УДК 536.242

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАСЫПКИ НА ДИНАМИКУ ВСКИПАНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В СТЕНКЕ

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

Московский Государственный Машиностроительный Университет, Москва, Россия

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 11-08-00368, 12-08-00734-а, 12-08-31243 мол_а), а также Минобрнауки проект 7.7787.2013г.

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование процесса микроконвекции в ячейке, образованной из элементов цилиндрической формы и разных теплофизических свойств. В качестве рабочей жидкости использовались: вода, изопропиловый спирт и хлористый метилен. В работе использовался метод голографической интерферометрии, позволяющий фиксировать изменение температурных полей в исследуемой области. Получены результаты по визуализации полей температур и развитию конвективных течений в процессе нестационарного прогрева в нижней части стенки кюветы. Определены условия возникновения микроконвекции в зависимости от теплофизических свойств жидкости и величины подводимого теплового потока.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы тепломассообмена в зернистых средах широко распространены в различных аппаратах энергетики, микрореакторах химической и биотехнологической промышленности [1]. Так, применительно к энергетике активно обсуждаются варианты конструктивных решений и схем использования шаровых микротвэлов в водоохлаждаемых реакторах, в том числе реакторах прямоточного типа [2]. К одной из фундаментальных научных и прикладных проблем здесь относится изучение процессов вскипания недогретой жидкости при импульсном тепловыделении в стенке в присутствии зернистого слоя, а также анализ влияния различных факторов на протекающие при этом процессы. К таким факторам, например, относится необходимость учета механизма 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 материале засыпки конвекция начинает существенно влиять, как на общую динамику протекания процессов, так и на механизмы парообразования, в частности [3,4]. В этих работах было показано, что, начиная со скоростей разогрева поверхности ~ 800 К/с 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. Исследования также показали, что конвекцию необходимо рассматривать при определенных соотношениях скорости разогрева и размеров характерной ячейки.

В [5] приведены теоретические методики учета конвекции, как при развитом кипении, так и в условиях нестационарного теплоподвода. Однако отсутствуют работы, как теоретические, так и экспериментальные, посвященные проблеме нестационарного вскипания в присутствии зернистого слоя. В предлагаемой статье авторами на основе предыдущей работы [6] будет развит экспериментальный метод фиксации начала развития микроконвекции, образованной в пристенной области между зернами загрузки цилиндрической формы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Исследования теплообменных процессов с использованием оптических методов по сравнению с другими методами обладают высокой информативностью, обеспечивая более высокую чувствительность и точность, чем, например, калориметрические измерения или измерения поля температур термопарами. В [7] показана классическая работа посвященная применению оптических методов, основанных на зависимости показателя преломления сплошных сред от температуры и концентрации в экспериментальных исследованиях тепло - и массообмена.

В предыдущей работе [6] в качестве модели зернистого слоя использовались частицы сферической формы. Однако, для таких частиц характерна трехмерная пространственная структура. Шарики диаметром 5×10^{-3} м, помещенные в кювету, соприкасаясь между собой, образуют одну точку контакта. Такая модель не обладает достаточной информативностью об образовании конвективных токов. Поэтому в тепловых экспериментах в качестве зернистого слоя были использованы стальные и стеклянные цилиндрики с тем же диаметром плотно соприкасающиеся между собой. В качестве жидкой фазы использовались вода, изопропиловый спирт и хлористый метилен. Две последние были выбраны как легкокипящие жидкости с целью интенсификации процесса конвекции с температурами кипения 82,4°С и 39,8°С соответственно.

В работе для возможности фиксации микроконвекции схема установки была перенастроена. Установка на рис. 1. представляет собой стенд для проведения исследования температурных полей в зернистых слоях, погруженных в жидкость. Она состоит из устройства, которое обеспечивает нагрев исследуемого объёма жидкости при различных уровнях тепловых потоков. Набор сменных нагревательных элементов включает электронагреватель, теплообменник и термоэлектрический элемент. Два последних дают возможность, как импульсного нагрева, так и охлаждения снизу оптической кюветы с исследуемой системой – зернистым слоем, заполненным жидкостью. Использовалась оптическая кювета размером 5×10 мм и высотой 15 мм с толщиной слоя жидкости по ходу лучей 5×10^{-3}м. В состав экспериментальной установки входят датчики температуры, с помощью которых измерялась температура в отдельных точках исследуемого объема жидкости.

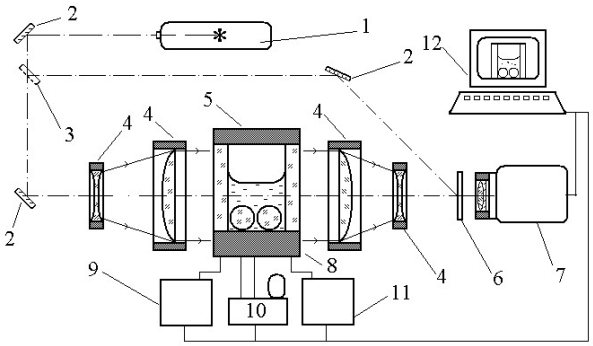


Рис.1 1 – лазер; 2 – отражающие зеркала; 3 – полупрозрачное зеркало – делитель лазерного пучка; 4 – линзы; 5 – исследуемый объект – оптическая кювета; 6 – голограмма; 7 – видеорегистратор; 8 – сменный термоэлемент; 9 – система электропитания; 10 – термостат; 11 – система контроля; 12 – компьютер.

Программа экспериментов включала:

– измерение полей температур вблизи обогреваемой стенки при импульсном теплоподводе к стеклянным и стальным цилиндрам;

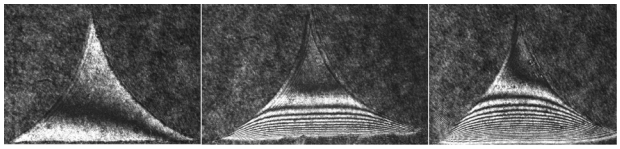
– в опытах варьируются параметры теплоподвода по амплитуде и времени, и фиксируется момент начала развития конвекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рисунках представлены характерные фотографии влияния на возникновение микроконвекции как теплофизических свойств жидкой фазы, так и свойств материала цилиндрических частиц.

На рис. 2. и 3 представлены фотографии полей температур, характеризующие влияние свойств жидкой фазы на образование микроконвекции в воде, изопропиловом спирте и хлористом метилене в одинаковый момент времени с тепловой мощностью нагрева 30Вт. В случае стальных частиц и хлористого метилена (рис. 2 - в), имеющего низкую температуру кипения относительно выбранных жидкостей, микро-конвекция образуется через 1,6сек. от начала нагрева. В то время как в воде, так и в

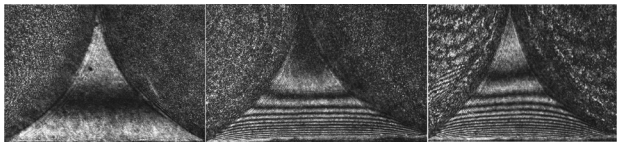
спирте (рис. 2 – а, б) наблюдается режим классической нестационарной теплопроводности.



а) б) в)

Рис.2 Стальные цилиндры(1,6с.): а) вода; б) изопропиловый спирт; в) хлористый метилен.

В опытах со стеклянными цилиндриками (рис. 3) при тех же временах микроконвекции не образуется, наблюдаются изотермы параллельные поверхости нагрева.

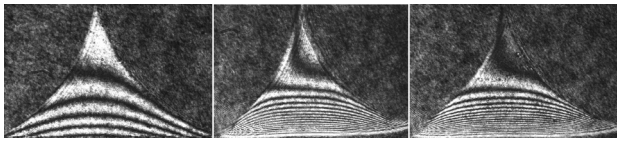


а) б) в)

Рис.3 Стеклянные цилиндры(1,6с.): а) вода; б) изопропиловый спирт; в) хлористый метилен.

На рис. 4. и 5 показаны фотографии с характерными временами начала образования микроконвекции в зависимости от теплофизических свойств частиц.

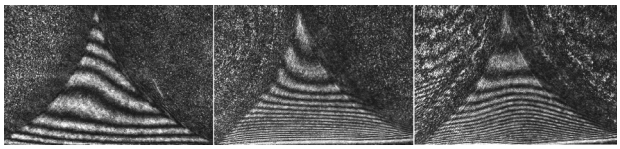
В опытах с хлористым метиленом в присутствии стальных цилиндров (рис. 4 - в), имеющих существенно больший коэффициент температуропроводности по сравнению со стеклом (рис. 5 – в), видно заметное искажение изотерм в пристенной области между частицами, что приводит к ускоренному возникновению “микроконвекции” между цилиндрами.



а) б) в)

Рис.4 Стальные цилиндры: а) вода – 5с.; б) изопропиловый спирт – 2,5с.; в) хлористый метилен – 1,6с.

В случае со стальными цилиндрами, погруженными в воду (рис.4 – а), за счет разности коэффициентов температуропроводности возникновение конвекции происходит гораздо раньше (5сек.), чем со стеклянными цилиндрами (рис.5 – а; 9,8сек.).



а) б) в)

Рис.5 Стеклянные цилиндры: а)вода – 9,8с.; б) изопропиловый спирт – 3,1с.; в) хлористый метилен – 2,4с.

На рис. 6. представлены количественные результаты экспериментов в хлористом метилене со стальными и стеклянными цилиндрами как наиболее наглядные с точки зрения визуализации процесса. На графике показаны зависимости значений времени до начала возникновения микроконвекции от мощности тепловыделения в нагревателе. Видно, что в случае стеклянных цилиндров характерные времена возникновения микроконвекции максимальны. Однако, для каждого из материалов виден порог, при котором дальнейшее увеличение подачи мощности не приводит к ускорению процесса. Видно, что при тепловой мощности нагрева свыше 15Вт время для образования микроконвекции практически не изменяется.

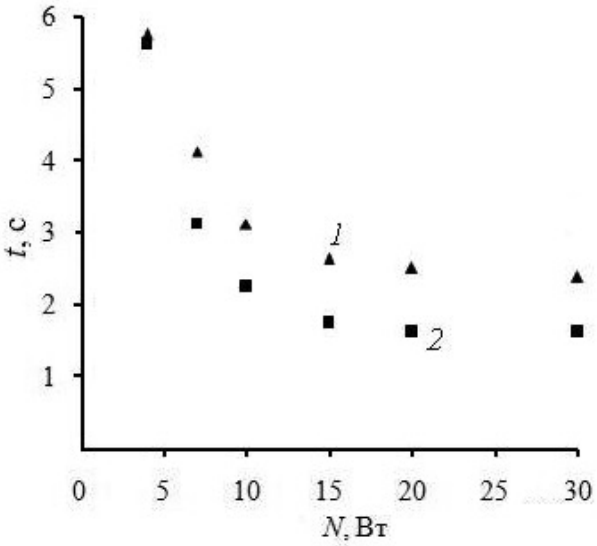


Рис.6 Экспериментальные значения времени до начала возникновения микроконвекции в хлористом метилене: 1 – стеклянные цилиндры; 2 – стальные цилиндры.

ВЫВОДЫ

Проведено исследование возникновения микроконвекции в пристенной области между зернами загрузки для стальных и стеклянных цилиндров, погруженных в жидкости с разными теплофизическими свойствами.

Показано, что в системе жидкость – частица, в случае хлористого метилена и стальных цилиндров, при прочих равных условиях время начала микроконвекции минимально, а в случае воды и спирта наблюдается классическая нестационарная теплопроводность.

В опытах в присутствии стальных цилиндров, имеющих существенно больший коэффициент температуропроводности по сравнению со стеклом, видно заметное искажение изотерм в пристенной области между частицами, что приводит к ускоренному возникновению “микроконвекции” между цилиндрами.

Представленные экспериментальные зависимости значений времени до начала возникновения микроконвекции и мощности тепловыделения в нагревателе показали, что в случае стеклянных цилиндров и метилена характерные времена возникновения микроконвекции максимальны по сравнению со стальными. Также для этой системы определена эффетивная мощность теплонагрева для образования микроконвекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Iliuta I., Hamidipour M., Schweich D., Larachi F. Two-phase flow in packed-bed microreactors: Experiments, model and simulations // Chem. Eng. Sci. 2012. V. 73. P. 299.
2. Филиппов Г.А., Богоявленский Р.Г., Авдеев А.А. Перспективы создания прямоточных микротвэльных ядерных реакторов с перегревом пара // Тяжелое машиностроение. 2002. №1. С. 43. Filippov G.A., Bogoyavlenskiy R.G., Avdeev A.A. Perspectives of uniflow microfuel reactors with vapor overheating // Russian Journal of Heavy Machinery, 2002. №1. P. 43.
3. Покусаев Б. Г., Некрасов Д. А. Математи-ческое моделирование переходных процессов в кольцевом канале с зернистым слоем при вскипании недогретой воды. Формирование волны давления // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 3. С. 406. Pokusaev B.G., Nekrasov D.A. Mathematical simulation of transient processes in a circular channel with granular layer under conditions of subcooled water boiling. Formation of pressure wave // High Temperature, 2008. vol. 46. № 3. P. 406.
4. Покусаев Б. Г., Некрасов Д.А., Таиров Э.А. Моделирование вскипания недогретых воды и этанола в условиях импульсного тепловыделения в стенке // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 1.С.89. Pokusaev B.G., Nekrasov D.A., Tairov E.A. Modeling of boiling of subcooled water and ethanol under conditions of pulsed heat generation in a wall // High Temperature, 2012. vol. 50. № 1.P.89.
5. Pavlenko A.N., Surtaev A.S., Koverda V.P., Skokov V.N., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V. Dynamics of transition processes and structure formation in critical heat-mass transfer regimes during liquid boiling and cavitation // Journal of Engineering Thermophysics. 2009. T. 18. № 1. C. 20-38.
6. Покусаев Б.Г., Карлов С.П., Некрасов Д.А., Захаров Н.С. Развитие конвекции в пристенном зернистом слое при его нестационарном нагреве // Теор. основы хим. технологии. 2013. Т.47. №4. С. 402. Pokusaev B.G., Karlov S.P., Nekrasov D.A., Zakharov N.S. Development of Convection in Near-Wall Granular Bed during Nonstationary Heating // Theor. Found. of Chem. Eng., 2013. vol.47. №4. P. 402.
7. Хауф В, Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир. 1973, 240 с. Khauf V, Grigul U. Optical methods in heat transfer. M.: World. 1973, 240 P.