых систем охлаждения практически для всех режимных и геометрических параметров при пузырьковом кипении воды глубина проникновения температурной волны  $h_{ср} < \delta_{ст}$ , поэтому в расчетные соотношения для  $q_{кр}$  в работах толщина стенки  $\delta_{ст}$  не вводится [3].

Расчетное уравнение для  $q_{кр}$  в случае, когда  $P \geq 0,1$  МПа, а  $b_r > 0,28 \cdot 10^{-3}$  м:

$$q_{кр} = 0,0347r[g(\rho_{жс} - \rho_n)\rho_n \bar{D}_{о.кр}]^{0,5} \left(\frac{b_r}{b_o}\right)^{0,3} \left(\frac{\delta_{ф}}{\delta_o}\right)^{0,5} (1 + \cos\beta)^{0,6} \quad (1)$$

Из уравнения (12) следует, что:

$$q_{кр} \sim \bar{D}_{о.кр}^{0,5} (p \geq 0,1 \text{ МПа}) \text{ и } q_{кр} \sim \bar{f}^{0,5} (p < 0,1 \text{ МПа}).$$

Величина  $\bar{D}_{о.кр}$  и  $\bar{f}$  зависят от теплофизических свойств теплоотдающей поверхности:  $\bar{D}_{о.кр} \sim K_{ст}^{-1}$ ,  $\bar{f}_{кр}^{-1} \sim K_{ст}^2$ , где  $K_{ст} = 1 + [(rc\lambda)_{ж}/(rc\lambda)_{ст}]^{0,5}$ . Тогда для поверхностей, выполненных из меди и нержавеющей стали и покрытых сетчатыми структурами, имеем:  $\tilde{q}_{кр} = 1,07$  ( $p \geq 0,1$  МПа),  $\tilde{q}_{кр} = 1,15$  ( $p < 0,1$  МПа).

Материал стенки оказывает влияние на величину  $q_{кр}$  посредством комплекса  $(rc\lambda)_{ст}$ , где  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  – плотность, теплоемкость и теплопроводность стенки, но однозначно утверждать это вряд ли правомерно, так как практически не возможно выдержать одинаковые условия по чистоте обработки и микроструктуре. При проектировании камеры сгорания и особенно сопла необходимо учитывать некоторый запас на толщину поверхности нагрева. Возникновение кризиса кипения раньше наступит на «тонких» нагревателях, поскольку в предкризисной области кипения начнет возрастать размер «сухого» пятна в основание пузырей, процесс теплообмена резко ухудшится, увеличится температура стенки. Поверхности, имеющие большую толщину, потребуют и больше времени для их разогрева.

Для поверхностей с пористым покрытием этот вопрос особенно актуальный, так как в них время роста пузыря в десятки раз меньше, резко изменяются гидродинамические условия подпитки жидкостью и, следовательно, может увеличиться время пребывания пара у стенки, что исключит контакт жидкости с поверхностью теплообмена, несмотря на большой избыток жидкости  $\tilde{m}$  [3].

**Исследование.** Описанный процесс является предысторией развития кризиса кипения. Дальнейшая «судьба» процесса при прочих равных условиях определяется теплоаккумулирующей способностью нагрева  $(\rho c \lambda)_{ст.}$ . Когда величина комплекса будет подобрана большой, возрастает вероятность затягивания кризиса кипения, растечки теплоты вдоль поверхности нагрева возрастут и вновь создадутся благоприятные условия контакта жидкой фазы со стенкой. Увеличение же только толщины стенки в десять раз всего на несколько процентов повышает величину  $q_{кр.}$ , причем это явление заметнее для высокотеплопроводных материалов и при давлении, больше атмосферного.

Одномерное уравнение нестационарной теплопроводности, описывающее динамику температурного поля в парогенерирующей стенке [3], оказалось полезным для рассмотрения предельного состояния поверхности при кризисе кипения, когда на стенке под паровыми пузырями устанавливается «сухое» пятно критического размера. До этого момента протекал развитый пузырьковый процесс кипения, а в основании паровых пузырей находилось «сухое» пятно с радиусом  $R_{с.п.}$  [6, 7].

Как показали расчеты [5], за время  $\tau \leq 5$  с тепловые потоки достигают значений  $\sim 8 \cdot 10^7$  Вт/м<sup>2</sup> для меди и  $1,3 \cdot 10^8$  Вт/м<sup>2</sup> – для нержавеющей стали. Однако они будут экранированы кривыми плавления через время  $\sim 0,01$  с. Возникают высокие термические напряжения растяжения в результате резкого увеличения градиентов температур в стенке. Изучено влияние различных материалов и толщин стенки на время начала разрушения поверхности в момент кризиса кипения. С помощью методов голографии и фотоупругости определено наиболее опасное место в момент разрушения пористой поверхности. Явления выброса капель жидкости из ячеек пористой структуры ухудшают интенсивность теплообмена при достижении некоторого граничного теплового потока. Подбором вида структуры это явление может быть сведено к минимуму. Наименьший выброс получен для однослойных сеток с ячейками более  $0,28 \cdot 10^{-3}$  м.

Возникающие ухудшенные режимы по своему механизму аналогичны процессам, протекающим при движении пароводяной смеси в трубах, не имеющих пористого покрытия. Этим режимам свойственен кризис сопротивления, когда на обогреваемом участке начинает уменьшаться сопротивление трения. Это связано с тем, что вследствие сильного выброса капель сокращается расход жидкости. В начальной стадии процесса выброса жидкости капли турбулизируют процесс, то при критическом выбросе количество жидкости становится недостаточным для орошения теплообменной стенки.

Интенсивный капельный унос нарушает плавное течение жидкости по внешней поверхности сетки, наблюдается разрыв пленки, что также ухудшает притоки свежих порций относительно холодной жидкости к пристенному двухфазному пограничному слою. Подбор опытным путем пористых структур практически исключил выброс капель при данном тепловом потоке, что связано с балансированием сил трения жидкости в сетках и на поверхности сеток с каплями и паровым потоком в сетках и околосеточном пространстве [7].

В результате нарушения баланса действующих сил количество поступающей жидкости становится недостаточным, на поверхности нагрева появляются «сухие» пятна, температура стенки плавно повышается до некоторого значения и процесс протекает при температурных напорах (60–80) К. Пульсирующий режим снабжения стенки жидкостью не приводит к пережогу поверхности, хотя интенсивность теплопередачи снижается. Однако возникают пульсации температуры стенки и связанные с ними термические разрушающие напряжения, сокращающие срок службы поверхности. Поэтому важно правильно оптимизировать вид пористой структуры и не допускать высоких перегревов стенки относительно температуры жидкости.

Кризисное кипение характеризуется потерей устойчивости пульсирующей жидкостной пленки и запираем паровыми образованиями ячеек структуры. Несмотря на достаточное количество жидкости, наблюдается резкий рост термического сопротивления пограничного слоя, ухудшение эффекта турбулизации за счет затрудненного отвода пара из ячеек пористой структуры. При кризисе кипения, как показали голографическая интерферометрия и скоростная киносъемка [3], переносимый тепловой поток приобретает предельные значения  $q_{кр.}$ , пузыри пара до их отрыва начинают проникать в соседние ячейки структуры, сливаются в конгломераты и образуют очаговые зоны паровых пленок. Содержащиеся пленки жидкости под паровыми конгломератами высыхают и, несмотря на имеющееся большое количество жидкости в пористой структуре и на ее поверхности, охладитель не может проникнуть к стенке.

Наступает предельное значение температурного напора по отношению к температуре насыщения  $T_n$ ,  $\Delta T_{кр} = T_{кр} - T_n$ , где величина  $T_{кр}$  соответствует значению  $q_{кр}$ . При  $\Delta T \geq \Delta T_{кр}$  что более вероятно для пористых структур при  $p < 0,1$  МПа, когда имеют место наименьшие значения критического перегрева стенки, либо для сеток с ячейками менее  $0,14 \cdot 10^{-3}$  м, микрослой жидкости испаряется под паровым пузырем, или его конгломератом, резко возрастает температура стенки в окрестности «сухого» пятна, исключая контакт имеющийся порции жидкости со стенкой. Изучение кипения жидкости без пористой структуры показывает, что в случае приближения теплового потока к величине  $\sim 1 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> резко увеличивается число центров парообразования, пленка жидкости «набухает». Паровые пузыри начинают взаимодействовать друг с другом, разрушаясь при меньших размерах. Основная доля тепла расходуется на испарение жидкости в пузыри. При наступлении критического режима пленка жидкости распадается на сфероидальные капли и не смачивает поверхность нагрева. Температура стенки начинает резко возрастать, вплоть до его прогара. Увеличение расхода жидкости не приводит к положительным результатам. Кризис наступает в тот момент, когда скорость испарения жидкости превышает скорость ее растекания по поверхности. Происходит высыхание пленки на периферии поверхности нагрева и стягивание ее к центру.

Поскольку размеры пор исследованных сеточных структур можно считать одинаковыми, выход пара из них будет равновероятным. Паровые столбики могут генерироваться в значительно больших ячейках, чем, например, в порошковых материалах, и отстоящих друг от друга на меньшем расстоянии, и даже в ячейках, вплотную прилегающих друг к другу. Для воды при кипении в большом объеме под атмосферным давлением критическая длина волны  $\lambda_{кр}$  между паровыми столбиками составляет  $(15-25) \cdot 10^{-3}$  м, то для порошкового пористого покрытия она в  $(5-15)$  раз меньше. Величина  $q_{кр} \sim U_{кр} \sim \lambda_{кр}^{-0,5}$ , то значение  $q_{кр}$  для порошковых материалов оказывалось в два раза выше, однако при температурном напоре  $\Delta T = (600-800)$  К. Для сеточных структур, работающих в поле гравитационных сил, несмотря на еще меньшее значение величины  $\lambda_{кр}$ , величина  $q_{кр}$  была близка к значениям, достигнутым при кипении в большом объеме на технической поверхности, однако при величине  $\Delta T_{кр} = 60$  К [3],  $U_{кр}$  – критическая скорость пара [6].

Следовательно, определяющим фактором кризиса кипения следует считать гидродинамическую обстановку в объеме и на поверхности сеток, которая, в свою очередь, зависит от вида структуры и организации подвода жидкости. За счет незначительного избытка жидкости (слабого недогрева и скорости потока), как показали визуальные наблюдения, стало возможным управлять паровым фронтом в объеме структуры и, прежде всего, разрушать скапливающиеся паровые образования.

Оценка для кризисного состояния доли поверхности, занятой паром, для  $p = 0,1$  МПа,  $\Delta T_{кр} = 60$  К,  $\bar{D}_{о.кр} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ ,  $\bar{m} = 1,1$ ,  $\bar{n} = 5 \cdot 10^6$  м<sup>-2</sup>, дает:

$$\frac{F_n}{F} \approx \frac{\pi \bar{D}_{о.кр}^2 \bar{n} K_{мин}}{4} \approx \frac{2,5\pi}{16},$$

где  $K_{мин}$  – коэффициент, учитывающий наличие «сухого» пятна под паровым пузырем. В момент кризиса величина  $K_{мин} \geq 0,5$ ;  $F_n, F$  – общая теплообменная поверхность, занятая паром.

Число ячеек для структуры  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м, приходящихся на  $1$  м<sup>2</sup>, составляет  $2,78 \cdot 10^6$  шт., т.е. в момент кризиса в каждой ячейки может находиться по два паровых пузыря. При кипении жидкости в большом объеме для горизонтального нагревателя с технической поверхностью в теории гидродинамического кризиса соотношение  $F_n/F = \frac{\pi}{16}$ , т.е. в 2,5 раза меньше. При стремлении величины  $K_{мин} \rightarrow 1$ , отношение  $F_n/F \rightarrow 1$ .

Геометрические размеры, существенно влияющие на перераспределение капиллярного и гравитационного потенциалов, оказывают воздействие на величину  $q_{кр}$  и требует оптимизации. Наибольшее значение  $q_{кр}$  получены для вертикальных поверхностей с крупными размерами ячеек ( $\beta = 0$  град.), где  $\beta$  – угол наклона поверхности к вертикали (см. формулу 1).

**Заключение.** В сетчатых пористых структурах явление кризиса теплоотдачи протекает более плавно, чем на гладкой поверхности, что аналогично вапотронному эффекту, когда на поверхности нагрева преднамеренно создается определенный рельеф с помощью выступов и углублений. В

кризисной ситуации зона пленочного кипения начинает смещаться от основания ребер к их вершинам, увеличивая интенсивность теплоотдачи и величину  $q_{кр}$ . Это позволяет растянуть кризис кипения на неизотермической поверхности. В пористой системе охлаждения наличие пор и капилляров на поверхности теплообмена создает искусственную шероховатость, которая в данном случае будет играть роль ребер. К тому же необходимо учесть стабилизирующее действие капиллярных сил, выравнивающих распределение жидкости по теплообменной поверхности.

Таким образом, существенной зависимости теплопередающей способности исследованной системы от ширины ячейки сетки (в десятки раз), как это имеет место в тепловых трубах, не замечено. Это можно объяснить тем, что при малых размерах ячеек при наличии гравитационных сил, высокое гидравлическое сопротивление не столь ограничивает расход жидкости, который может частично стекать по сетчатой поверхности. В то же время повышенный размер ячеек не приводит к значительному уменьшению транспортной способности.

Однако ширина ячейки сетки в рассматриваемой системе оказывает влияние на динамику развития паровых пузырей и, следовательно, на интенсивность теплообмена и величину  $q_{кр}$ . Протекание процесса пузыреобразования в отдельных (изолированных) ячейках, как это имело место в исследуемой системе, предотвращает преждевременное слияние паровых пузырей и образование сплошной паровой пленки. Наличие крупных ячеек позволяет улучшить отвод легкой фазы от парогенерирующей поверхности. Однако увеличивать ячейки, начиная с ширины  $0,4 \cdot 10^{-3}$  м, нецелесообразно, поскольку в таких ячейках, подобно кипению на технической поверхности без пористого покрытия, возникают паровые конгломераты.

**Вывод.** Проведены исследования кризиса теплообмена в зависимости от недогрева и скорости потока, теплофизических свойств поверхности нагрева и выброса капель жидкости из пористой структуры. Определены принципы конструирования камер сгорания и сопел и расчет критического теплового потока. Исследования имеют практическое значение в области предельного состояния парогенерирующей поверхности, защищаемой охлаждением от пережога.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Поляев В.М., Генбач А.Н., Генбач А.А. Пористое охлаждение камер сгорания и сверхзвуковых сопел // Тяжелое машиностроение. – 1991. – № 7. – С. 8-10.
- [2] Polyayev V., 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.
- [3] Генбач А.А., Генбач Н.А. Охлаждение камеры сгорания и сопла при вынужденном течении недогретого охладителя в пористых структурах // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: Сб. научных трудов 5-ой междунар. научной технич. конф. – Алматы: АИЭС, 2006. – С. 55-58.
- [4] Генбач А.А. Термогидравлические характеристики процесса кипения жидкости в пористых структурах. – Деп. в КазНииНТИ 26.07.89, N = 2794. – 1989. – 323 с.
- [5] Генбач А.А., Бурмистров А.В. Исследование теплового состояния цилиндров паровых турбин // Промышленность Казахстана. – 2011. – № 2(65). – С. 91-93.
- [6] Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Расчет кризиса кипения в пористых структурах, охлаждающих детали энергоустановок электростанций // Промышленность Казахстана. – 2012. – № 6(75). – С. 82-83.
- [7] Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Механизм кризиса теплообмена в пористой системе охлаждения ГТУ // МОН РК. Международный научный журнал – приложение Республики Казахстан. – Поиск. – 2014. – № 1(1). – С. 96-102.
- [8] Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Модель кризиса теплообмена в пористой системе охлаждения ГТУ // Вестник КазНТУ. – 2014. – № 2(102). – С. 229-235.

**А. А. Генбач, Д. Ю. Бондарцев**

Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

#### **ЖОҒАРЫ ҚЫСЫМҒА АРНАЛҒАН ҚУАТТЫ ҚҰРЫЛЫМДАРДАҒЫ ЖЫЛУ АЛМАСУ ДАҒДАРЫСЫН ЗЕРТТЕУ**

**Аннотация.** Кеуекті құрылымдардағы суды қайнату кезінде жылу алмасу дағдарысы зерттеледі. Зерттеу электр станцияларының жылу электр станцияларына жатады. Эксперименттер зымыран тозандатқыштарында жүргізілді. Жану камералары мен дыбыстан шашатын саңылаулар түрлі кеуекті құрылымдармен салқындалды. Жылулық алмасу процестерінің механизмі сипатталған және кеуекті құрылымдардың онтайлы ұяшық мөлшері анықталып, жоғары қысымдар үшін есептелген жылу ағыны теңдеуі алынды.

**Түйін сөздер:** қайнау дағдарысы, капиллярлы-кеуекті құрылымдар, салқындату жүйелері, жылу дағдарысы механизмі.

## **Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan**

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the described work has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct ([http://publicationethics.org/files/u2/New\\_Code.pdf](http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf)). To verify originality, your article may be checked by the Cross Check originality detection service <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Правила оформления статьи для публикации в журнале смотреть на сайте:

[www.nauka-nanrk.kz](http://www.nauka-nanrk.kz)

**ISSN 2518-1467 (Online), ISSN 1991-3494 (Print)**

<http://www.bulletin-science.kz/index.php/ru/>

Редакторы *М. С. Ахметова, Т. М. Апендиев, Д. С. Аленов*  
Верстка на компьютере *Д. Н. Калкабековой*

Подписано в печать 16.02.2018.

Формат 60x881/8. Бумага офсетная. Печать – ризограф.

14,2 п.л. Тираж 2000. Заказ 1.