

03

Исследование теплообмена при конденсации на поверхностях труб методом градиентной теплотметрии

© С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, А.Ю. Бабич, Э.Р. Зайнуллина[¶]

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

[¶] E-mail: zaynullinaelza@gmail.com

Поступило в Редакцию 19 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 20 декабря 2018 г.

Принято к публикации 28 декабря 2018 г.

Теплообмен при конденсации впервые изучен с помощью градиентной теплотметрии. Применимость нового метода проверена на модели хорошо изученного объекта — круглой трубы. Экспериментальное исследование включало изучение теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной и внутренней поверхностях трубы. Выявлена высокая информативность градиентной теплотметрии, открывающая новые возможности для исследований в области теплообмена при фазовых превращениях.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.07.47529.17600

Изучение теплообмена при конденсации важно для улучшения технико-экономических параметров ТЭС, повышения безопасности АЭС, совершенствования конденсаторов энергетических и холодильных установок, внедрения новых рабочих тел и др. К настоящему моменту сформировалась обширная база экспериментальных исследований теплообмена при конденсации, большинство из которых выполняется посредством термотметрии [1–4]. Эти эксперименты не обеспечивают требуемой достоверности результатов, поскольку термотметрия позволяет рассчитывать лишь осредненные по времени значения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи. Такой подход не позволяет описать нестационарность теплообмена, формирование волн на конденсаторной пленке и пр. В настоящей работе предложен новый метод исследования теплообмена при конденсации — градиентная теплотметрия, основанная на применении градиентных датчиков потока (ГДТП) [5]. ГДТП представляют собой тонкие пластинки с анизотропией электро- и теплофизических свойств. При прохождении теплового потока через ГДТП возникает термоэдс, обусловленная поперечным эффектом Зеебека и пропорциональная плотности теплового потока и площади датчика. Уникально малая постоянная времени ГДТП (10^{-8} – 10^{-9} с) позволяет считать их практически безынерционным средством измерения и дает возможность отслеживать колебательные процессы при конденсации. В опытах применялись гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГДТП), выполненные на основе композиции сталь 12X18H9T + никель, с вольт-ваттной чувствительностью 0.008 мВ/Вт. Поскольку чувствительность ГДТП зависит от температуры, датчики подключались по трехпроводной схеме: по медным проводам передавался сигнал ГДТП, а пара медь–константан фиксировала текущую температуру датчика в ходе опыта.

Сигнал ГДТП, пропорциональный тепловому потоку, получается в ходе прямого измерения, поэтому важно убедиться в его достоверности. Мы использовали подход и терминологию действующего в Российской Федерации ГОСТ 34100.1–2017, согласно которому понятие ошибки измерения заменено существенно иным понятием неопределенности. Неопределенность теплотметрии оценивалась в ходе градуировки на специально созданном стенде. Неопределенность оценки коэффициентов теплоотдачи зависела от методики опытов и расчетов; она заведомо выше, чем для теплотметрии.

В качестве объекта исследования выбрана круглая труба, теплообмен при конденсации на поверхностях которой хорошо изучен как теоретически, так и экспе-

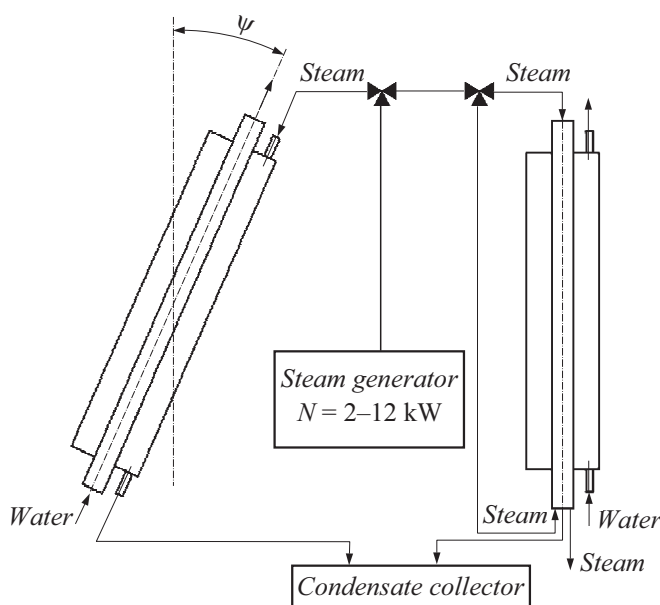


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

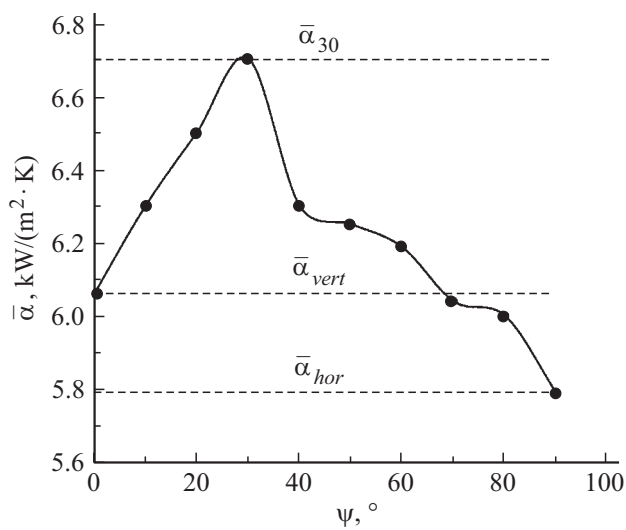


Рис. 2. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$ от наклона трубы. $\bar{\alpha}_{30}$ — наклон на угол $\psi = 30^\circ$ от вертикали, $\bar{\alpha}_{vert}$ — без наклона, $\bar{\alpha}_{hor}$ — в горизонтальном положении.

риментально. Исследован теплообмен при конденсации на внешней и внутренней поверхностях трубы.

На рис. 1 представлена схема эксперимента. При изучении теплообмена на наружной поверхности трубы, выполненной из нержавеющей стали (длина трубы $h = 1200$ мм, наружный диаметр $d_1 = 20$ мм, толщина стенки $\delta = 2.5$ мм), среды двигались в противотоке: водопроводная вода подавалась внутрь металлической трубы при температуре $t_{H_2O} = 22^\circ\text{C}$, насыщенный водяной пар с температурой насыщения, близкой к 100°C , — в соосный с трубой кожух. Датчики монтировались заподлицо с наружной поверхностью трубы.

Формула Нуссельта позволяет рассчитать средний коэффициент теплоотдачи при конденсации на вертикальной и горизонтальной трубах. Значения коэффициента теплоотдачи, полученные в эксперименте, отличаются от рассчитанных по формуле Нуссельта на 2–5%, что подтверждает применимость градиентной теплотрии для исследования теплообмена при конденсации.

Известно [6,7], что отклонение трубы от вертикали интенсифицирует теплообмен на ее наружной поверхности. Возможность интенсифицировать теплообмен отклонением трубы проверена в серии опытов, где трубу удалось как наклонять, так и поворачивать вокруг собственной оси, получая распределение плотности теплового потока по периметру.

Исследования показали, что при отклонении трубы от вертикали на угол $\psi = 30^\circ$ коэффициент теплоотдачи максимален и превышает значения, полученные на вертикальной трубе, на 10.5% (рис. 2). При отклонении трубы от вертикали на 10 – 60° средний коэффициент теплоотдачи также выше, чем для вертикальной трубы. Относительная неопределенность измеренной плотности теплового потока не превысила 9%, а рассчитанного коэффициента теплоотдачи — 12%.

При исследовании конденсации на внутренней поверхности трубы рабочий участок состоял из двух коаксиальных труб: внутренняя выполнена из нержавеющей стали ($h = 1200$ мм, $d_1 = 20$ мм, толщина стенки $\delta = 2.5$ мм), а наружная — из пластика. Пар с температурой насыщения, близкой к 100°C , подавался в металлическую трубу, а охлаждающая вода при температуре $t_{H_2O} = 22^\circ\text{C}$ — в межтрубное пространство. Регулировался расход пара и охлаждающей воды, менялись направления сред.

Как и в большинстве промышленных конденсаторов, пар подавался из парогенератора мощностью 12 кВт в трубу сверху, а охлаждающая вода в межтрубное пространство — снизу. Отличие полученных в эксперименте коэффициентов теплоотдачи от рассчитанных по формуле Нуссельта не превышало 7%.

Исследовано противо- и сонаправленное движение пара и охлаждающей воды. В качестве примера на рис. 3 представлены временные теплограммы, полученные при сонаправленном движении сред и мощности парогенератора 7 кВт. В этих опытах попеременно устанавливались режим обратной конденсации и пробочный режим. При пробочном режиме ($\tau \approx 200$ – 400 с) плотность теплового потока на первом от верхней кромки ГДТП минимальна: пробка блокировала поступление пара в верхнюю часть трубы. При движении пробки вверх

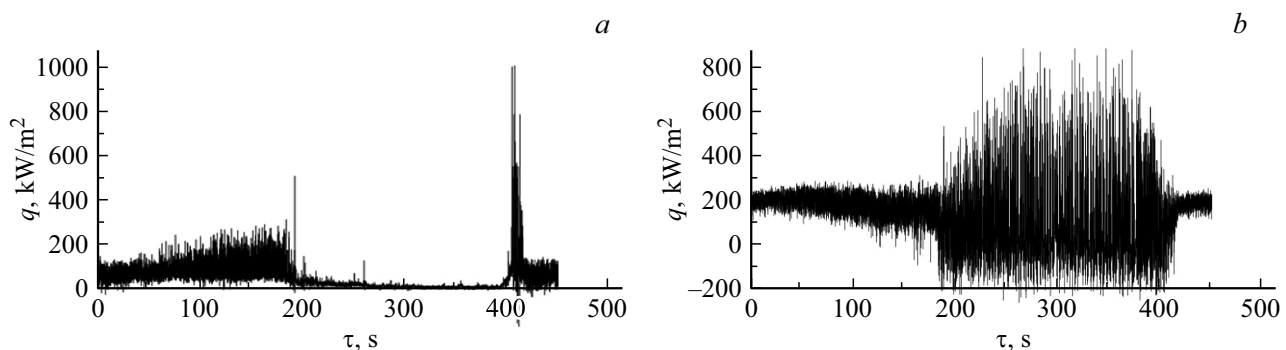


Рис. 3. Временные теплограммы при сонаправленном движении сред и мощности парогенератора 7 кВт: а — ГДТП № 1 ($x = 300$ мм — расстояние от верхней кромки), б — ГДТП № 4 ($x = 900$ мм).

ГДТП реагировали один за другим, что подтвердило их высокое быстродействие. После выброса пробки на некоторое время снова устанавливался режим обратной конденсации. Переход от режима к режиму сопровождался колебаниями пробки конденсата; скорость пробки достигала 2 м/с. Относительная неопределенность результатов составила 10,3%.

Таким образом, показана применимость градиентной теплотометрии на основе гетерогенных градиентных датчиков теплового потока для исследования теплообмена при конденсации. Результаты свидетельствуют о высокой информативности нового метода. Опыты позволили отследить смену режимов течения конденсатной пленки и определить оптимальный угол отклонения трубы от вертикали.

Применение градиентной теплотометрии для исследования теплообмена при конденсации на наружной поверхности трубы позволяет получить данные, необходимые для оптимизации теплообменников энергетических и холодильных установок: информация о расположении поддонной зоны позволит определить наилучшее место установки поверхностных интенсификаторов. Исследования теплообмена при конденсации на внутренней поверхности трубы и их результаты необходимы при предотвращении и ликвидации последствий ядерных и других техногенных аварий. Полученные результаты свидетельствуют о том, что уникальное быстродействие ГДТП позволяет применять их как средство мониторинга теплообмена при конденсации на АЭС и ТЭС, что повысит их безопасность.

Список литературы

- [1] *Kim S.J., No H.Ch.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2000. V. 43. P. 4031–4042.
- [2] *Lee K.-W., No H.Ch., Chu I.-Ch., Moon Y.M., Chun M.-H.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. V. 49. P. 1813–1819.
- [3] *Fan G., Tong P., Sun Z., Chen Y.* // Ann. Nucl. Energy. 2018. V. 113. P. 139–146.
- [4] *Hu H.W., Tang G.H., Niu D.* // Appl. Therm. Eng. 2016. V. 100. P. 699–707.
- [5] *Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.* Основы градиентной теплотометрии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 215 с.
- [6] *Nada S.A., Hussein M.S.* // Int. J. Therm. Sci. 2016. V. 100. P. 391–400.
- [7] *Lips S., Meyer J.P.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 395–404.