

Энергетика и электротехника

УДК 621.165 (621.45.038)

Оптические методы исследования динамики развития паровой и жидкостной фаз в капиллярно-пористых структурах

А.А. Генбач, Д.Ю. Бондарцев

Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева

Optical methods for studying the dynamics of vapor and liquid phase development in capillary-porous structures

A.A. Genbach, D.Yu. Bondartsev

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev

Исследовано охлаждение кипящим охладителем перспективных паровых турбин, работающих при температурах и давлениях, превышающих сверхкритические значения. Изучена система, работающая по схеме тепловой трубы, где к капиллярному потенциалу добавлен массовый. Выполнен расчет испарительной и конденсационной частей. Разработаны установки для оптических методов исследования динамики развития паровой и жидкостной фаз. Рассмотрена динамика процессов зарождения, роста и разрушения парового пузыря в капиллярно-пористой структуре с помощью оптических методов. Приведены кинограммы и голографические интерферограммы процессов теплопередачи для различных фитилей, тепловых нагрузок, избытка жидкости с расчетом внутренних характеристик кипения и выбросом капель жидкости из структуры. Отмечено, что возможность разделения общей энергии при зарождении парового зародыша является важной задачей борьбы с эрозией и кавитацией. Показана имитация аварийной ситуации путем снижения расхода охладителя до его минимального значения.

EDN: HNZZIV, <https://elibrary/hnzziv>

Ключевые слова: пузырьковые потоки, кавитация, система охлаждения, диафрагма, сопловые лопатки, капиллярно-пористая структура

Boiling coolant cooling of advanced steam turbines operating above standard supercritical temperatures and pressures has been developed and investigated. A system operating according to the heat pipe scheme has been studied, with the mass potential added to the capillary potential. The calculation of the evaporating and condensing parts is performed. Installations for optical methods of studying the dynamics of vapor and liquid phases have been developed. The initial stage of vapor bubble nucleation and the dynamics of growth and destruction processes in the capillary-porous structure using optical methods are developed. Kinograms and holographic interferograms of heat transfer processes for different

wicks, thermal loads, liquid excess with calculation of internal boiling characteristics, ejection of liquid droplets from the structure are presented. The possibility of separating the total energy at vapor nucleation is an important task of erosion and cavitation control. Simulation of an emergency situation by reducing the coolant flow rate to its minimum value is shown.

EDN: HNZJIV, <https://elibrary/hnzjiv>

Keywords: bubble flows, cavitation, cooling system, diaphragm, nozzle blades, capillary-porous structure

Котлотурбинные агрегаты с диафрагмой, требующей высокоинтенсивного охлаждения [1] (рис. 1), работают при температурах и давлениях, превышающих сверхкритические значения [2].

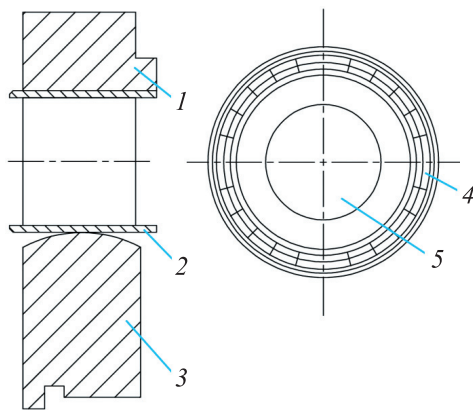


Рис. 1. Модель диафрагмы:
1 и 3 — обод и тело диафрагмы; 2 — бандажная лента;
4 — сопловые лопатки; 5 — вал

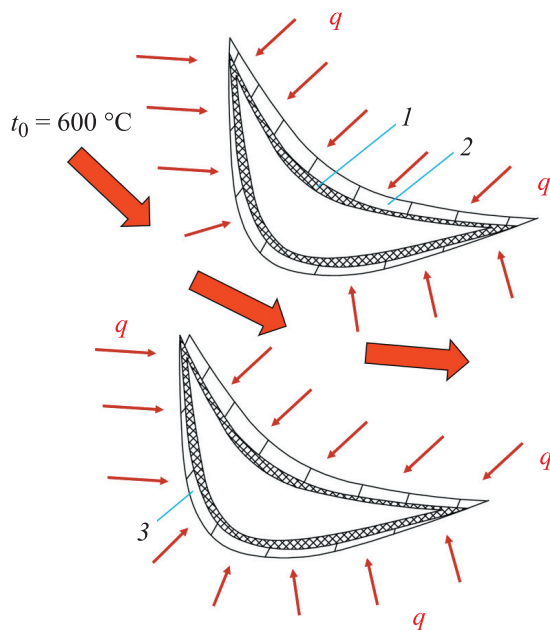


Рис. 2. Модель системы охлаждения сопловых лопаток:

1 — капиллярно-пористая структура; 2 и 3 — корытце и спинка лопатки; q — удельный тепловой поток

Для повышения тепловой эффективности электростанций [1, 2] применяются тепловые трубы [3], которые выгоднее других систем охлаждения [4]. Системы охлаждения паровых турбин работают при давлении 300 бар и температуре пара 600 °C [5]. Система охлаждения сопловых лопаток показана на рис. 2.

В современных инженерных системах гидравлические машины тесно связаны с процессами теплообмена. При работе насосов [6], турбин [7] и других агрегатов жидкость нагревается вследствие трения, потерь давления и внутренних утечек, что требует обязательного охлаждения. Особенно важным это становится в энергетике, например, в атомных электростанциях, где турбонасосы перекачивают воду при высокой температуре [8], близкой к температуре кипения. В таких условиях возможно образование паровых пузырьков [9], что приводит к кавитации — явлению, представляющему собой локальное испарение жидкости [10]. Это не только снижает эффективность машины, но и вызывает повреждения деталей [11].

Схема разделения общей энергии при генерации пузырька пара [3] показана на рис. 3.

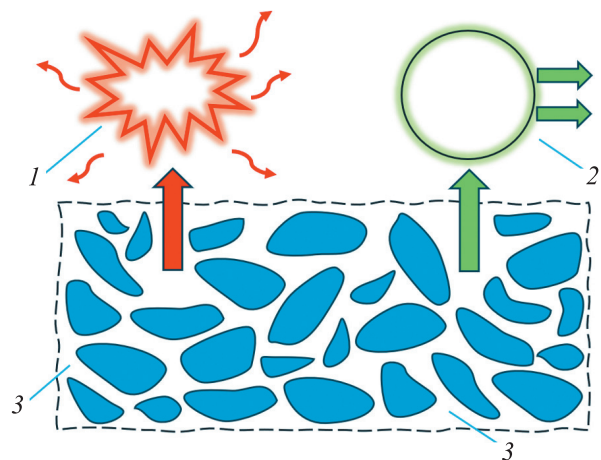


Рис. 3. Схема разделения общей энергии при генерации пузырька пара:

1 и 2 — энергия тепловой волны и сжатого парового потока; 3 — зона кипения в порах структуры

Кипение, охлаждение и гидродинамические процессы образуют неразрывную технологическую цепочку, критичную для надежности и безопасности машин и оборудования.

Последние разработки и будущие направления в визуализации потоков рассмотрены в работе [12]. Авторы отмечают, что за последние несколько десятилетий достижения в области экспериментальных методов, технологий визуализации и вычислительных методов значительно расширили возможности наблюдения от классических методов до более передовых подходов, таких как высокоскоростная визуализация, лазерно-индуцированная флуоресценция и цифровая голография.

Первый газовый лазер был создан на смеси инертных газов гелия и неона при высококачественной накачке электрического разряда током с частотой 30 МГц. Лазер обеспечивал непрерывную генерацию на длинах волн 0,63; 1,15 и 3,39 мкм с эффективностью менее 0,1 %. Физический предел низкого коэффициента полезного действия лазера определялся отношением энергии фотона излучения лазера (не более 2 эВ) и накачки (~20 эВ) метастабильных состояний (2^3S и 2^1S) атома Ne при столкновениях с электронами разряда.

Последующие эксперименты показали возможность накачки лазера постоянным током, а также существование областей оптимальных параметров. Например, авторы работы [13] получили почти двукратное (примерно в 1,75 раза) увеличение мощности излучения с длиной волны 633 нм при комбинированной накачке гелиево-неонового лазера ЛГ-38 постоянным и индукционным (3 МГц) токами. Установлено, что максимальная мощность достигается при меньшем (примерно на 30 %) постоянном токе.

В работе [14] разработан метод диагностики переходных режимов кипения на основе флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности с помощью дискретного вейвлет-преобразования взамен традиционного преобразования Фурье для получения амплитудно-частотных характеристик флуктуаций температуры и диагностирования смены режима теплообмена.

Представляет интерес взаимосвязь предельного состояния капиллярно-пористого покрытия и кризиса теплообмена в капиллярно-пористой структуре при смене режима теплообмена, что позволит в реальном времени со-

здавать систему диагностики покрытий [15] и структур.

Цель исследования — разработка установки и исследование оптическими методами процессов кипения жидкости в капиллярно-пористых структурах.

Рассмотрим механизмы возникновения, развития и эволюции многофазных потоков в кипящей жидкости.

Материалы и методы. Для визуализации процессов тепло- и массопереноса в пористой системе охлаждения методом фотографирования, скоростной киносъемки и голографической интерферометрии теплообменная система выполнена из алундовой трубы с наружным диаметром $21 \cdot 10^{-3}$ м. Применительно к энергоустановкам использованы одно-, двух- и трехслойные сетки с ячейками 0,4; 0,14×0,4 и 0,08×0,14×0,4 соответственно [3].

Тепловым источником служит расположенная внутри трубы галоидная кварцевая лампа КГ 220-1000-3 (рис. 4), имеющая следующие основные параметры: напряжение — 220 В; мощность — 1000 Вт; световой поток — 26 000 лм; светоотдача — 26 лм/Вт; полная длина — 0,18 м.

Свет от лампы просвечивает стенку алундовой трубы. Яркость свечения стенки достаточная для фотографирования и скоростной киносъемки на пленке чувствительностью 350...700 ед. (по государственному стандарту). Тепловая нагрузка регулируется напряжением, подаваемым на электроды лампы через лабораторный автотрансформатор ЛАТР-9А, и измеряется ваттметром Д539 класса 0,5.

Наблюдение проводили при удельном тепловом потоке $q = 40, 67, 94$ и 120 кВт/м², а также для промежуточных значений q . Исследовали критические нагрузки, фотографировали динамические режимы работы системы в экстремальных условиях, после чего жидкость вновь подавалась в артерию. Для структуры вида 0,14×0,4 изучали подвод жидкости против действия гравитационных сил.

Съемку осуществляли после наступления стабильного теплового режима, что обычно занимало 5...7 мин. Расход охлаждающей жидкости приняли оптимальным. В некоторых случаях расход воды регулировали так, чтобы не было капель. Влияние давления в системе на теплообмен изучали согласно схеме, приведенной на рис. 5 [15]. Схема способна работать со сливом жидкости или без него и рассчитана на

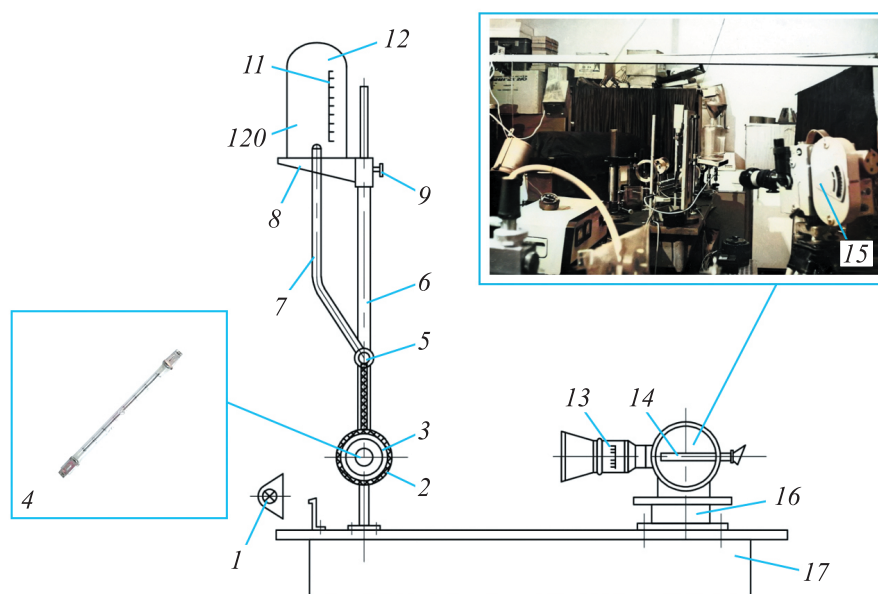


Рис. 4. Схема стенда для киносъемки:

1 — прожектор; 2 — пористая структура; 3 — алундовая трубка; 4 — лампа КГ-220-1000-3; 5 — артерия; 6 — штатив; 7 — трубка; 8 — кронштейн; 9 — стопорный винт; 10 — вода; 11 — шкала; 12 — бак; 13 — объектив; 14 — визир; 15 — камера (в уменьшенном масштабе показан внешний вид стенда); 16 — штатив; 17 — плита

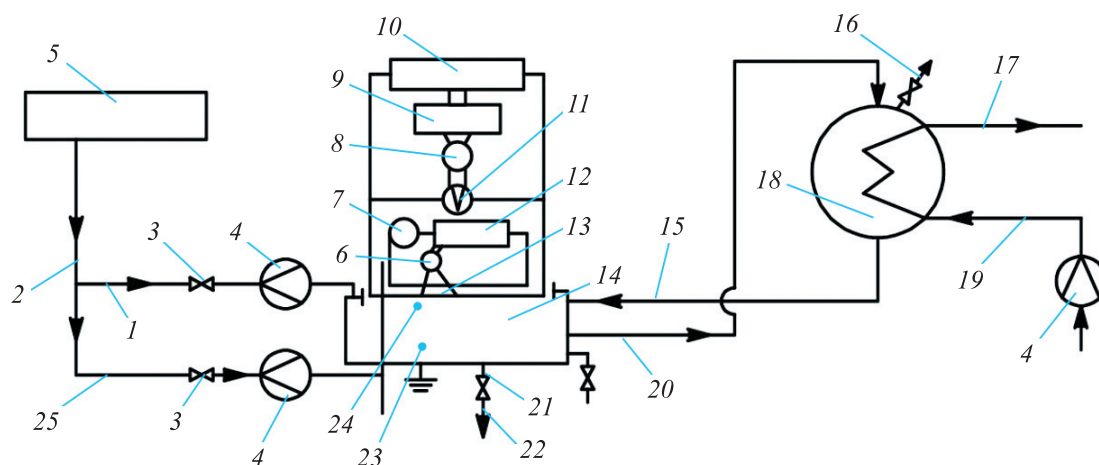


Рис. 5. Схема определения тепловых потоков на теплообменной поверхности:

1 и 25 — расход жидкости на входе в верхнюю и нижнюю магистраль; 2 — расход жидкости и температура в баке; 3 — игольчатый вентиль; 4 — ротаметр; 5 — бак; 6 — гальванометр; 7 — амперметр; 8 — ваттметр; 9 — универсальный трансформатор тока; 10 — сварочный трансформатор; 11 — вольтметр; 12 — однофазный регулятор напряжения; 14 — охлаждающий элемент; 15 — расход и температура жидкости конденсата; 16 — расход воздуха; 17 — температура жидкости на выходе; 18 — конденсатор; 19 — расход жидкости циркуляционной воды и температура воды на входе; 13 — дифференциальная температура; 20 — расход и температура пара; 21 и 22 — температура и расход жидкости слива; 23 и 24 — температура пара и стенки

одновременное проведение опытов при открытых вентиллях, либо только при открытии одного из них [9].

Визуальные наблюдения процессов тепло- и массопереноса проводили методом скоростной киносъемки камерой СКС-1М (см. рис. 4). Для фото- и киносъемки использовали фотоаппарат «Зенит» (рис. 6, а) и киноаппараты «Красногорск» (рис. 6, б) и «Киев-16с» (рис. 6, в).

Применяли следующие объективы: И-61Л (фокусное расстояние $f = 50 \cdot 10^{-3}$ м; светосила $d = 1:28$, 10-11 ($f = 135$, $d = 1:4$), Vega-7 ($f = 50$, $d = 1:2$) и РО ($f = 50$, $d = 1:2$).

Для съемки использовали кино- и фотопленку А-2 шириной 0,016 м и номинальной чувствительностью 180...350 ед. (по государственному стандарту) со временем экспонирования 1/100...1/1000 с и диафрагмой 2,8...16,0.



Рис. 6. Внешний вид фотоаппарата «Зенит» (а), киноаппаратов «Красногорск» (б) и «Киев-16с» (в)

В отдельных случаях устанавливали нейтральный 4-кратный фильтр, позволяющий при небольшой скорости киносъемки и срабатывания затвора фотоаппарата вести съемку с максимально открытой диафрагмой.

В качестве исходного параметра для набора частоты кадров и диафрагмы кино- и фотосъемочной аппаратуры выступала средняя продолжительность жизни парового пузыря, которая в зависимости от удельного теплового потока q составляет 1/50...1/4000 с. Фотографирование проводили с расстояния 0,4...0,7 м.

Плотность центров парообразования определяли как

$$\bar{n} = \frac{\bar{M} \bar{\tau}_p + \bar{\tau}_0}{F \bar{\tau}_p},$$

где $\bar{M}$ — среднее число пузырей, одновременно находящихся на поверхности; F — поверхность нагрева; $\bar{\tau}_p$ — среднее время роста пузыря; $\bar{\tau}_0$ — средний интервал времени между отрывом и появлением следующего пузыря.

Надежность величины $\bar{M}$, под которой понимается математическое ожидание, оценивали с помощью доверительного интервала. Вероятность нахождения $\bar{M}$ внутри интервала приняли равной 0,95. Доверительный интервал для математического ожидания не превышал $\pm 20\%$ абсолютного значения $\bar{M}$.

Для определения отрывного диаметра пузыря выполняли покадровую обработку пленок. Записывали размеры всех лопнувших пузырей и вычисляли среднее значение. Доверительный интервал при надежности 0,95 не превышал $\pm 20\%$. Частоту отрыва вычисляли по формуле

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

где $\bar{\tau}$ — среднее время; K — общее число пузырей, отрывающихся от поверхности за время $\Delta \tau$.

Скорость роста пузыря на поверхности нагрева определяли на экране аппарата «Микрофот», измеряя диаметр отдельных пузырей через заданный интервал времени. За начало отсчета принимали момент времени, предшествующий появлению кадра с видимым паровым зародышем.

Исследование процессов парообразования в пористых структурах проводили методом голографической интерферометрии. Оптическая схема интерферометра приведена на рис. 7.

Гелиево-неоновый лазер ЛГ-38 имеет следующие параметры: мощность излучения — $60 \cdot 10^{-3}$ Вт; длина волны — $0,6328 \cdot 10^{-6}$ м. Перед опытом получали голограмму исходного состояния объекта (диффузного экрана без системы охлаждения). Время экспонирования голограммы — 8 с.

Пластинку обрабатывали (проявляли) на месте экспонирования. Затем в сигнальный пучок вводили охлаждаемый элемент. Для регистрации интерферограмм на пленку КН-3 при различных тепловых режимах использовали фотокамеру РФК-5М, оснащенную объективом с фокусным расстоянием 0,21 м и относительным отверстием 1:4.5.

Сборку механических элементов лазерных установок, юстировку оптического квантового генератора, оптического квантового усилителя и оптической голографической схемы выполняли в соответствии с методикой, приведенной в работе [3].

Расчет. Схема замкнутой испарительно-конденсационной системы охлаждения сопловой лопатки фитилем показана на рис. 8.

Расчет зоны испарения. Принимаем следующие параметры: давление насыщения $p_n = 100$ бар, температура пара $t_n = 311,97$ °С, удельный тепловой поток в испарителе

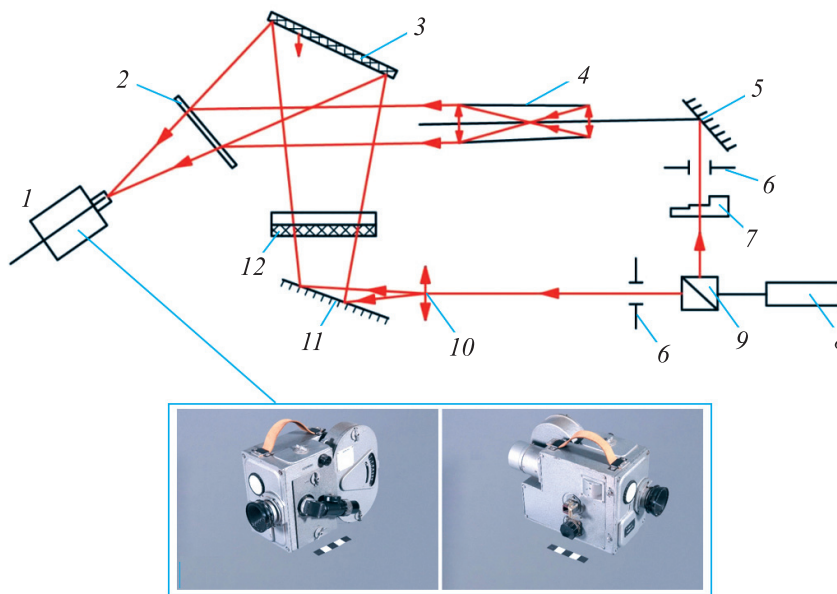


Рис. 7. Оптическая схема интерферометра:

1 — фотокамера РФК-5М РФК-5М в двух видах; 2 — плоскость голограммы; 3 — диффузный экран; 4 — коллиматор; 5 — зеркало; 6 — диафрагма; 7 — ступенчатый нейтральный светофильтр; 8 — гелиево-неоновый лазер ЛГ-38; 9 — светоделительный кубик; 10 — объектив; 11 — зеркало; 12 — охлаждаемый элемент

$q_{\text{исп}} = 10^5 \text{ Вт/м}^2$. Температуру стенки испарителя выбираем из соотношения

$$t_{\text{ст.исп}} = (5 \dots 10) + t_{\text{п}} = 316,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Коэффициент теплообмена в испарителе вычисляем как

$$a_{\text{исп}} = \frac{q_{\text{исп}}}{t_{\text{ст.исп}} - t_{\text{п}}} = 20\,000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

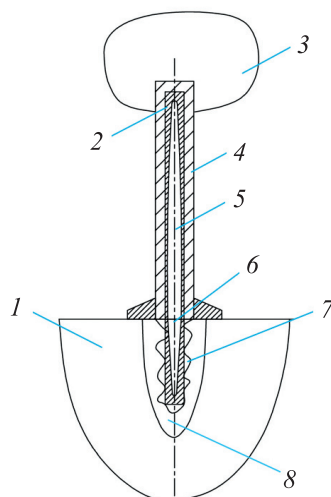


Рис. 8. Схема замкнутой

испарительно-конденсационной системы охлаждения сопловых лопаток:

1 — тело диафрагмы; 2 — фитиль; 3 и 6 — диафрагма и каналы охлаждения в ней; 4 — сопловая лопатка; 5 — глухие каналы; 7 — конденсатор; 8 — охладитель (пар)

Запишем критериальное уравнение [9, 15]

$$\begin{aligned} St_{\text{исп}} Pr_{\text{ж}}^{0,6} N_{\text{ф}}^{0,44} \left(\frac{F_{\text{исп}}}{\epsilon F_{\text{ф}}} \right)^{1,16} = \\ = 3,3 \left(\frac{b_{\text{г}}}{b_{\text{опт}}} \right)^n \left(\frac{l_{\text{исп}}}{b_{\text{г}}} \right)^n N_p^{0,23} Re_{\text{п}}^{-0,9}, \end{aligned}$$

где $St_{\text{исп}}$ — число Стэнтона; $Pr_{\text{ж}}$ — число Прандтля; $N_{\text{ф}}$ — параметр фитиля; $F_{\text{исп}}$ — площадь поверхности испарителя; ϵ — пористость структуры; $F_{\text{ф}}$ — площадь поперечного сечения фитиля; $b_{\text{г}}$ — гидравлический диаметр фитиля; $b_{\text{опт}}$ — оптимальный размер ячейки;

$$n = \begin{cases} 4,25 & \text{при } b_{\text{г}} < b_{\text{опт}}; \\ 0,43 & \text{при } b_{\text{г}} > b_{\text{опт}}; \end{cases}$$

$l_{\text{исп}}$ — длина обогреваемой зоны, м; N_p — критерий давления; $Re_{\text{п}}$ — число Рейнольдса.

Число Стэнтона

$$St_{\text{исп}} = \frac{a_{\text{исп}}}{\bar{G}_{\text{ж}} c_{p \text{ ж}}},$$

$a_{\text{и}}$ — коэффициент теплообмена в испарителе; $\bar{G}_{\text{ж}}$ — удельный расход жидкости, кг/(м²·с); $c_{p \text{ ж}}$ — изобарная теплоемкость жидкости кДж/(кг·К).

Удельный расход жидкости рассчитываем по формуле

$$\bar{G}_{\text{ж}} = \rho_{\text{ж}} \bar{W}_{\text{ж}} = \frac{q_{\text{исп}} F_{\text{исп}}}{\epsilon r F_{\text{ф}}} = 223,8 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Здесь $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости, кг/м^3 ; $\bar{W}_{\text{ж}}$ — средняя скорость течения жидкости; r — теплота парообразования, Дж/кг ; $\varepsilon = 0,7$; $F_{\text{исп}} = \pi d_{\text{исп}} l_{\text{исп}} = 0,126 \text{ м}^2$ ($d_{\text{исп}} = 0,04 \text{ м}$ — диаметр испарителя, $l_{\text{исп}} = 1 \text{ м}$);

$$F_{\phi} = \pi d_{\text{вн}} \delta_{\phi} = 0,0000613 \text{ м}^2,$$

где $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр испарителя, $d_{\text{вн}} = d_{\text{н}} - 2\delta_{\text{ст}} = 0,026 \text{ м}$ ($d_{\text{н}}$ — наружный диаметр испарителя, $d_{\text{н}} = 0,028 \text{ м}$; $\delta_{\text{ст}}$ — толщина стенки, $\delta_{\text{ст}} = 0,001 \text{ м}$); δ_{ϕ} — толщина фитиля, $\delta_{\phi} = 0,00075 \text{ м}$.

Число Прандтля

$$\text{Pr}_{\text{ж}} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{a_{\text{ж}}} = 0,975,$$

где $\nu_{\text{ж}}$ — коэффициент кинематической вязкости жидкости; $a_{\text{ж}}$ — коэффициент температуропроводности жидкости.

Параметр фитиля

$$N_{\phi} = \frac{b_{\Gamma}^2}{k} = 150,$$

где $b_{\Gamma} = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; k — коэффициент проницаемости фитиля, $k = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$.

Критерий давления

$$N_p = \frac{2\sigma}{\rho_{\text{н}} b_{\Gamma}} = 1,53 \cdot 10^{-5},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения.

Число Рейнольдса

$$\text{Re}_{\text{п}} = \frac{2b_{\Gamma} \bar{W}_{\text{п}}}{\nu_{\text{н}}} = 0,097,$$

где $\bar{W}_{\text{п}}$ — средняя скорость течения пара, $\bar{W}_{\text{п}} = q_{\text{исп}} / (r \rho_{\text{п}}) = 0,00112 \text{ м/с}$ ($\rho_{\text{п}}$ — плотность пара); $\nu_{\text{н}}$ — удельный объем насыщенного пара.

По найденным значениям из критериального уравнения определяем число Стэнтона

$$\text{St}_{\text{исп}} = 0,0166,$$

а затем коэффициент теплообмена в испарителе

$$a_{\text{исп}} = \text{St}_{\text{исп}} G_{\text{ж}} c_{p \text{ ж}} = 23 \, 284,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Расхождение полученного коэффициента теплообмена с принятым значением составляет 16,42 %. Уточняем температуру стенки испарителя

$$t_{\text{ст.исп}} = \frac{q_{\text{исп}}}{a_{\text{исп}}} + t_{\text{п}} = 316,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Расчет зоны конденсации. Среднюю температуру жидкости определяем по выражению

$$\bar{t}_{\text{ж.к}} = \frac{t_{\text{ст.исп}} + t_{\text{п}}}{2} = 314,1 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

При расчете зоны конденсации за основу берем критериальное уравнение (А.Я. Шелгинского) [16]

$$\text{St}_{\text{к}} \text{Pr}_{\text{ж}}^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{F_{\text{исп}}^2}{k F_{\phi}} \right)^{0,59} \left(\frac{F_{\text{к}}}{\varepsilon F_{\phi}} \right)^{1,17} = c \tilde{N}_p^n \text{Ki}^{0,4} \text{Re}_R^{-0,9},$$

где $\text{St}_{\text{к}}$ — число Стэнтона в конденсаторе; $F_{\text{к}}$ — площадь поперечного сечения парового потока в конденсаторе; c — постоянная; Ki — критерий Кирпичева; Re_R — число Рейнольдса в конденсаторе.

Число Стэнтона

$$\text{St}_{\text{к}} = \frac{a_{\text{к}}}{G_{\text{ж}} c_{p \text{ ж}}}.$$

Здесь $a_{\text{к}}$ — коэффициент теплообмена в конденсаторе,

$$a_{\text{к}} = \frac{q_{\text{к}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{ст.к}}},$$

где $q_{\text{к}}$ — удельный тепловой поток в конденсаторе, Вт/м^2 ; $t_{\text{ст.к}}$ — температура стенки конденсатора.

Площадь поперечного сечения парового потока

$$F_{\text{к}} = \pi d_{\text{н}} l_{\text{к}} = 0,0879 \text{ м}^2,$$

где $l_{\text{к}}$ — длина конденсатора.

Удельный тепловой поток в конденсаторе

$$q_{\text{к}} = \frac{q_{\text{исп}} F_{\text{исп}}}{F_{\text{к}}} = 142 \, 857,1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Критерий давления

$$\tilde{N}_p = \frac{p_{\text{н}} R_{\text{п}}}{\sigma} = 1 \, 111 \, 6167,4,$$

где $R_{\text{п}}$ — радиус пузыря, $R_{\text{п}} = R_{\text{вн}} - \delta_{\phi} = 0,0123 \text{ м}$ ($R_{\text{вн}}$ — радиус внутренней трубы).

Для $\tilde{N}_p > 1000$ $n = 0,48$ и $c = 15 \, 000$.

Критерий Кирпичева

$$\text{Ki} = \frac{r}{c_{p \text{ ж}} (t_{\text{п}} - t_{\text{ст.к}})} = 20,6.$$

Число Рейнольдса

$$\text{Re}_R = R_{\text{п}} \bar{W}_{\text{исп}} / \nu_{\text{п}} = 3,9,$$

где $\nu_{\text{п}}$ — коэффициент кинематической вязкости пара.

По найденным значениям из критериального уравнения определяем число Стэнтона

$$St_k = 0,048.$$

Коэффициент теплообмена

$$a_k = St_k G_{ж} c_{p,ж} = 67\,337,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Расхождение коэффициента теплообмена a_k с принятым значением составляет 3,7 %. Уточняем температуру стенки конденсатора

$$t_{ст,к} = \frac{q_k}{a_k} + t_{п} = 314,1 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Так как $(t_{п} - t_{ст,к}) < 5...10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, расчет считаем законченным.

Результаты. Рассмотрим процесс зарождения парового пузыря (рис. 9). Паровой пузырь 1 спонтанно возникает во впадине 2 стенки 3, покрытой пористой структурой 4, вследствие подвода удельного теплового потока q . В пористой [15] или капиллярно-пористой [3] структуре протекает пароводяная смесь, подаваемая для разогрева корпуса и ротора турбины, с удельным расходом $G_{ж}$.

Динамика процессов зарождения, жизни и гибели одиночного пузыря в активной фазе (концентраторе напряжений) турбинной поверхности, покрытой пористой структурой показана на рис. 10. Структура может быть искусственной, организованной для охлаждения машинных деталей, либо естественной (различные отложения, соли, налеты металлов и др.).

Тепловой поток q затрачивается на рост парового зародыша, начиная с его наименьшего размера (рис. 10, стадия 2, l — критический радиус парового пузыря). Паровой пузырь растет (стадии 1 и 2) и касается внешней поверхности структуры (стадии 3 и 4), достигает отрывного размера l (стадия 5) и разрушается (стадии 5 и 6). За некоторым «молчанием» центра генерации спонтанно возникает новый паровой пузырь (стадии 7 и 8) критического размера (стадия 9). Когда граница пузыря касается уровня жидкости, в точке касания появляется отверстие, через которое пар вытекает из пузыря в паровой объем. По поверхности жидкости начинается распространяться волна. Такой процесс носит взрывной характер, как и в случае рождения ($\tau = 10^{-8}...10^{-6}$ с) парового зародыша (см. рис. 3).

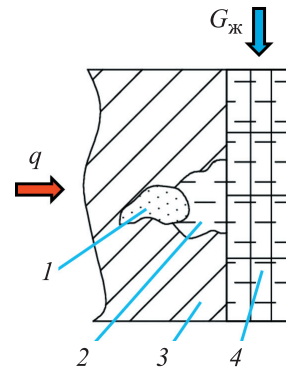


Рис. 9. Схема начальной стадии зарождения парового пузыря

При пуске (останове) турбины процессы зарождения и гибели пузыря приводят к возникновению кумулятивных явлений, которые наряду с коррозионными и электрическими процессами разрушают концентратор напряжения (центр генерации), доводя его размер до критической трещины.

Таким образом, процесс возникшей эрозии может сопровождаться ударом, кавитацией и электрохимической коррозией. В случае мгновенной концентрации пара в выемке (лунке) его объем мгновенно исчезнет, и образуется мощный кумулятивный эффект — кавитация (рис. 11–13). При этом ударные волны распространяются вглубь деталей турбины, развиваются усталостные трещины, по которым поступает кислород.

На рис. 11 приведены кинограммы процессов тепло- и массопереноса: a — для фитиля $0,14 \times 0,4$; b — для фитиля $0,4$ при $q = 40...120 \text{ кВт}/\text{м}^2$; v и z — для фитиля $0,4$ в увеличенном виде при $q = 94 \text{ кВт}/\text{м}^2$, $n = 0,14$ и избытке жидкости $\dot{m} = m_{ж}/m_{п} = 14$ ($m_{ж}$ и $m_{п}$ — расходы жидкости и пара).

Фрагменты кинограмм в увеличенном виде для фитилей $0,14 \times 0,4$ и $0,4$ (см. рис. 11, столбцы a и z) приведены на рис. 12, a и b соответственно.

Явление выброса капель жидкости из капиллярно-пористой структуры вида $0,14 \times 0,4$ при $q = 94 \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и $\dot{m} = 1,1$ показано на рис. 13, a .

По мере дальнейшего развития пузырей происходит разрушение капиллярных низкотемпературных покрытий как естественного происхождения, так и искусственного.

Каверна, образовавшаяся в покрытии структуры (рис. 13, b) под действием нескольких явлений (удара, кавитации и коррозии), приводит

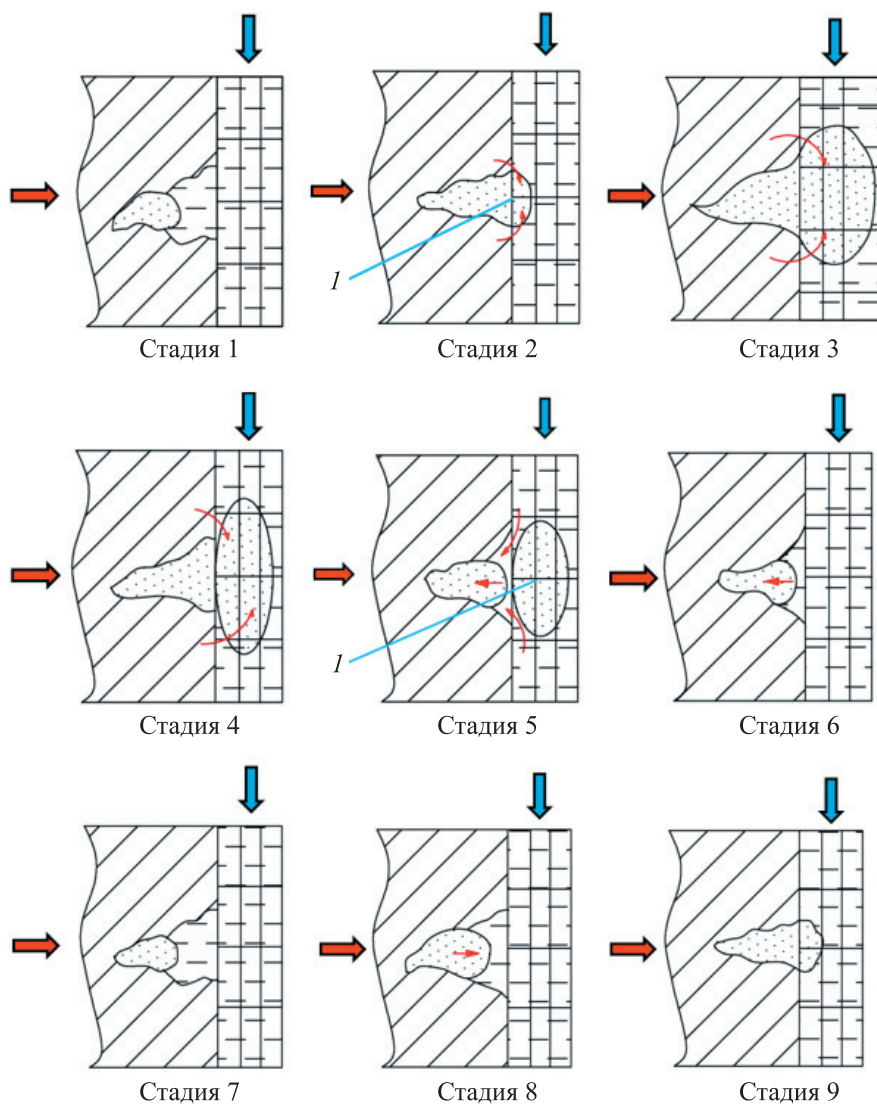


Рис. 10. Картина динамики процессов зарождения, жизни и гибели одиночного пузыря в активной поре

к эрозионным явлениям и разрушению элементов ротора и статора.

Чем больше глубина проникновения тепловой волны или размер разрушающихся частиц пористого покрытия [15], тем больше времени потребуется для разрушения деталей.

Голографические интерферограммы процессов тепло- и массопереноса для структуры вида 0,4 приведены на рис. 14. По этим интерферограммам рассчитываются коэффициенты теплоотдачи и температурные поля в структуре и теплообменной стенке для стационарных и переменных режимов работы теплообменного элемента.

По мере набора турбиной нагрузки она входит в номинальный (или переменный) режим работы, тепловые потоки на поверхности ма-

шины стабилизируются (выравниваются) и приобретают среднеинтегральные расчетные величины.

Обсуждение. Рассматривая вопрос пузырьковых потоков в современной литературе [1–12, 14–20], особое внимание следует уделить интеграции каналов с кипящей жидкостью внутри полых лопаток с применением капиллярно-пористых структур [9], тепловых труб и открытых двухфазных систем теплоотвода. Эти технологии активно развиваются в смежных областях — в первую очередь в ракетных, авиационных и газотурбинных двигателях, и они постепенно адаптируются к условиям паровых турбин нового поколения [3], на стационарных турбинах ТЭС и АЭС.

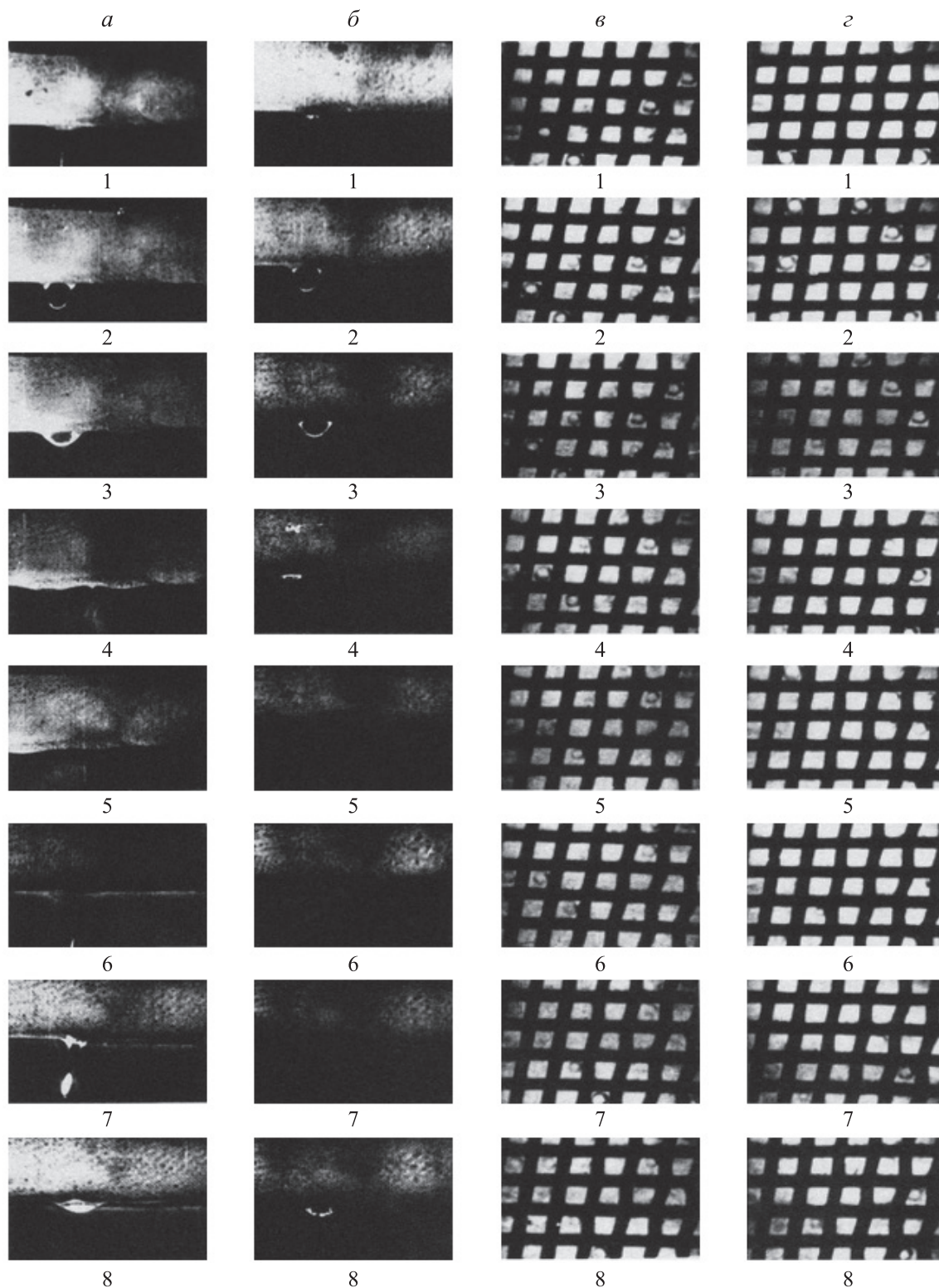
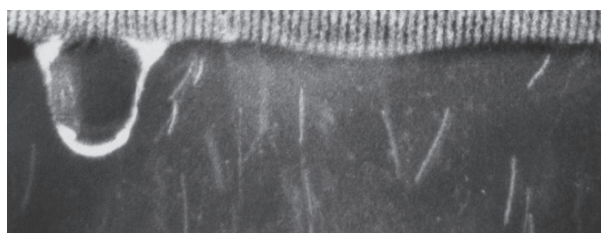


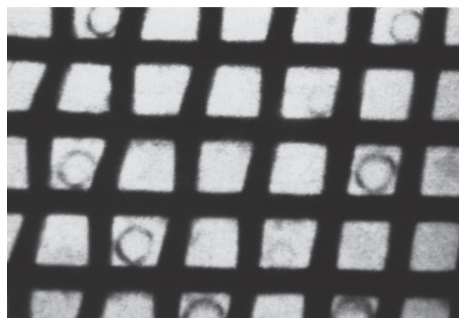
Рис. 11. Кинограммы процессов тепло- и массопереноса для различных фитилей, тепловых нагрузок, избытка жидкости

Предложена замкнутая испарительно-конденсационная система охлаждения сопловых лопаток (см. рис. 8), которая может быть применена при проектировании турбин, работающих при параметрах, превышающих сверх-

критические значения: температуре пара более 570 °С и давлении 300 бар. Результаты, полученные при эксперименте и расчете, подтверждают высокую эффективность испарительно-конденсационной системы охлаждения, реали-



а



б

Рис. 12. Фрагменты кинограмм для фитилей $0,14 \times 0,4$ (а) и $0,4$ (б)

зованной с применением капиллярно-пористых структур.

Анализ фазовых превращений на поверхности теплообменных элементов указывает на основную роль процессов спонтанного зарождения, роста и разрушения паровых пузырей в общей тепловой динамике (см. рис. 10). Кратковременные, но мощные взрывные явления, происходящие в масштабе микросекунд (см. рис. 11), могут не только усиливать теплообмен, но и вызывать кумулятивные и кавитационные эффекты, способствующие ускоренному разрушению материала в области активных центров генерации.

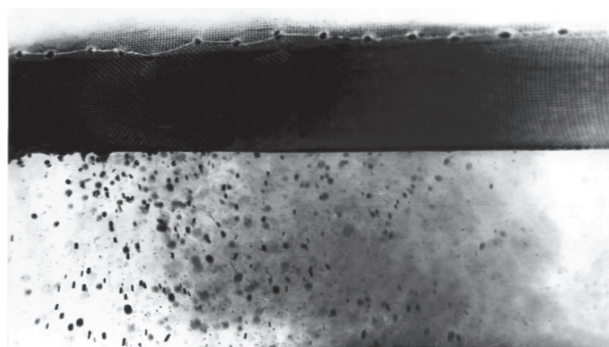
В частности, рост паровых пузырей в пористой структуре на стенке (см. рис. 11) сопро-

вождается локальными изменениями давления, что создает предпосылки для кавитационного разрушения [17] и формирования микротрещин [15]. В работе [15] рассмотрена предыстория образования микротрещин в теплоэнергетическом оборудовании. Сопутствующие процессы — электрохимическая коррозия и тепловые удары — усугубляют деградацию материала, особенно в условиях пуска и останова турбины. Эти выводы согласуются с ранее опубликованными результатами [3, 9].

В работе [18] предложена новая методика измерения скорости движения, формы и объема пузырьков в пузырьковом шлейфе с использованием высокоскоростной камеры и лазерного листа. Методика продемонстрировала возможность измерения скорости движения и объема пузырьков с отклонениями от контрольных значений 4,1 и 9,4 % соответственно. Также количественно определены стандартная и повторяемая неопределенности. В данном же исследовании применена более современная методика голографической интерферометрии, единственно возможной среди оптических методов.

Авторы работы [18] отмечают, что метод не был протестирован в сильно турбулентных пузырьковых потоках, которые часто встречаются в паровых турбинах [19], например в последних ступенях, где пар частично конденсируется или в гидротурбинах, где возникают такие явления при кавитации, либо на лопастях или в зонах резкого сужения (расширения) потока — такие пузырьки могут вызывать эрозию [20] от кавитации.

Предлагаемая модель охлаждающей системы, основанная на капиллярной подаче теплоносителя в замкнутом контуре с зонами испа-



а



б

Рис. 13. Картины выброса капель жидкости из капиллярно-пористой структуры структуры (а) и образования каверны в покрытии структуры (б)

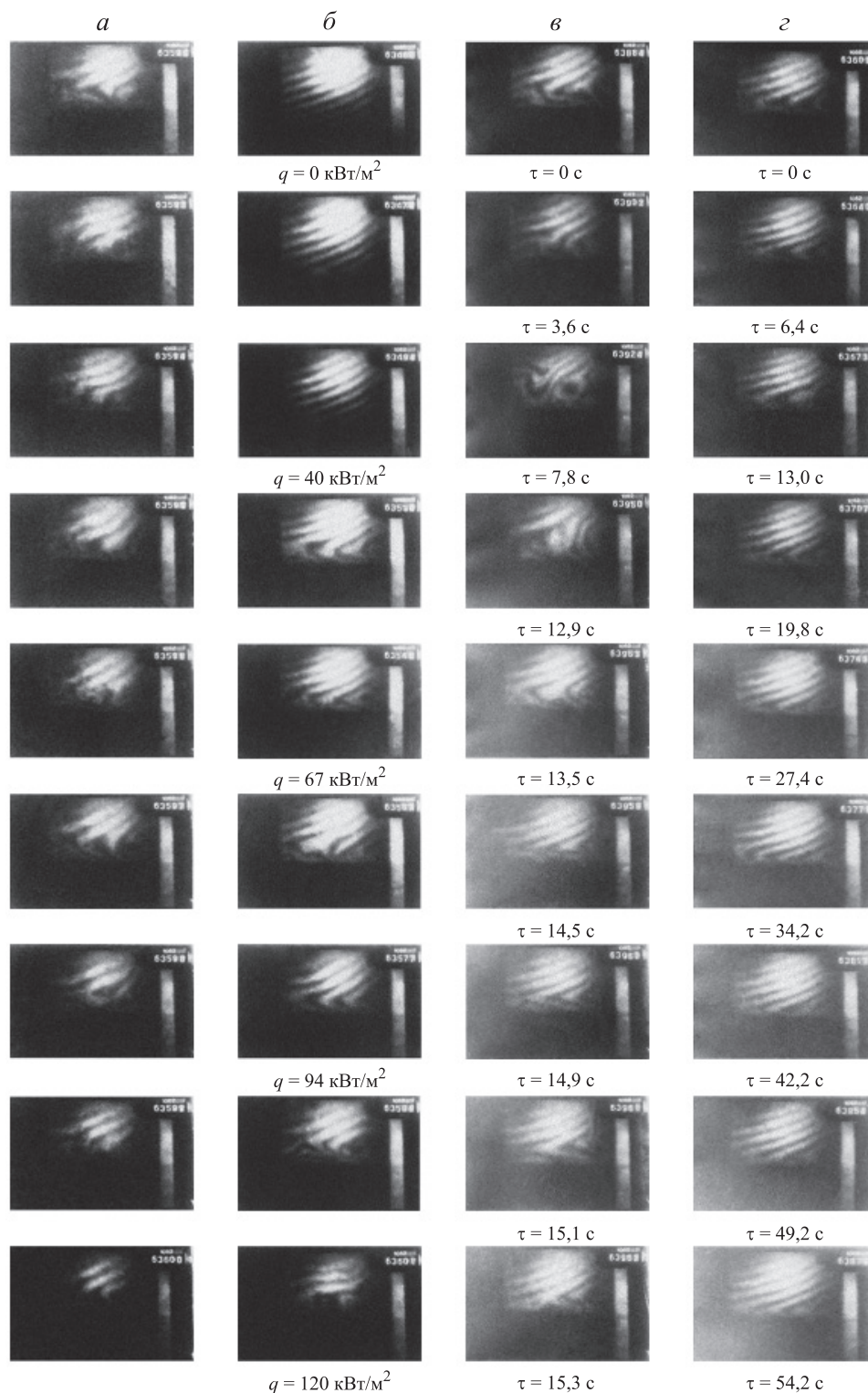


Рис. 14. Голографические интерферограммы процессов тепло- и массопереноса для структуры вида 0,4

рения и конденсации (см. рис. 8), представляет собой перспективное направление для паровых турбинных установок нового поколения. Применение структур с подобранными гидравлическим диаметром ($0,15 \cdot 10^{-3}$ м) и толщиной сетчатого слоя ($0,75 \cdot 10^{-3}$ м) обеспечивает необхо-

димую интенсивность теплоотвода при минимальном сопротивлении потоку.

Это делает данную технологию особенно привлекательной для замены дорогостоящих жаропрочных сплавов аустенитного класса, снижая стоимость и повышая надежность и

ремонтпригодность оборудования. Особо отметим, что данные обсуждения строятся на единственно возможных оптических методах исследования, эффективных при прогнозировании срока службы паротурбинного оборудования тепловых электростанций на органическом топливе, и особенно на атомных электростанциях.

Отмечена начальная стадия зарождения (см. рис. 10) и развития легкой фазы вплоть до ее разрушения. Кинограммы и голографические интерферограммы выявили динамику процессов тепло- и массопереноса в зависимости от различных факторов: вида капиллярно-пористой структуры, тепловых нагрузок, избытка охладителя с расчетом плотности центров генерации и выбросов капель жидкости из структуры (см. рис. 13, а) с образованием каверны (см. рис. 13, б) вследствие эрозии от струйного потока (см. рис. 11).

Возможность разделения общей энергии (см. рис. 3) при появлении парового зародыша на энергию тепловой волны и энергию сжатого пара в зоне кипения структуры является важной идеей борьбы с эрозией и кавитацией.

Подбор избытка жидкости $\tilde{m}$ существенно снизит выброс капель, опасных для возникновения процессов кавитации (см. рис. 13, а).

Имитация аварийной ситуации путем уменьшения избытка жидкости $\tilde{m}$ вплоть до создания минимального значения $m_{\min}$ приводит к условиям кризиса кипения с образованием каверны (см. рис. 13, б). Такой прием научного исследо-

вания может быть зарегистрирован только с помощью интерферограмм (см. рис. 14).

Выводы

1. Предложены установки для оптических методов исследования. Приведены результаты обработки опытных данных в виде выброса капель жидкости, динамики развития паровой и жидкостной фаз для различных условий теплообмена (вид структуры, параметры q , $\tilde{m}$, τ , $\bar{n}$). Разработана методика обработки опытных данных.

2. Создан способ охлаждения сопел паровых турбин для нестандартных закритических параметров. Исследована замкнутая испарительно-конденсационная система охлаждения сопел и межлопаточного канала ступени турбины в виде фитиля структуры или покрытия. Результаты расчета зон испарения и конденсации подтверждены данными эксперимента, выбраны гидравлический диаметр ячейки $0,15 \cdot 10^{-3}$ м и толщина структуры $0,75 \cdot 10^{-3}$ м. Анализ фазовых превращений на поверхности теплообмена выявил их главную роль во взрывообразном поведении паровой фазы, которые вызывают кумулятивные и кавитационные эффекты. Исследованная система охлаждения является привлекательной для замены жаропрочных сплавов, повышая надежность оборудования. Проведенные исследования построены на оптических методах, эффективных при прогнозировании срока службы оборудования.

Литература

- [1] Pengfei H., Hou T., Gu W. et al. Non-equilibrium condensation flow characteristics of wet steam considering condensation shock effect in the steam turbine. *Appl. Therm. Eng.*, 2025, vol. 259, art. 124828, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124828>
- [2] Piwowarski M., Kosowski K., Richert M. Organic supercritical thermodynamic cycles with isothermal turbine. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 12, art. 4745, doi: <https://doi.org/10.3390/en16124745>
- [3] Genbach A.A., Beloev H.I., Bondartsev D.Yu et al. Boiling crisis in porous structures. *Energy*, 2022, vol. 259, art. 125076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>
- [4] Boubaker R., Platel V. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. *Energy*, 2016, vol. 111, pp. 402–413, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.102>
- [5] Arkadyev B.A. Features of steam turbine cooling by the example of an SKR-100 turbine for supercritical steam parameters. *Therm. Eng.*, 2015, vol. 62, no. 10, pp. 728–734, doi: <https://doi.org/10.1134/S004060151510002X>
- [6] Kan K., Liu K., Xu Z. et al. Fluid deformation induced energy loss of pump-turbines based on the transport of mean kinetic energy. *Renew. Energy*, 2025, vol. 248, art. 122998, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122998>

- [7] Ayli E. Cavitation in hydraulic turbines. *Int. J. Heat Technol.*, 2019, vol. 37, no. 1, pp. 334–344, doi: <https://doi.org/10.18280/ijht.370140>
- [8] Popov A.V., Kulakov E.N., Kruglikov P.A. et al. Determining the optimum pressure differential across the control valve of a hydroturbine driven pump. *Therm. Eng.*, 2024, vol. 71, no. 2, pp. 118–124, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601524020071>
- [9] Genbach A.A., Beloev H., Bondartsev D. Comparison of cooling systems in power plant units. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 19, art. 6365, doi: <https://doi.org/10.3390/en14196365>
- [10] Di A., Li Y., Liu C. A review of cavitation problems of cryogenic fluids in gathering pipelines. *J. Pipeline Sci. Eng.*, 2025, art. 100269, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100269>
- [11] Sedlar M., Koutny A., Kratky T. et al. Assessment of cavitation erosion using combined numerical and experimental approach. *Fluids*, 2024, vol. 9, no. 11, art. 259, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids9110259>
- [12] Ge M., Zhang G., Zhang X. Recent developments and future directions in flow visualization: experiments and techniques. *Fluids*, 2025, vol. 10, no. 2, art. 23, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids10020023>
- [13] Valshin A.M., Pershin S.M., Tavlykaev R.F. et al. Increase in the power of a commercial He-Ne laser under combined pumping. *Phys. Wave Phen.*, 2015, vol. 23, no. 3, pp. 199–201, doi: <https://doi.org/10.3103/S1541308X15030061>
- [14] Litvintsova Y.E., Kuzmenkov D.M., Muradyan K.Y. et al. Diagnostics of transient heat-transfer regimes during pool boiling based on wavelet transform of temperature fluctuations. *Therm. Eng.*, 2023, vol. 70, no. 11, pp. 875–884, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601523110101>
- [15] Genbach A.A., Bondartsev D.Y., Genbach N.A. et al. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces. *J Mater Sci: Mater Eng.*, 2025, vol. 20, no. 1, art. 46, doi: <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5>
- [16] Volkov A.V., Malenkov A.S., Shelginsky A.Ia. Resource-saving system of heat and cold supply in power complex of the metallurgical plant. *Solid State Phenom.*, 2018, vol. 284, pp. 1398–1403, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1398>
- [17] Jia B., Soyama H. Non-spherical cavitation bubbles: a review. *Fluids*, 2024, vol. 9, no. 11, art. 249, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids9110249>
- [18] Tribbiani G., Capponi L., Tocci T. et al. An image-based technique for measuring velocity and shape of air bubbles in two-phase vertical bubbly flows. *Fluids*, 2025, vol. 10, no. 3, art. 69, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids10030069>
- [19] Mambro A., Congiu F., Galloni E. et al. Blade drag resistance in windage operating of low pressure steam turbines. *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 12, art. 372, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids7120372>
- [20] Omelyanyuk M., Ukolov A., Pakhlyan I. et al. Experimental and numerical study of cavitation number limitations for hydrodynamic cavitation inception prediction. *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 6, art. 198, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids7060198>

References

- [1] Pengfei H., Hou T., Gu W. et al. Non-equilibrium condensation flow characteristics of wet steam considering condensation shock effect in the steam turbine. *Appl. Therm. Eng.*, 2025, vol. 259, art. 124828, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124828>
- [2] Piwowarski M., Kosowski K., Richert M. Organic supercritical thermodynamic cycles with isothermal turbine. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 12, art. 4745, doi: <https://doi.org/10.3390/en16124745>
- [3] Genbach A.A., Beloev H.I., Bondartsev D.Yu et al. Boiling crisis in porous structures. *Energy*, 2022, vol. 259, art. 125076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>
- [4] Boubaker R., Platel V. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. *Energy*, 2016, vol. 111, pp. 402–413, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.102>
- [5] Arkadyev B.A. Features of steam turbine cooling by the example of an SKR-100 turbine for supercritical steam parameters. *Therm. Eng.*, 2015, vol. 62, no. 10, pp. 728–734, doi: <https://doi.org/10.1134/S004060151510002X>

- [6] Kan K., Liu K., Xu Z. et al. Fluid deformation induced energy loss of pump-turbines based on the transport of mean kinetic energy. *Renew. Energy*, 2025, vol. 248, art. 122998, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122998>
- [7] Ayli E. Cavitation in hydraulic turbines. *Int. J. Heat Technol.*, 2019, vol. 37, no. 1, pp. 334–344, doi: <https://doi.org/10.18280/ijht.370140>
- [8] Popov A.V., Kulakov E.N., Kruglikov P.A. et al. Determining the optimum pressure differential across the control valve of a hydroturbine driven pump. *Therm. Eng.*, 2024, vol. 71, no. 2, pp. 118–124, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601524020071>
- [9] Genbach A.A., Beloev H., Bondartsev D. Comparison of cooling systems in power plant units. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 19, art. 6365, doi: <https://doi.org/10.3390/en14196365>
- [10] Di A., Li Y., Liu C. A review of cavitation problems of cryogenic fluids in gathering pipelines. *J. Pipeline Sci. Eng.*, 2025, art. 100269, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100269>
- [11] Sedlar M., Koutny A., Kratky T. et al. Assessment of cavitation erosion using combined numerical and experimental approach. *Fluids*, 2024, vol. 9, no. 11, art. 259, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids9110259>
- [12] Ge M., Zhang G., Zhang X. Recent developments and future directions in flow visualization: experiments and techniques. *Fluids*, 2025, vol. 10, no. 2, art. 23, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids10020023>
- [13] Valshin A.M., Pershin S.M., Tavlykaev R.F. et al. Increase in the power of a commercial He-Ne laser under combined pumping. *Phys. Wave Phen.*, 2015, vol. 23, no. 3, pp. 199–201, doi: <https://doi.org/10.3103/S1541308X15030061>
- [14] Litvintsova Y.E., Kuzmenkov D.M., Muradyan K.Y. et al. Diagnostics of transient heat-transfer regimes during pool boiling based on wavelet transform of temperature fluctuations. *Therm. Eng.*, 2023, vol. 70, no. 11, pp. 875–884, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601523110101>
- [15] Genbach A.A., Bondartsev D.Y., Genbach N.A. et al. Experimental studies of natural material-based coatings for thermal protection of metallic surfaces. *J Mater Sci: Mater Eng.*, 2025, vol. 20, no. 1, art. 46, doi: <https://doi.org/10.1186/s40712-025-00252-5>
- [16] Volkov A.V., Malenkov A.S., Shelginsky A.Ia. Resource-saving system of heat and cold supply in power complex of the metallurgical plant. *Solid State Phenom.*, 2018, vol. 284, pp. 1398–1403, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1398>
- [17] Jia B., Soyama H. Non-spherical cavitation bubbles: a review. *Fluids*, 2024, vol. 9, no. 11, art. 249, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids9110249>
- [18] Tribbiani G., Capponi L., Tocci T. et al. An image-based technique for measuring velocity and shape of air bubbles in two-phase vertical bubbly flows. *Fluids*, 2025, vol. 10, no. 3, art. 69, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids10030069>
- [19] Mambro A., Congiu F., Galloni E. et al. Blade drag resistance in windage operating of low pressure steam turbines. *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 12, art. 372, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids7120372>
- [20] Omelyanyuk M., Ukolov A., Pakhlyan I. et al. Experimental and numerical study of cavitation number limitations for hydrodynamic cavitation inception prediction. *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 6, art. 198, doi: <https://doi.org/10.3390/fluids7060198>

Статья поступила в редакцию 17.06.2025

Информация об авторах

ГЕНБАЧ Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор ВАК, профессор кафедры «Теплоэнергетика и физика», Институт энергетики и зеленых технологий. Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева (050013, Казахстан, Алматы, ул. Байтурсынова, д. 126, e-mail: a.genbach@aes.kz).

БОНДАРЦЕВ Давид Юрьевич — PhD, ассоциированный профессор ВАК (доцент ВАК), профессор кафедры «Теплоэнергетика и физика», Институт энергетики и зеленых технологий. Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева (050013, Казахстан, Алматы, ул. Байтурсынова, д. 126, e-mail: d.bondartsev@aes.kz).

Information about the authors

GENBACH Aleksandr Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Professor of HAC, Professor of the Department of Heat Power Engineering and Physics, Institute of Energy and Green Technologies. Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev (050013, Kazakhstan, Almaty, Baitursynov St., Bldg. 126, e-mail: a.genbach@aes.kz).

BONDARTSEV David Yurievich — PhD, Associate Professor of HAC, Professor of the Department of Heat Power Engineering and Physics, Institute of Energy and Green Technologies. Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeev (050013, Kazakhstan, Almaty, Baitursynov St., Bldg. 126, e-mail: d.bondartsev@aes.kz).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Генбач А.А., Бондарцев Д.Ю. Оптические методы исследования динамики развития паровой и жидкостной фаз в капиллярно-пористых структурах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 3, с. 117–132.

Please cite this article in English as:

Genbach A.A., Bondartsev D.Yu. Optical methods for studying the dynamics of vapor and liquid phase development in capillary-porous structures. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 3, pp. 117–132.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию**

«Технологии высокопроизводительных интеллектуальных систем мультимодальной аналитической обработки разнородных данных»

Авторы: А. Н. Алфимцев, Д. В. Березкин и др.

Представлены результаты исследований развития аппаратных и программных средств для создания высокопроизводительных интеллектуальных систем. Описаны перспективные технологии искусственного интеллекта, способные обрабатывать графы знаний, имеющие более совершенные аналитические возможности, приближенные к деятельности человека, в частности искусственные нейро-, синергетические и семантические сети. Рассмотрены методы эмерджентной самоорганизации мультиагентных систем. Проанализированы возможности применения технологий искусственного интеллекта для обеспечения безопасности авиapolетов.

Для профессорско-преподавательского состава вузов, научно-педагогических работников и исследователей цифровых технологий и искусственного интеллекта.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>