

вид экономической деятельности, но и как фактор, воздействующий на окружающую среду.

Для определения жизнеспособности микроводорослей в научно-производственном центре возобновляемых источников энергии в Государственном энергетическом институте в питательной среде на основе дренажных вод проводится эксперимент в лабораторных условиях. Экспериментально доказано, что окислительно-восстановительный потенциал суспензии микроводорослей уменьшается, когда синтезируются биологически ценные вещества за счет загрязняющих веществ, содержащихся в составе дренажных вод. На измеряемые параметры влияет численность микроорганизмов дренажной воды и концентрация в ней их метаболитов. При росте и размножении в питательной среде на основе дренажной воды микроорганизмы продуцируют высоко заряженные ионные метаболиты, что приводит к изменению электрохимических свойств питательной среды.

Таким образом, практическая значимость производства биомассы микроводорослей представляет собой утилизацию дренажных вод, сформированных на орошаемых полях, и трансформацию возобновляемой энергии с целью получения энергетического сырья.

УДК 621.175

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ

Т. А. Заворохин, Э. Р. Зайнуллина, В. Ю. Митяков

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Российская Федерация*

Исследование посвящено изучению теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе. Эксперименты выполнены при массовом расходе пара 2,8 г/с и расходе охлаждающей воды, варьируемом в диапазоне 80–200 г/с. Местная плотность теплового потока измерена градиентными датчиками теплового потока и рассчитана по показаниям термопар. Сопоставление результатов подтверждает высокое быстрое действие, информативность и точность теплотрии по сравнению с термометрией. Распределение местной плотности теплового потока по периметру оценено в трех сечениях по длине трубы в диапазоне полярного угла $\varphi = 0-180^\circ$ с шагом в 15° . Результаты эксперимента позволили оценить область скопления конденсата в нижней части трубы (в диапазоне $\varphi = 135-180^\circ$) без использования визуализации и предложить методы интенсификации теплообмена и повышения энергоэффективности оборудования.

Ключевые слова: теплообмен при конденсации, насыщенный водяной пар, горизонтальная труба, плотность теплового потока, энергоэффективность теплообменников.

HEAT TRANSFER DURING WATER STEAM CONDENSATION ON A HORIZONTAL PIPE

T. A. Zavorokhin, E. R. Zainullina, V. Yu. Mityakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russian Federation

The investigation is focused on the heat transfer during water steam condensation on a horizontal pipe. Experiments were carried out with a steam mass flow rate of about 2.8 g/s and a cooling water flow rate that varied in the range of 80–200 g/s. The local heat flux per unit area was measured using gradient heat flux sensors and calculated using thermocouple readings. The comparison of results indicates that heatmetry is more efficient, informative, and accurate than ther-

mometry. The distribution of local heat flux per unit area along the pipe perimeter was estimated in three cross-sections in the range of the polar angle $\varphi = 0-180$ with a step of 15. The results of the experiment allowed us to evaluate the condensate accumulation area in the lower part of the pipe ($\varphi = 135-180^\circ$) without using visualization and to propose methods of heat transfer intensification and improving the equipment efficiency.

Keywords: condensation heat transfer, water steam, horizontal pipe, heat flux per unit area, equipment efficiency.

Повышение энергоэффективности и экологичности оборудования ТЭС и АЭС является одной из приоритетных задач для развития энергетики. В частности, совершенствование конструкций и интенсификация теплообмена в теплоотводящем оборудовании позволит снизить расход топлива, негативное влияние на окружающую среду, стоимость вырабатываемой энергии и т. п. Результаты исследований по изучению поверхностной конденсации пара [1–3] позволят разрабатывать и создавать новые конструкции теплообменников, обладающих меньшими массогабаритными показателями. Для действующих аппаратов применяются современные методы диагностики их состояния [4, 5], определяющие наличие коррозионного износа, протечек или загрязнения теплообменной поверхности.

Настоящее исследование посвящено измерению местной плотности теплового потока (ПТП) при конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе с помощью градиентной теплотрии и термометрии. Эксперименты выполнены на стенде (рис. 1, а), измерительный участок которого включает три трубы из нержавеющей стали наружным диаметром 20 мм, толщиной стенки 2 мм, расположенные рядом с относительным шагом $s/d = 1,67$. Трубы зафиксированы резиновыми заглушками в стеклянном кожухе с внутренним диаметром 110 мм. Длина теплообменной поверхности составляет 450 мм. Насыщенный водяной пар с расходом 2,8 г/с подавался в межтрубное пространство по двум паропроводам, охлаждающая вода с температурой 20 °С и расходом, варьируемым в диапазоне 80–200 г/с, подводилась в центральную трубу, конденсат отводился в конденсатосборник.

Прямое измерение местной ПТП выполнено градиентными датчиками теплового потока (ГДТП) из монокристаллического висмута (размерами $2,9 \times 6 \times 0,3$ мм), установленными заподлицо с наружной поверхностью трубы. Значение местной ПТП также рассчитано по показаниям термопар типа L, установленных диаметрально противоположно месту установки ГДТП на внутренней и наружной поверхности трубы. Первичные преобразователи монтированы в трех сечениях по длине центральной охлаждаемой трубы (рис. 1, б).

При конденсации пара на горизонтальной трубе распределение местной ПТП меняется по окружности. Поэтому стенд предусматривает возможность поворота центральной трубы вокруг оси в диапазоне полярного угла $\varphi = 0-180^\circ$ с шагом в 15° , что обеспечивает измерение распределения местной ПТП минимальным числом первичных преобразователей.

Результаты измерений подтвердили высокую информативность ГДТП, связанную с их низкой постоянной времени (около 10 нс), что позволило оценить изменение ПТП во времени – временная теплограмма. Полученные результаты подтверждают существенную нестационарность теплообмена при конденсации. В качестве примера на рис. 2, а приведена временная теплограмма для нижней образующей трубы при $\varphi = 180^\circ$, построенная по показаниям ГДТП во втором сечении при расходе охлаждающей воды около 200 г/с. Пульсации местной ПТП обусловлены отрывом конденсата, скопившегося на нижней части трубы.

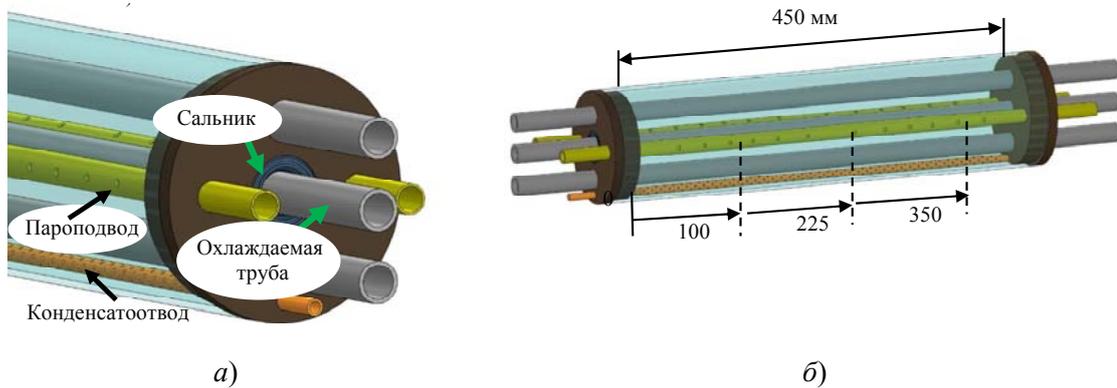


Рис. 1. Экспериментальная установка:
 а – конструкция; б – расположение измерительных сечений

По показаниям ГДТП и термопар построены распределения местной ПТП по окружности трубы при расходе охлаждающей воды около 200 г/с – угловые теплограммы (рис. 2, б). Расчетной местной ПТП по показаниям термопар, выполненный по уравнению стационарной теплопроводности, указывает на практически равномерное распределение ПТП по окружности трубы (рис. 2 б, черная кривая). Угловая теплограмма, построенная по показаниям ГДТП, указывает на снижение местной ПТП в диапазоне полярного угла $\varphi = 135\text{--}180^\circ$, связанное с образованием поддонной зоны. Следовательно, для повышения среднего коэффициента теплоотдачи при конденсации поверхностные интенсификаторы (ребра, лунки и т. п.) следует устанавливать в указанной области.

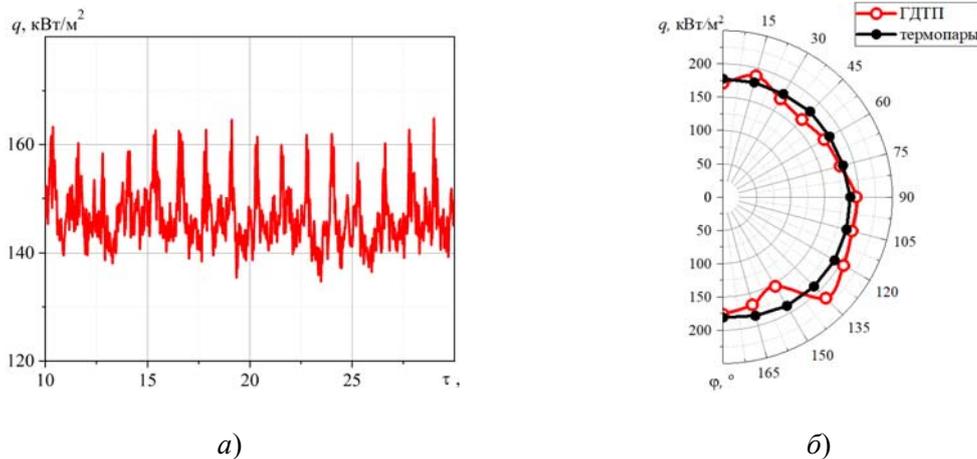


Рис. 2. Результаты эксперимента:
 а – временная теплограмма при конденсации на нижней образующей трубы;
 б – угловые теплограммы (красная кривая – теплометрия;
 черная кривая – расчет по показаниям термопар)

Относительная стандартная неопределенность измерения местной ПТП с помощью ГДТП составляет 8 %, относительная неопределенность расчета по показаниям термопар – около 15 %.

Изучен теплообмен при поверхностной конденсации насыщенного водяного пара на горизонтальной трубе с применением средств градиентной теплотометрии и термометрии. Подтверждена высокая информативность, точность и применимость ГДТП в качестве первичного преобразователя для систем мониторинга состояния теплообменного оборудования ТЭС и АЭС. Результаты исследования позволили выявить область снижения местной ПТП, вызванную скоплением конденсата, без применения визуализации, что позволяет определить эффективные и экономичные методы интенсификации теплообмена при конденсации.

Литература

1. Шарифуллин В. Н. Оценка величины коррозии в пароконденсатных теплообменниках / В. Н. Шарифуллин, А. В. Шарифуллин, А. Я. Латыпова // Известия вузов. Проблемы энергетика. – 2013. – № 1–2.
2. Разработка и апробация элементов системы мониторинга состояния и диагностики конденсатора паровой турбины / С. И. Хае, К. Э. Аронсон, Ю. М. Бродов, А. Г. Шемпелев // Теплоэнергетика. – 2003. – № 7. – С. 67–69.
3. Шарифуллин В. Н. Алгоритмы диагностики неполадок теплообменных аппаратов паротурбинных установок / В. Н. Шарифуллин, А. В. Шарифуллин, И. Ф. Гатауллин // Вестник КГЭУ. – 2012. – № 1 (12).
4. Исследование пульсаций местной плотности теплового потока при конденсации на трубе с гидрофобным покрытием / Ю. А. Кузма-Кичта, А. В. Лавриков, Н. С. Иванов, Д. В. Горбачев // Тепловые процессы в технике. – 2023. – Т. 15, № 9. – С. 402–409.
5. Sapozhnikov S. Z. Gradient heatmetry advances / S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. V. Mityakov [et al.] // Energies. – 2020. – Vol. 13, N 23. – P. 6194.

УДК 536.24

ПОВЫШЕНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИЛИНДРА С ПОМОЩЬЮ СТЕРЖНЕЙ-ТУРБУЛИЗАТОРОВ

С. А. Князев, В. В. Сероштанов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Российская Федерация*

Исследовано влияние стержней-турбулизаторов на течение и теплообмен одиночного цилиндра кругового сечения. Два стержня располагались вдоль образующей цилиндра и симметрично разносились относительно лобовой точки на угол ψ . Методом градиентной теплотометрии получены распределения местного коэффициента теплоотдачи на поверхности цилиндра в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 4800-30000$. С помощью цифровой трассерной визуализации (PIV) определены компоненты скорости вблизи цилиндра с турбулизаторами в следе за ним. Показано влияние диаметра турбулизаторов и угла ψ на структуру течения в следе за цилиндром, коэффициент сопротивления и среднее по поверхности число Нуссельта.

Ключевые слова: градиентная теплотометрия, обтекание цилиндра, местное число Нуссельта, интенсификация теплообмена.

THERMAL EFFICIENCY UPGRADING OF CYLINDER WITH TURBULATOR-RODS

S. A. Knyazev, V. V. Seroshtanov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Russian Federation

The impact of turbulator-rods on the flow and heat transfer at a single circular cylinder has been investigated. The two rods on the cylinder's generator were placed and mounted symmetrically.