

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

№ 3 (2025)

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/TPDW7598>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
	<i>технический редактор</i>

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/CTCB8451>**А. А. Генбач¹, *Д. Ю. Бондарцев²**

^{1,2}Алматинский Университет Энергетики и Связи
имени Г. Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3819-4387>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8778-7851>

*e-mail: d.bondartsev@aes.kz

ОХЛАЖДЕНИЕ ЛОПАТОК ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН КИПАЩИМИ ЖИДКОСТЯМИ

Разработано и исследовано охлаждение кипящим охладителем перспективных паровых турбин, работающих выше стандартных сверхкритических температурах и давлениях. Изучена система, работающая по схеме тепловой трубы, причем к капиллярному потенциалу добавлен массовый. Произведен расчет испарительной и конденсационной частей. Разработаны установки для оптических методов исследования динамики развития паровой и жидкостной фаз. Рассмотрена динамика процессов роста и разрушения в капиллярно-пористой структуре с помощью оптических методов. Представлены кинограммы и голографические интерферограммы процессов теплопередачи для различных фитилей, тепловых нагрузок, избытка жидкости с расчетом внутренних характеристик кипения, выбросом капель жидкости из структуры. Возможность разделения общей энергии при зарождении парового зародыша является важной задачей борьбы с эрозией и кавитацией. Показана имитация аварийной ситуации за счет снижения расхода охладителя до его минимального значения. Применение структур с подобранным гидравлическим диаметром (0.15×10^{-3} м) и толщиной сетчатого слоя (0.75×10^{-3} м) обеспечивает необходимую интенсивность теплоотвода при минимальном сопротивлении потоку. Предложенная технология является особенно привлекательной для замены дорогостоящих жаропрочных сплавов аустенитного класса, снижая стоимость и повышая надежность и ремонтпригодность оборудования.

Ключевые слова: пузырьковые потоки, кавитация, система охлаждения, диафрагма, сопловые лопатки, пористая среда, голография, скоростная киносъёмка.

Введение.

В настоящее время используются котлотурбинные параметры агрегатов выше стандартных сверхкритических [1], в которых требуется высокоинтенсивное охлаждение диафрагмы [2] (см. рис. 1). В современных инженерных системах гидравлические машины тесно связаны с процессами теплообмена. Во время работы насосов [3], турбин и других агрегатов жидкость нагревается из-за трения, потерь давления и внутренних утечек, что требует обязательного охлаждения.

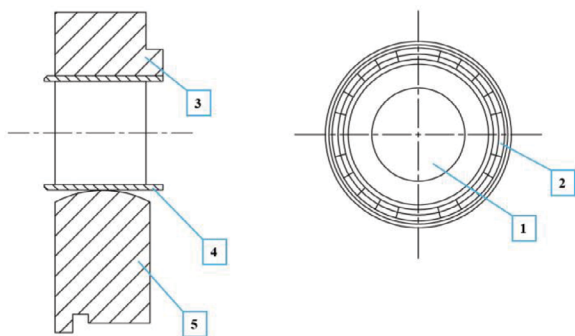


Рисунок – 1 – Диафрагма: 1 – ротор, 2 – сопла, 3 – обод, 4 – лента, 5 – тело

Особенно важным становится это в энергетике – например, в атомных электростанциях, где турбонасосы перекачивают воду при высоких температурах [4], близких к кипению. В таких условиях возможно образование паровых пузырьков, что приводит к кавитации [5]. Это не только снижает эффективность работы машины, но и вызывает повреждения деталей [6]. Таким образом, кипение, охлаждение и гидродинамика образуют неразрывную технологическую цепочку, критичную для надежности и безопасности машин и оборудования. Для повышения тепловой эффективности электростанций стали применяться тепловые трубы, которые в большей степени выгоднее иных систем охлаждения. Система охлаждения лопаток показана на рисунке 2.

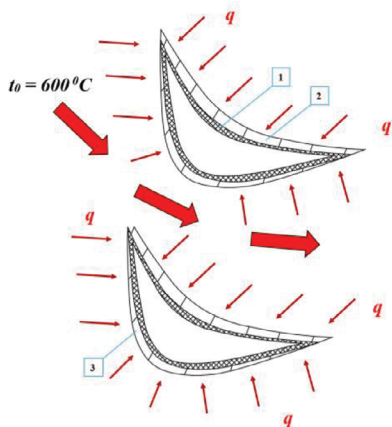


Рисунок – 2 – Охлаждаемые сопловые лопатки:
1 – фитиль, 2 – внутренняя лопатка,

3 – наружная лопатка

Разделение общей энергии в случае генерации пузырька пара представлено на рис. 3 [7]. Визуализацию процессов предлагается произвести на установках для оптических методов исследования, рассматриваемых в данной статье.

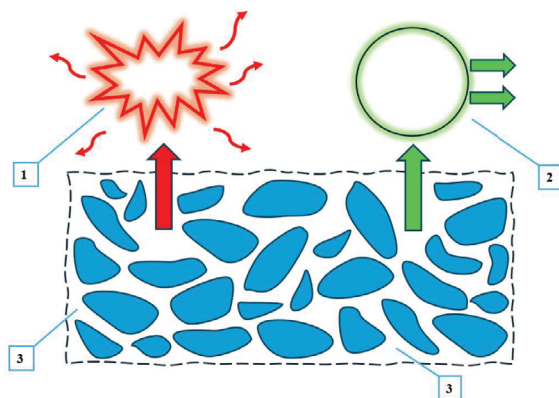


Рисунок – 3 – Разделение общей энергии при рождении парового зародыша: 1 – энергия тепловой волны; 2 – энергия сжатого парового потока; 3 – зона кипение в порах структуры

Последние разработки и будущие направления в визуализации потоков были рассмотрены авторами [8]. 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.

В данной работе для исследования процессов парообразования методом голографической интерферометрии собирался интерферометр, с гелиево-неоновым лазером ЛГ-38.

Авторами [9] проводится разработка метода диагностики переходных режимов кипения на основе флуктуаций температуры теплоотдающей поверхности Тст. с помощи дискретного вейвлет – преобразования взамен традиционном преобразованию Фурье для получения амплитудно-частотных характеристик флуктуаций температуры и диагностирования смены режима теплообмена.

Для настоящего исследования представляет интерес взаимосвязь предельного состояния капиллярно-пористого покрытия и кризиса теплообмена в капиллярно-пористой структуре при смене режима теплообмена, что позволит в режиме реального времени создавать систему диагностики покрытий [7] и структур (ϕ' , $\phi'_{кр.}$).

В статье предлагается рассмотреть механизмы возникновения, развития и эволюции многофазных потоков в кипящей жидкости.

Материалы и методы.

Для визуализации процессов тепломассопереноса в пористой системе охлаждения методом фотографирования, скоростной киносъемки и голографической интерферометрии теплообменная система выполняется из алунодой трубы с наружным диаметром 21×10^{-3} м. Применительно к энергоустановкам используются одно-, двух- и трехслойные сетки с ячейками: 0.4 , 0.14×0.4 , $0.08 \times 0.14 \times 0.4$. Тепловым источником служит галоидная кварцевая лампа типа КГ 220-1000-3 (см. рис. 4, поз. 8), 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.

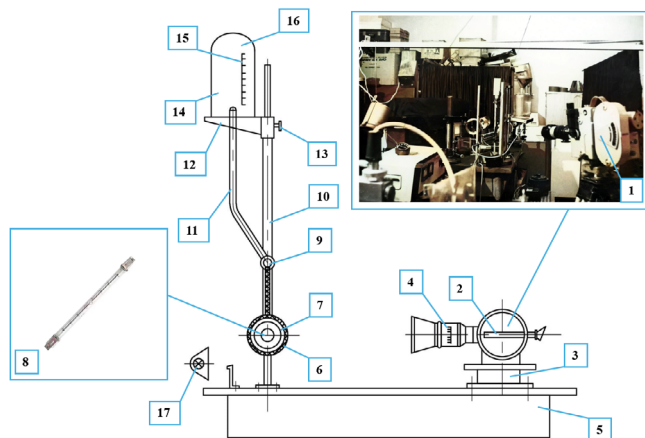


Рисунок – 4 – Схема стенда для кинесъемки

На рис. 4 приняты обозначения: 1 – камера (в масштабе представлен общий вид стенда), 2 – визир, 3 – штатив, 4 – объектив, 5 – плита, 6 – пористая структура, 7 – алундовая трубка, 8 – лампа КТ-220-1000-3, 9 – артерия, 10 – штатив, 11 – трубка, 12 – кронштейн, 13 – стопорный винт, 14 – вода, 15 – шкала, 16 – бак, 17 – прожектор.

Свет от лампы просвечивает стенку алундовой трубы. Яркость свечения стенки достаточная для фотографирования и скоростной кинесъемки 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 0.14×0.4 изучается подвод жидкости против действия гравитационных сил.

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.

Визуальные наблюдения процессов тепломассопереноса производятся методом скоростной кинесъемки камерой СКС-1М (см. рис. 4, поз. 1). Фото и кинесъемка также осуществляются с помощью фотоаппарата «Зенит» (см.

рис. 5, а) и киноаппаратов «Красногорск» (см. рис. 5, б) и «Киев-16с» (см. рис. 5, в).



Рисунок – 5 – Оборудование для фото и киносъёмки

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 съёмки 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 киносъёмки и срабатывания затвора фотоаппарата вести съёмку с максимально открытой диафрагмой.

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...1/4000 секунды. Фотографирование производится с расстояния 0.4...0.7 м.

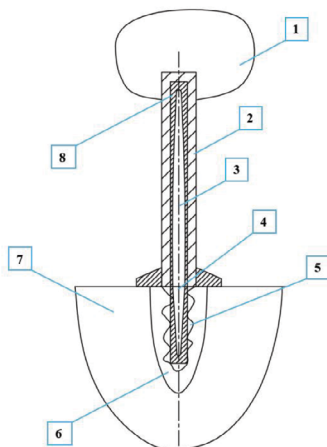
Число действующих центров парообразования, отнесенное к единице поверхности нагрева, определяется по формуле:

$$\bar{n} = \left[\frac{\bar{M}}{F} \right] \cdot \frac{[\bar{\tau}_p + \bar{\tau}_0]}{\bar{\tau}_p}.$$

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 $\pm 20\%$.

Расчет.

Система охлаждения показана на рисунке 6: 1 – диафрагма, 2 – лопатка, 3 – глухие каналы, 4 – каналы охлаждения в диафрагме, 5 – конденсатор, 6 – охладитель (пар), 7 – тело диафрагмы, 8 – фитиль.



Рисинок – 6 – Охлаждение сопел фитилем

Для расчета принимаем $P_n = 100$ бар, температура насыщения $t_n = 311.97$ °С. Выберем температуру стенки испарителя:

$$t_{\text{ст.исп.}} = (5 \dots 10) + t_n = 5 + 311.97 = 316.9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Тепловой поток $q_n = 105$ Вт/м², тогда коэффициент теплообмена в испарителе:

$$a_n = \frac{q_n}{t_{\text{ст.исп.}} - t_n} = 20000, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}.$$

Число Стэнтона:

$$St_u \cdot Pr_{\text{ж}}^{0.6} \cdot N_{\Phi}^{0.44} \cdot \left(\frac{F_u}{\varepsilon \cdot F_{\Phi}}\right)^{1.16} = 3.3 \cdot \left(\frac{b_r}{b_{\text{опт}}}\right)^n \cdot \left(\frac{l_n}{b_r}\right)^n \cdot N_P^{0.23} \cdot Re_n^{-0.9},$$

где $St_u = \frac{\bar{a}_u}{\bar{G}_{\text{ж}} \cdot c_{\text{рж}}}$. Удельный расход жидкости:

$$\overline{G_{\text{ж}}} = \rho_{\text{ж}} \cdot \overline{W_{\text{ж}}} = \frac{q_{\text{н}} \cdot F_{\text{н}}}{\varepsilon \cdot r \cdot F_{\Phi}} = \frac{100000 \cdot 0.126}{0.7 \cdot 1309400 \cdot 0.0000612} = 223.8, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с});$$

$$F_u = \pi \cdot d_u \cdot l_u = 3.14 \cdot 0.04 \cdot 1 = 0.126, \text{ м}^2,$$

где $l_u = 1 \text{ м}$, $\varepsilon = 0.7$;

$$F_{\Phi} = \pi \cdot d_{\text{вн}} \cdot \delta_{\Phi} = 3.14 \cdot 0.026 \cdot 0.00075 = 0.0000613, \text{ м}^2;$$

$$d_{\text{вн}} = d_{\text{н}} - 2\delta_{\text{ст}} = 0.028 - 2 \cdot 0.001 = 0.026, \text{ м},$$

где $\delta_{\text{ст}} = 1 \times 10^{-3} \text{ м}$;

$$Pr_{\text{ж}} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{\alpha_{\text{ж}}} = \frac{0.1183 \cdot 10^{-6}}{0.1213 \cdot 10^{-6}} = 0.975;$$

$$N_{\Phi} = \frac{b_{\Gamma}^2}{k} = \frac{(0.15 \cdot 10^{-3})^2}{1.5 \cdot 10^{-10}} = 150,$$

где $b_{\Gamma} = 0.15 \times 10^{-3} \text{ м}$; $k = 1.5 \times 10^{-10} \text{ м}^2$; $b_{\text{опт}} = 0.14 \times 10^{-3} \text{ м}$; $n = 4.25$ ($b_{\Gamma} < b_{\text{опт}}$);
 $n = -0.43$ ($b_{\Gamma} > b_{\text{опт}}$);

$$N_p = \frac{2\sigma}{p_{\text{н}} \cdot b_{\Gamma}} = \frac{2 \cdot 0.011647}{10132500 \cdot 0.15 \cdot 10^{-3}} = 1.53 \cdot 10^{-5};$$

$$\overline{W_n} = \frac{q_{\text{н}}}{r \cdot \rho_n} = \frac{100000}{1309400 \cdot 680.41} = 0.000112, \text{ м/с};$$

$$Re_n = \frac{2b_{\Gamma} \cdot W_n}{\nu_{\text{н}}} = \frac{2 \cdot (0.15 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.000112}{0.000000348} = 0.097.$$

Далее, по найденным значениям из критериального уравнения определяем число Стэнтона:

$$St_u = \frac{3.3 \cdot 1 \cdot \left(\frac{1}{0.15 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.75} \cdot (1.53 \cdot 10^{-5})^{0.23} \cdot 0.097^{-0.9}}{0.975^{0.6} \cdot 150^{0.44} \cdot \left(\frac{0.1256}{0.7 \cdot 0.0000612} \right)^{1.16}} = 0.0166.$$

Коэффициента теплообмена из числа St_u (Вт/(м²К)):

$$\alpha_u = St_n \cdot G_{\text{ж}} \cdot c_{p\text{ж}} = 0.0166 \cdot 223.8 \cdot 6273.2 = 23284.6.$$

Расхождение коэффициента теплообмена с принятой величиной составляет 16.42 %. Уточняем тст.исп.:

$$t_{\text{ст.и}} = \frac{q_u}{\alpha_u} + t_{\text{п}} = \frac{100000}{23284.64} + 311.9 = 316.3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Расчет зоны конденсации.

Теплофизические свойства жидкости определяем по:

$$\bar{t}_{\text{ж.к.}} = \frac{t_{\text{ст.и}} + t_{\text{п}}}{2} = \frac{316.3 + 311.9}{2} = 314.1, \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

При расчете зоны конденсации за основу берем критериальное уравнение (Шелгинский А.Я.) [10]:

$$St_{\text{к}} \cdot Pr_{\text{ж}}^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{F_{\text{п}}}{k \cdot F_{\text{ф}}}\right)^{0.59} \cdot \left(\frac{F_{\text{к}}}{\varepsilon \cdot F_{\text{ф}}}\right)^{1.17} = C \cdot \tilde{N}_{\text{p}}^n \cdot \text{Ки}^{0.4} \cdot Re_R^{-0.9},$$

$$\text{где } St_{\text{к}} = \frac{\bar{\alpha}_{\text{к}}}{\bar{G}_{\text{ж}} \cdot c_{\text{рж}}};$$

$$\bar{\alpha}_{\text{к}} = \frac{q_{\text{к}}}{t_{\text{п}} - t_{\text{ст.к}}} = \frac{142857.14}{311.9 - 301.9} = 14285.7, \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

$$F_{\text{п}} = \pi \cdot R_{\text{н}}^2 = 3.14 \cdot 0.0123^2 = 0.00047, \text{ м}^2;$$

$$R_{\text{н}} = R_{\text{вн}} - \delta_{\text{ф}} = 0.013 - 0.00075 = 0.0123, \text{ м};$$

$$F_{\text{к}} = \pi \cdot d_{\text{н}} \cdot l_{\text{к}} = 3.14 \cdot 0.04 \cdot 1 = 0.0879, \text{ м}^2;$$

$$q_{\text{к}} = \frac{q_{\text{п}} \cdot F_{\text{п}}}{F_{\text{к}}} = \frac{100000 \cdot 0.126}{0.0879} = 142857.1, \text{ Вт/м}^2\text{К};$$

$$\tilde{N}_{\text{p}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot R_{\text{п}}}{\sigma} = \frac{10132500 \cdot 0.0123}{0.0112} = 11116167.4.$$

Для $\tilde{N}_{\text{p}} > 1000$ $n = 0.48$; $c = 3 \times 5 \times 10^3$. Критерий Кирпичева:

$$\text{Ки} = \frac{r}{c_{\text{рж}}(t_{\text{п}} - t_{\text{ст.к}})} = \frac{1291100}{6257.7 \cdot 10} = 20.6;$$

$$Re_n = \frac{R_n \cdot W_u}{v_n} = \frac{0.0123 \cdot 0.000112}{0.00000035} = 3.9.$$

Далее, по найденным значениям из критериального уравнения определяем число Стэнтона:

$$St_k = \frac{3500 \cdot 11116167.38^{0.48} \cdot 20.63^{0.4} \cdot 3.92^{-0.9}}{0.973^{-1/3} \cdot \left(\frac{0.000471^2}{1.5 \cdot 10^{-10} \cdot 0.0000612}\right)^{0.59} \cdot \left(\frac{0.088}{0.0000612 \cdot 0.7}\right)^{1.17}} = 0.048.$$

$$a_k = St_k \cdot G_{ж} \cdot c_{pж} = 0.048 \cdot 223.8 \cdot 6257.7 = 67337.9, \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Расхождение a_k составляет 3.7%. Уточняем $t_{\text{ст.кп}}$:

$$t_{\text{ст.к}} = \frac{q_k}{a_k} + t_{\text{п}} = \frac{142857.1}{67337.9} + 311.97 = 314.1, ^\circ\text{C}.$$

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

Результаты и обсуждение.

Рассматривая вопрос пузырьковых потоков в современной литературе [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10] как эффективная форма обсуждения исследования (в разделе «Расчет») особое внимание можно уделить интеграции каналов с кипящей жидкостью внутри полых лопаток с применением капиллярно-пористых структур [7], тепловых труб [2] и открытых двухфазных систем теплоотвода. Эти технологии активно развиваются в смежных областях – в первую очередь в ракетных, авиационных и газотурбинных двигателях, и теперь они постепенно адаптируются к условиям паровых турбин нового поколения, на стационарных стационарных турбинах ТЭС и АЭС.

В разделе «Расчет» авторами предложена замкнутая испарительно-конденсационная система охлаждения сопловых лопаток (рис. 6). Пример расчета является важной формой обсуждения проведенного исследования, оно система применяется при проектировании турбин, работающих на параметрах выше стандартных сверхкритических (температура пара больше $570 ^\circ\text{C}$), например $600 ^\circ\text{C}$ и давлении 300 бар. Полученные данные в ходе эксперимента, расчета и результатов подтверждают высокую эффективность испарительно-конденсационной системы охлаждения, реализованной с применением капиллярно-пористых структур.

На рисунке 7 представлены кинограммы процессов тепло – и массопереноса: а) фитиль 0.14×0.4; б) фитиль 0.4; $q = 40 \div 120 \text{ кВт/м}^2$; в) и г) фитиль 0.4 в увеличенном виде; $q = 94 \text{ кВт/м}^2$; $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = 14$; $n = 0.14$.

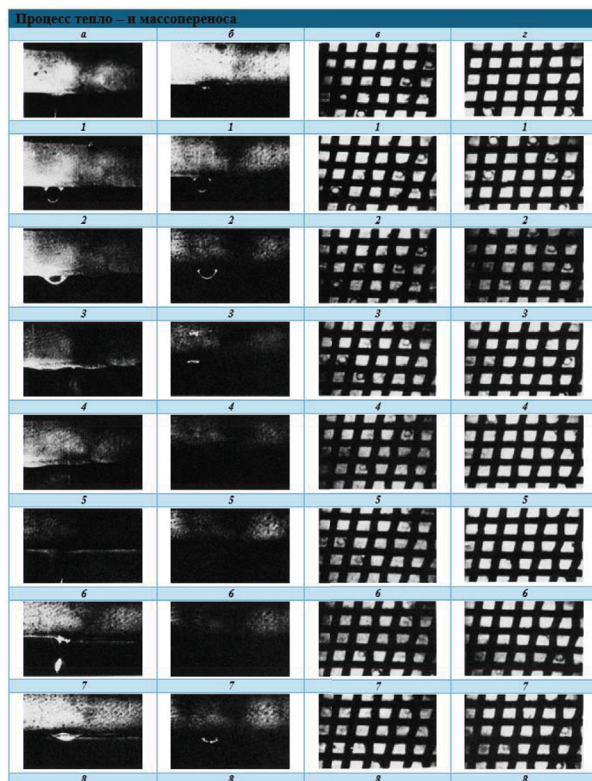


Рисунок – 7 – Кинограммы процессов тепло – и массопереноса:
а) выброс охладителя; б) динамика пузырей в структуре 0.4.

На рисунке 8 представлен фрагмент из кинограммы (столбец «а» рис. 7) в увеличенном виде. Анализ фазовых превращений на поверхности теплообменных элементов указывает на ключевую роль процессов спонтанного зарождения, роста и разрушения паровых пузырей в общей тепловой динамике (см. рис. 7). Кратковременные, но мощные взрывные явления, происходящие в масштабе микросекунд (см. рис. 8, 9), могут не только усиливать теплообмен, но и вызывать кумулятивные и кавитационные

эффекты, способствующие ускоренному разрушению материала в области активных центров генерации.

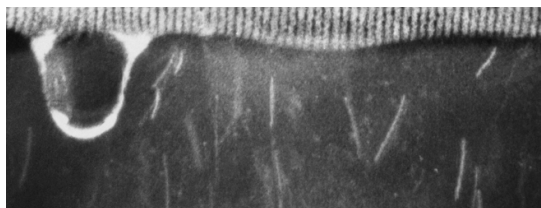


Рисунок – 8 – Фрагмент из кинограммы, рис. 7

На рисунке 9 представлен фрагмент из кинограммы (столбец «г» рис. 7) в увеличенном виде.

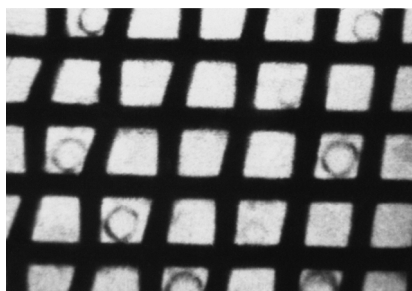


Рисунок – 9 – Фрагмент из кинограммы, рис. 7

На рис. 10 приводится явление выброса капель жидкости из капиллярно-пористой структуры виды 0.14×0.4 для тепловой нагрузки $q = 94 \times 10^3 \text{ Вт/м}^2$; избытка жидкости по отношению к расходу пара $\tilde{m} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{п}}} = 1.1$.

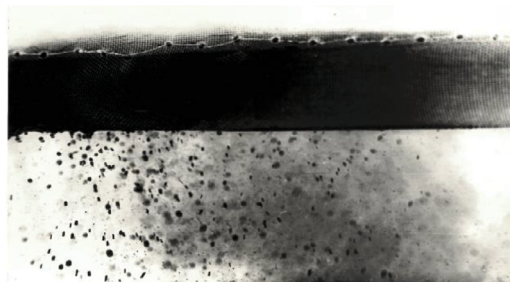


Рисунок – 10 – Явление выброса капель жидкости из паровой структуры

В частности, рост паровых пузырей в пористой структуре на стенке (см. рис. 7–10) сопровождается локальными изменениями давления, что создает предпосылки для кавитационного разрушения [2; 5; 6] и формирования микротрещин [7]. В работе [7] авторы рассмотрели предысторию образования микротрещин в теплоэнергетическом оборудовании. Сопутствующие процессы – электрохимическая коррозия и тепловые удары – усугубляют деградацию материала, особенно в условиях пуска и останова турбомашин.

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

Предложенная авторами модель охлаждающей системы, основанная на капиллярной подаче теплоносителя в замкнутом контуре с зонами испарения и конденсации (см. рис. 6), представляет собой перспективное направление для паровых турбинных установок нового поколения. Применение структур с подобранным гидравлическим диаметром (0.15×10^{-3} м) и толщиной сетчатого слоя (0.75×10^{-3} м) обеспечивает необходимую 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, эффективной при прогнозировании срока службы паротурбинного оборудования на тепловых электростанциях на органическом топливе, и особенно на атомных электростанциях.

Кинограммы и голографические интерферограммы выявили динамику процессов тепломассопереноса от самых различных факторов: вид капиллярно-пористой структуры, тепловых нагрузок, избытка охладителя с расчетом плотности центров генерации и выбросов капель жидкости из структуры с образованием каверны [7] за счет эрозии от струйного потока (см. рис. 11).

Подбор избытка жидкости существенно снизит выброс капель, опасных для возникновения процессов кавитации (см. рис. 10).

Имитация аварийной ситуации за счет уменьшения вплоть до создания приводит к условиям кризиса кипения с образованием каверны [7]. Такой прием научного исследования может быть зарегистрирован только с помощью интерферограмм (см. рис. 11).

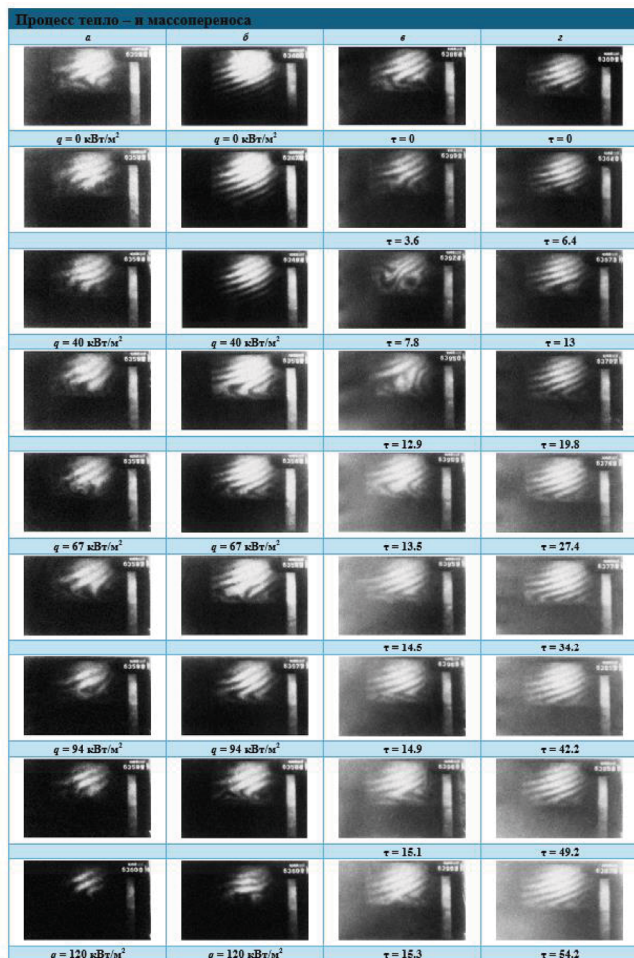


Рисунок – 11 – Голографические интерферограммы процессов тепло и массопереноса структуры типа 0.4

Выводы

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 , $\tilde{m} = m_{\text{ж}}/m_{\text{п}}$, τ , \bar{n}).

Разработано охлаждение сопел паровых турбин для нестандартных критических параметров. Анализ фазовых превращений на поверхности теплообмена показывает 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.

Данные исследования построены на оптических методах, эффективных при прогнозировании срока службы оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Piwowski, M., Kosowski, K.; Richert, M.** Organic Supercritical Thermodynamic Cycles with Isothermal Turbine // *Energies* 16. – 4745. – (2023). – <https://doi.org/10.3390/en16124745>

2 **Qingye, Li.** Numerical and experimental analysis of the cavitation characteristics of orifice plates under high-pressure conditions based on a modified cavitation model // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 203. – 123782. – (2023). – <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123782>

3 **Kan, Kan.** Fluid deformation induced energy loss of pump-turbines based on the transport of mean kinetic energy // *Renewable Energy* 248. – 122998. – (2025). – <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122998>

4 **Popov, A. V., Kulakov, E. N., Kruglikov, P. A.** Determining the Optimum Pressure Differential Across the Control Valve of a Hydroturbine Driven Pump // *Therm. Eng.* 71. – 118–124. – (2024). – <https://doi.org/10.1134/S0040601524020071>

5 **Di, Ao.** A Review of Cavitation Problems of Cryogenic Fluids in Gathering Pipelines // *Journal of Pipeline Science and Engineering Available*. – 100269 (2025). – <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2025.100269>

6 **Sedlář, M., Koutný, A., Krátký, T., Komárek, M., Fulín, M.** Assessment of Cavitation Erosion Using Combined Numerical and Experimental Approach // *Fluids* 9, 259 (2024). <https://doi.org/10.3390/fluids9110259>

7 **Genbach, A. A., et. al.** Boiling crisis in porous structures // *Energy* 259, 125076 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125076>

8 **Ge, M., Zhang, G., Zhang, X.** Recent Developments and Future Directions in Flow Visualization: Experiments and Techniques // *Fluids* 10. – 23 (2025). – <https://doi.org/10.3390/fluids10020023>

9 **Litvintsova, Y. E., et. al.** Diagnostics of Transient Heat-Transfer Regimes during Pool Boiling Based on Wavelet Transform of Temperature Fluctuations // *Therm Eng.* 70. – 875–884. – (2023). – <https://doi.org/10.1134/S0040601523110101>

10 Volkov, A. V., Malenkov, A. S., Shelginsky, A. Ia. Resource-Saving System of Heat and Cold Supply in Power Complex of the Metallurgical Plant // In Solid State Phenomena 284. – 1398–1403. – (2018). – <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.284.1398>

Поступило в редакцию 21.05.25.

Поступило с исправлениями 21.05.25.

Принято в печать 08.09.25.

А. А. Генбач¹, *Д. Ю. Бондарцев²

^{1,2}Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

21.05.25 ж. баспаға түсті.

21.05.25 ж. түзетулерімен түсті.

08.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ПЕРСПЕКТИВАЛЫ БУ ТУРБИНАЛАРЫНЫҢ ҚАЛАҚТАРЫН ҚАЙНАҒАН СҰЙЫҚТЫҚТАРМЕН САЛҚЫНДАТУ

Стандартты суперкритикалық температуралар мен қысымдардан жоғары жұмыс істейтін перспективалы бу турбиналарын қайнаған салқындатқышпен салқындату әзірленді және зерттелді. Жылу құбырының схемасы бойынша жұмыс істейтін жүйе зерттеліп, капиллярлық потенциалға масса қосылды. Булану және конденсация бөліктерін есептеу жүргізілді. Бу және сұйық фазалардың даму динамикасын зерттеудің оптикалық әдістеріне арналған қондырғылар жасалды. Оптикалық әдістерді қолдана отырып, капиллярлық-кеуекті құрылымдағы өсу және ыдырау процестерінің динамикасы қарастырылады. Әр түрлі фитильдерге арналған жылу беру процестерінің кинограммалары мен голографиялық интерферограммалары, жылу жүктемелері, қайнаудың ішкі сипаттамаларын есептей отырып, артық сұйықтық, құрылымнан сұйықтық тамшыларын шығару. Бу эмбрионының пайда болуындағы жалпы энергияны бөлу мүмкіндігі эрозия мен кавитациямен күресудің маңызды міндеті болып табылады. Салқындатқыштың шығынын оның минималды мәніне дейін төмендету арқылы төтенше жағдайға еліктеу көрсетілген. Таңдалған гидравликалық диаметрі (0.15×10^{-3} м) және торлы қабаттың қалыңдығы (0.75×10^{-3} м) бар құрылымдарды қолдану ең аз ағынға төзімділікпен қажетті жылу тарату қарқындылығын

қамтамасыз етеді. Ұсынылған технология әсіресе аустенит класындағы қымбат ыстыққа төзімді қорытпаларды ауыстыру үшін тартымды, шығындарды азайтады және жабдықтың сенімділігі мен қызмет ету мерзімін жақсартады.

Кілтті сөздер: көпіршікті ағындар, кавитация, салқындату жүйесі, диафрагма, саптамалар, кеуекті орта, голография, жылдамдық түсірілімі.

A. A. Genbach¹, *D. Yu. Bondartsev²

^{1,2}Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
named after G. Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 21.05.25.

Received in revised form 21.05.25.

Accepted for publication 08.09.25.

COOLING OF ADVANCED STEAM TURBINE BLADES WITH BOILING LIQUIDS

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 investigating the dynamics of vapor and liquid phases development are developed. The dynamics of growth and fracture processes in capillary-porous structure by means of optical methods is considered. Kinograms and holographic interferograms of heat transfer processes for different wicks, thermal loads, liquid excess with calculation of internal characteristics of boiling, 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. The use of structures with a selected hydraulic diameter (0.15×10^{-3} m) and mesh layer thickness (0.75×10^{-3} m) provides the required heat dissipation intensity with minimal flow resistance. The proposed technology is particularly attractive for replacement of expensive austenitic class heat-resistant alloys, reducing the cost and increasing the reliability and maintainability of the equipment.

Keywords: bubble flows, cavitation, cooling system, diaphragm, nozzle blades, porous medium, holography, high-speed filming.

Теруге 09.09.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4447

Сдано в набор 09.09.2025 г. Подписано в печать 30.09.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4447

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

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

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

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

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz