

03

Возникновение конвективных течений в пристенном зернистом слое в процессе нестационарного вскипания жидкости

© Б.Г. Покусаев, С.П. Карлов, Д.А. Некрасов, Н.С. Захаров

Московский государственный машиностроительный университет
E-mail: NicolaZaharov@yandex.ru

Поступило в Редакцию 24 февраля 2014 г.

На основе разработанных и реализованных оптических методов проведено исследование возникновения и развития конвективных течений в процессе нестационарного кондуктивного нагрева стенки кюветы, включающей слой засыпки из частиц цилиндрической формы, помещенных в жидкость. Для измерения полей температур применялся метод голографической интерферометрии с элементами иммерсионной оптической томографии, основанный на зависимости показателя преломления от свойств сплошных сред и температуры. В условиях варьирования теплофизических свойств жидкости, частиц зернистого слоя, а также величины подводимого теплового потока изучен механизм влияния засыпки на время и характер формирования микроконвекции вблизи обогреваемой снизу стенки. Впервые получены результаты по визуализации полей температур и развитию конвективных течений в ячейке сложной формы, образованной элементами засыпки, в процессе нестационарного нагрева.

Зернистые и микропористые среды, обладающие развитой межфазной поверхностью контакта, широко применяются в различных аппаратах энергетики, нефте- и газодобыче, микрореакторах химической и биотехнологической промышленности. Так, применительно к энергетике активно обсуждаются варианты конструктивных решений и схем использования шпоровых микротрещин в водоохлаждаемых реакторах, в том числе реакторах прямоточного типа [1]. Глубокое и полное понимание происходящих теплогидравлических процессов определяет безопасную и устойчивую работу такого оборудования. В частности, изучение вскипания недогретой жидкости при импульсном тепловыделении в стенке в присутствии пристенного зернистого слоя, а также анализ влияния различных факторов на протекающие при этом

процессы, является одной из фундаментальных научных и прикладных задач.

К таким факторам, например, относится необходимость учета влияния свободной конвекции в процессе прогрева пристенного слоя жидкости, включая стадию образования первых паровых пузырьков. В таких условиях при определенных соотношениях скорости разогрева поверхности, размерах частиц и материала засыпки конвекция может существенно влиять как на общую динамику протекания процессов, так и на механизмы парообразования [2,3]. Отметим также, что нестационарное вскипание жидкости может сопровождаться формированием волн возмущений различной структуры [4] вследствие взрывного вскипания перегретого слоя жидкости [5].

В работе [2] было показано, что, начиная со скоростей разогрева поверхности ~ 800 K/s и ниже, расчетные значения времени индукции, профили температур на момент вскипания и количество паровых зародышей на единицу поверхности существенно отличаются от экспериментальных величин. Это объяснялось тем, что в указанном диапазоне скоростей разогрева в расчетных методиках необходимо учитывать механизм свободной конвекции в системе нагреватель—жидкость—элемент засыпки. Расчеты также показали, что конвекцию необходимо рассматривать при определенных соотношениях как скоростей разогрева, так и размеров характерной ячейки.

В [6] приведены теоретические методики учета конвекции как при развитом кипении, так и в условиях нестационарного теплоподвода. Несмотря на многочисленные исследования, различные аспекты процессов вскипания теплоносителя, влияние механизма конвекции на начальной стадии фазового перехода жидкость—пар при нестационарном подводе тепловой мощности в присутствии зернистого слоя остаются слабо изученными.

В предлагаемой статье авторами на основе разработанного экспериментального метода регистрации начала возникновения микроконвекции, образованной в пристенной области между зёрнами засыпки, будут проведены детальные исследования в этой области, что позволит модернизировать математическую модель процесса вскипания недогретой воды при нестационарном нагреве [2].

Для исследования теплообменных процессов, в том числе сопровождающихся фазовыми переходами (кипение, испарение и т.п.), успешно используются оптические методы [7], которые обладают значительными преимуществами, обеспечивая более высокую чувствительность и

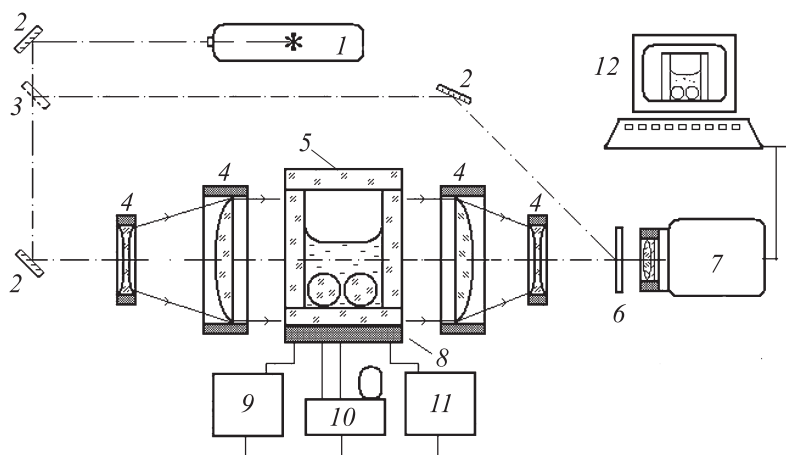


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лазер, 2 — отражающие зеркала, 3 — полупрозрачное зеркало — делитель лазерного пучка, 4 — линзы, 5 — исследуемый объект — оптическая кювета, 6 — голограмма, 7 — видеореги­стратор, 8 — сменный термоэлемент, 9 — система электропитания, 10 — термостат, 11 — система контроля, 12 — компьютер.

точность, чем, например, калориметрические измерения или измерения поля температур термопарами. В экспериментах для регистрации процессов переноса в жидкости использовался ранее известный метод голографической интерферометрии [8,9], а для регистрации полей температур в данной работе применен метод иммерсионной оптической томографии [9], позволяющий проводить измерения в прозрачных средах.

Экспериментальная установка, на которой проводились исследования (рис. 1), представляет собой стенд для измерения температурных полей в зернистых слоях, погруженных в жидкость. Установка включает в себя гелий-неоновый лазер (He–Ne) мощностью 20 mW, длиной волны $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, оптическую систему, состоящую из зеркал, линз, голографической пластинки и кюветы, выполненной из прозрачного оптического стекла.

Оптическая кювета размером $5 \times 10 \text{ mm}$, высотой 15 mm, с толщиной слоя жидкости по ходу лучей $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ загружалась исследуемой жидкостью и зерном засыпки. В нижней части кюветы осуществлялся подвод теплоты электрическим нагревателем в виде пласти-

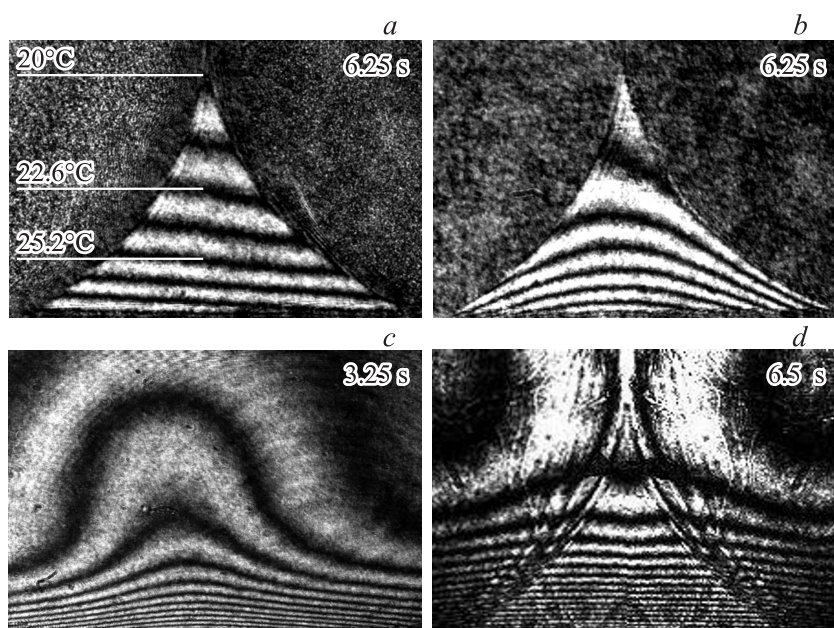


Рис. 2. Возникновение конвективных течений при нестационарном нагреве стенки: $N = 60 \text{ W/cm}^2$, цилиндрические частицы диаметром $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ — вода—стекло (*a*); вода—сталь (*b*); вода—свободный объем (*c*); $N = 8 \text{ W/cm}^2$, сферические частицы диаметром $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ — иммерсионная жидкость—стекло (*d*).

ны, выполненной из нихрома Х20Н80. Размеры пластины $5 \times 10 \text{ mm}$, толщина 0.2 mm . В качестве модели зернистого слоя использовались частицы цилиндрической формы диаметром $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, а также в опытах методического характера — сферические частицы того же диаметра. Опыты проводились с жидкостями: вода, иммерсионная жидкость, хлористый метилен и диэтиловый эфир. Динамика процессов с помощью видеокамеры отображалась на экране компьютера в режиме реального времени от начала нагрева. Исходная температура жидкостей составляла 20°C .

В данной работе приводится небольшая часть полученных экспериментальных данных, которые наиболее ярко отражают выявленные особенности начала образования микроконвективных течений в сложных геометрических условиях.

На рис. 2 представлены характерные видеокadres полей температур (изотерм) в воде со стеклянными (*a*) и стальными (*b*) цилиндрами, в свободном объеме (*c*) в условиях нестационарного нагрева мощностью 60 W/cm^2 . Здесь же (рис. 2, *a*) в качестве примера показана шкала температур. Опыты показали, что теплофизические свойства материала засыпки существенно влияют на температурное поле вблизи поверхности контакта частицы и стенки нагревателя. Как видно, при одинаковых условиях проведения экспериментов, в случае стальных цилиндров начало образования конвекции происходит уже через 6.25 s после начала нагрева, в то время как со стеклянными цилиндрами наблюдается режим классической нестационарной теплопроводности — изотермы, параллельные поверхности нагрева. Характерное время, при котором происходит искривление параллельных изотерм относительно поверхности нагрева, в экспериментах отождествляется со временем начала возникновения конвекции. Под стальными цилиндрами, имеющими больший коэффициент теплопроводности по сравнению со стеклянными, образуется температурный провал, описанный расчетами [6], который „провоцирует“ более раннее возникновение конвекции. Что касается опытов в свободном объеме, то при прочих равных условиях конвекция (рис. 2, *c*) возникает существенно раньше — через 3.25 s.

Применение иммерсионной оптической томографии позволяет наблюдать динамику возникновения полей температур не только в жидкости, но и в самих зернах засыпки, имеющих одинаковые коэффициенты преломления. На рис. 2, *d* для режима „теплопроводности“ представлен видеокادر с изотермами в слое со стеклянными шариками, погруженными в иммерсионную жидкость.

На рис. 3 представлены результаты по возникновению конвективных течений в ячейке с хлористым метиленом (*a, b*) и диэтиловым эфиром (*c, d*) при нестационарном подводе мощности 60 W/cm^2 . Данные жидкости были выбраны как легкокипящие с целью интенсификации процесса конвекции, с температурами кипения 39.8 и 34.5°C соответственно. В опытах с хлористым метиленом и эфиром конвекция возникает существенно раньше (в 2 раза), чем для воды в свободном объеме, а с частицами — в 4 раза раньше. Для хлористого метилена, как и для воды, в случае стальных частиц конвекция возникает раньше (рис. 3, *b*), чем в случае стеклянных (рис. 3, *a*). Что касается опытов с эфиром, эта закономерность нарушается. И, как видно из рис. 3, *c*, при одних и тех же условиях „выраженная“ конвекция возникает раньше со стеклянными цилиндрами. Это может быть связано с возможным

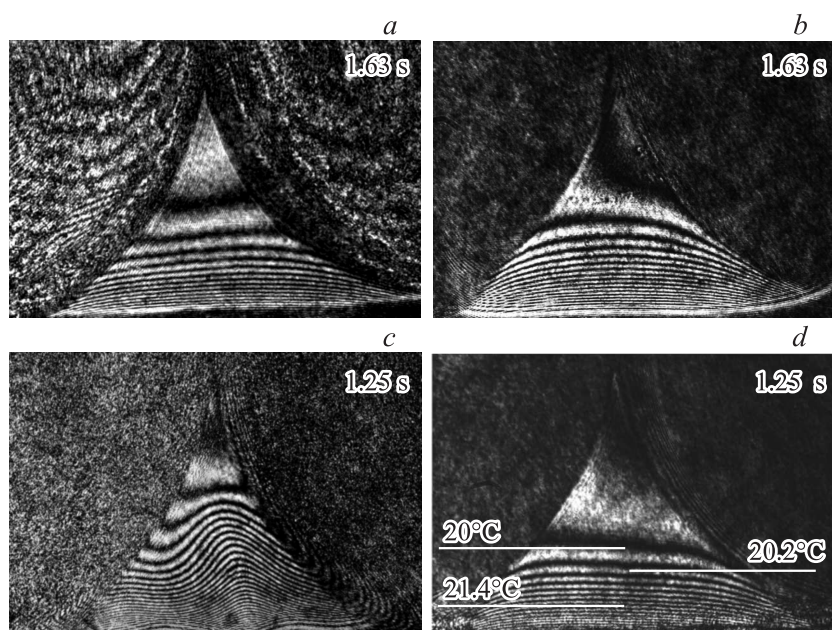


Рис. 3. Возникновение конвективных течений при нестационарном нагреве стенки $N = 60 \text{ W/cm}^2$, цилиндрические частицы диаметром $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$: *a* — хлористый метилен–стекло, *b* — хлористый метилен–сталь, *c* — эфир–стекло, *d* — эфир–сталь.

появлением паровой фазы в области контакта цилиндра и стенки, и поэтому требует проведения дальнейших исследований.

Таким образом, на основе использования оптических методов получены закономерности возникновения естественной конвекции в ячейке сложной геометрической формы при нестационарном нагреве горизонтальной стенки. Установлено, что в опытах с водой и хлористым метиленом со стальными цилиндрами, имеющими существенно больший коэффициент температуропроводности по сравнению со стеклянными, „микроконвекция“ в пристенной области между частицами возникает существенно раньше.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 14-08-00626, Минобрнауки 2209.

Список литературы

- [1] Филиппов Г.А., Богоявленский Р.Г., Авдеев А.А. // Тяжелое машиностроение. 2002. № 1. С. 43.
- [2] Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А. // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 3. С. 406–412. (*Pokusaev B.G., Nekrasov D.A. // High Temperature. 2008. V. 46. N 3. P. 367.*)
- [3] Situ R., Ishii M., Hibiki T., Tu J.Y., Yeoh G.H., Mori M. // Int. Heat Mass Transf. 2008. V. 51(25–26). P. 6268–6282.
- [4] Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. CRC Press, Inc., 1993. P. 222.
- [5] Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А., Таиров Э.А. // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 1. С. 89. (*Pokusaev B.G., Nekrasov D.A., Tairov E.A. // High Temperature. 2012. V. 50. N 1. P. 84.*)
- [6] Pavlenko A.N., Surtaev A.S., Koverda V.P., Skokov V.N., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V. // J. Engineering Thermophysics. 2009. V. 18. N 1. P. 20–38.
- [7] Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче / Пер. с англ. М.: Мир, 1973. С. 240.
- [8] Бабенко В.А., Константинов В.Б., Малый А.Ф. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 10. С. 13–18.
- [9] Покусаев Б.Г., Карлов С.П., Шрейбер И.Р. // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38. № 1. С. 3–8. (*Pokusaev B.G., Karlov S.P., Shreiber I. // Theoretical foundations of chemical engineering. 2004. V. 38. N 1. P. 1–5.*)