

03

## Экспериментальное исследование пленочного кипения недогретой воды методом градиентной теплотметрии

© С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, В.В. Субботина<sup>¶</sup>

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

<sup>¶</sup> E-mail: subbotina.vv@edu.spbstu.ru

Поступило в Редакцию 16 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 19 декабря 2018 г.

Принято к публикации 19 декабря 2018 г.

Предложено качественное описание процесса кипения недогретой жидкости, полученное при помощи метода градиентной теплотметрии. Разработанный метод позволил впервые измерить плотность теплового потока при пленочном кипении на торце цилиндра, погруженного в недогретую воду. Представлены кривые изменения плотности теплового потока во времени. Получена связь плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.06.47490.17594

Кипение недогретой жидкости на высокотемпературных поверхностях осуществляется во многих отраслях промышленности, преимущественно в энергетике и металлургии, а также в электронике. Во всех работах, представленных ранее, реализован косвенный анализ плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи (КТО), основанный на измерениях температуры, давления, толщины паровой пленки и на оптических методах [1–5]. Значения искомым величин получены из решения некорректной обратной задачи теплопроводности.

В экспериментах прикладной направленности традиционно используются нагретые образцы в форме цилиндра, при создании физических моделей [6] — в форме шара; в последнем случае снижаются концевые эффекты.

В настоящей работе задача впервые решается методом градиентной теплотметрии, развиваемым в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого [7]. Градиентная теплотметрия основана на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГДТП).

Метод позволяет напрямую измерить плотность теплового потока и вычислить КТО по известной разности температур между поверхностью образца и жидкостью.

Искусственно-анизотропная структура ГДТП приводит к появлению поперечной составляющей вектора теплового потока и порождает поперечный эффект Зеебека; в нормальном к вектору теплового потока направлении формируется термоэдс, пропорциональная плотности теплового потока,

$$E_0 = S_0 A q, \quad (1)$$

где  $S_0$  — вольт-ваттная чувствительность ГДТП [mV/W],  $A$  — площадь ГДТП в плане [m<sup>2</sup>],  $q$  — плотность теплового потока [W/m<sup>2</sup>].

Вольт-ваттная чувствительность ГДТП  $S_0$  зависит от температуры. Градуировка датчиков проводилась на

стенде, обеспечивающем рабочую температуру в пределах 293–823 К и уточнялась „по месту монтажа“ при пленочном кипении насыщенной воды, когда стабильный КТО определяется апробированной формулой Лабунцова и Гомелаури [8]:

$$\alpha = 0.32 \sqrt{\frac{\lambda^2 g (\rho' - \rho'') C}{\nu}} \sqrt{\frac{T_s}{T_f}}. \quad (2)$$

Относительная неопределенность градуировки находилась в пределах 7–12%.

Низкая постоянная времени ГДТП ( $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с) делает их практически безынерционными. Серая поверхность датчика позволяет определять интегральный тепловой поток (с учетом радиационной составляющей).

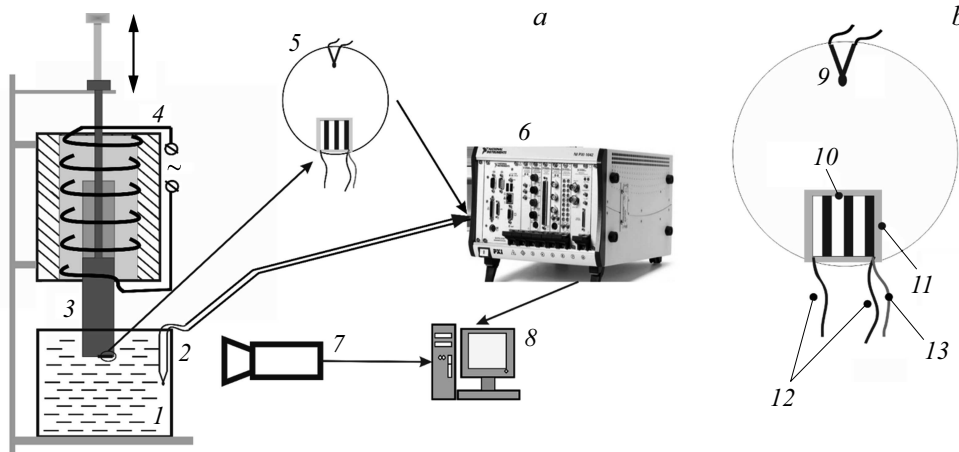
В работе использованы ГДТП из композиции сталь 12Х18Н9Т + никель с термостойкостью до 1300 К и вольт-ваттной чувствительностью 0.4–0.6 mV/W.

Экспериментальный стенд (рис. 1) состоит из вертикальной проходной муфельной печи, образца с ГДТП, резервуара объемом 10 dm<sup>3</sup>, измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) и видеокамеры.

Образец выполнен в виде цилиндра из латуни Л68 диаметром 25 mm и длиной 150 mm. На нижнем торце в выборке глубиной 0.7 mm закреплен термостойким компаундом ГДТП и вмонтирован спай термопары ТХА (рис. 1, а). На верхней части выполнено резьбовое соединение со стержнем-держателем. Все провода выведены на образующую цилиндра через наклонные отверстия и подключены к ИВК. Керамические трубки обеспечили тепловую защиту и электрическую изоляцию всех проводников. Для контроля температуры ГДТП использовалась трехпроводная схема коммутации (рис. 1, б).

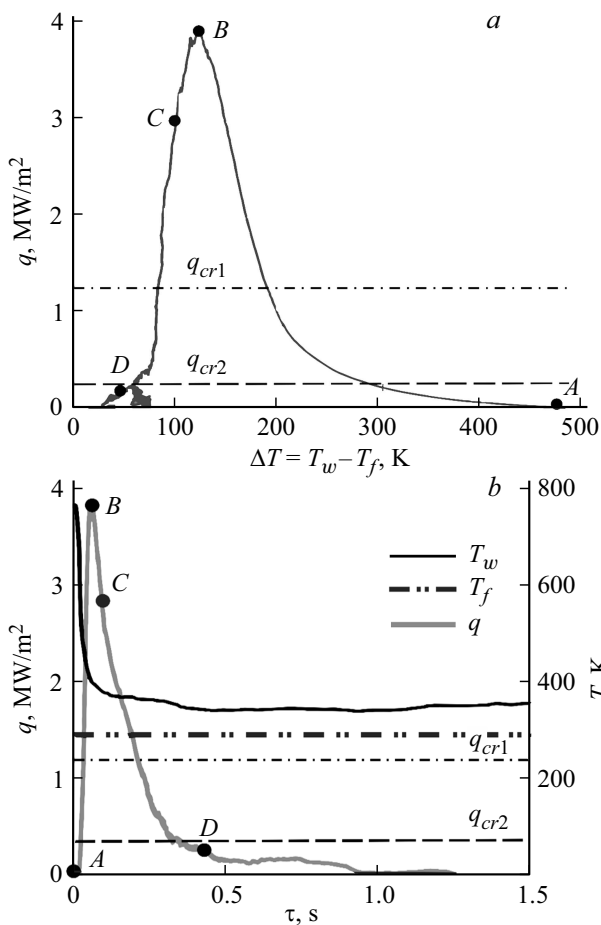
Температура воды в резервуаре измерялась термопарой ТХА; в ходе опыта она имела практически постоянное значение 294 К.

Регистрация сигналов ГДТП и термопар осуществлялась при помощи ИВК National Instruments

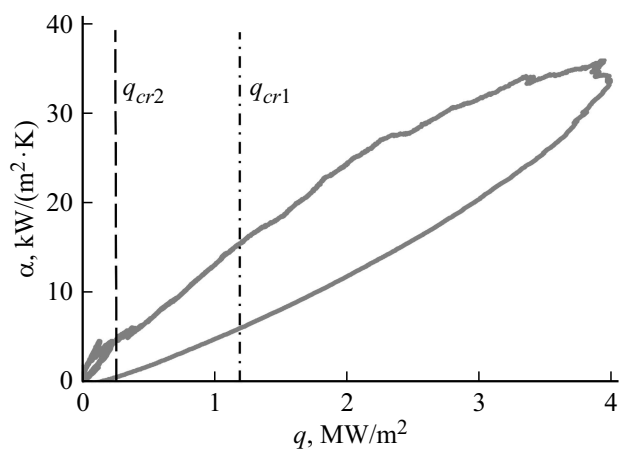


**Рис. 1.** Экспериментальная установка (а) и размещение датчиков на образце (b). 1 — резервуар с водой, 2 — термопара ТХА для измерения  $T_f$ , 3 — образец из латуни Л68, 4 — проходная муфельная печь, 5 — торец образца с датчиками, 6 — ИВК National Instruments, 7 — высокоскоростная камера Casio Exilim EX-FH20, 8 — компьютер, 9 — термопара ТХА для измерения  $T_w$ , 10 — ГДТП, 11 — слюда, 12 — алюминий, 13 — хромель.

(NI PXI-6289) с частотой  $10^6$  Hz. Последующая обработка происходила в программных средах LabView и Origin. Визуализацию опыта обеспечивала высокоско-



**Рис. 2.** Кривые охлаждения образца. а — зависимость плотности теплового потока от температурного напора, б — временные термо- и теплограммы.



**Рис. 3.** Связь плотности теплового потока и КТО.

ростная камера Casio Exilim EX-FH20 со скоростью съемки 1000 fps; затем видеокadres сопоставлялись с результатами градиентной теплотметрии.

Нагретый до 794 K образец вертикально погружался в холодную воду на глубину 30 mm. При первичном контакте с водой плотность теплового потока резко увеличивается (рис. 2, участок AB). Нагрев и испарение воды в пристенном слое ведут к образованию паровой пленки, предотвращению контакта между твердой и жидкой фазами и, как следствие, появлению экстремума на графике (точка B). Дальнейшее уменьшение плотности теплового потока (участок BC) связано с низким КТО в паровой пленке (рис. 3). Срыв паровой пленки начинается с острой кромки цилиндра (чаще всего с места монтажа ГДТП) и затем распространяется на весь образец. Переход в пузырьковый режим происходит на участке CD.

На рис. 3 показана зависимость КТО от плотности теплового потока. Максимальная плотность теплового

потока ( $4 \text{ MW/m}^2$ ) вчетверо превышает первую критическую плотность при кипении насыщенной воды.

В эксперименте подтверждены работоспособность и информативность градиентной теплометрии при исследовании кипения. Доказана интенсификация теплообмена при пленочном кипении недогретой жидкости. Именно прямое измерение (а не вычисление плотности теплового потока) благодаря методу градиентной теплометрии обеспечивает отечественный приоритет в этой области.

В дальнейших работах появится возможность экспериментально исследовать теплообмен при кипении в различных геометрических условиях, при разных режимах и для различных жидкостей.

## Список литературы

- [1] Ягов В.В., Забиров А.Р., Канин П.К., Денисов М.А. // Инж.-физ. журн. 2017. Т. 90. № 2. С. 287–298.
- [2] Пузина Ю.Ю., Ковалев С.А., Кубриков К.Г. // Вестн. МЭИ. 2013. № 4. С. 41–46.
- [3] Kenning D.B.R. // Int. J. Heat Fluid Flow. 2004. V. 25. P. 209–222.
- [4] Gong S., Ma W., Wang C., Mei Y., Gu H. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 90. P. 636–644.
- [5] Emery T.S., Jaikumar A., Raghupathi P., Joshi I., Kandlikar S.G. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 122. P. 1053–1073.
- [6] Sher I., Harari R., Reshef R., Sher E. // Appl. Therm. Eng. 2012. V. 36. P. 219–226.
- [7] Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Основы градиентной теплометрии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 203 с.
- [8] Лабунцов Л.А., Гомелаури А.В. // Тр. МЭИ. 1976. В. 310. С. 50–58.