

03

Измерение массовой скорости испарения в горизонтальном слое жидкости, частично открытом в движущийся газ

© Ю.В. Люлин, О.А. Кабов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: lyulin@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 23 апреля 2013 г.

Выполнены экспериментальные исследования динамики испарения с локальной поверхности горизонтального слоя жидкости под действием потока газа. Измерен средний расход испарения слоя жидкости (HFE-7100) под действием потока инертного газа (азот) с помощью двух независимых методов. Исследовано влияние средней скорости газа, температуры жидкости и газа, а также толщины слоя на скорость испарения и конвекцию в слое жидкости. Получены корреляционные зависимости расхода испарения от расхода инертного газа и температуры. Обнаружено, что средний расход испарения имеет локальный максимум при увеличении толщины слоя жидкости. С ростом температуры жидкости и газа этот локальный максимум расхода испарения смещается в сторону большего значения толщины слоя жидкости.

Исследование процесса испарения с поверхности слоя жидкости в движущийся газ является актуальной задачей. От интенсивности испарения с поверхности жидкости существенно зависит эффективность таких аппаратов, как тепловые трубы, пленочные испарители, двухфазные системы охлаждения и др. Интенсивное испарение с поверхности слоя жидкости под воздействием потока газа вызывает различные конвективные течения в этом слое. Форма и структура этих течений являются достаточно сложными и могут оказывать существенное влияние на интенсивность расхода испарения. Взаимодействие различных механизмов конвекции в условиях земной гравитации и микрогравитации интенсивно изучается аналитически [1,2], численно [3–5] и экспериментально [4,5].

Целью данной работы является экспериментальное исследование физических механизмов формирования границы раздела газ–жидкость и развития структуры конвективных течений в слое жидкости. Конвек-

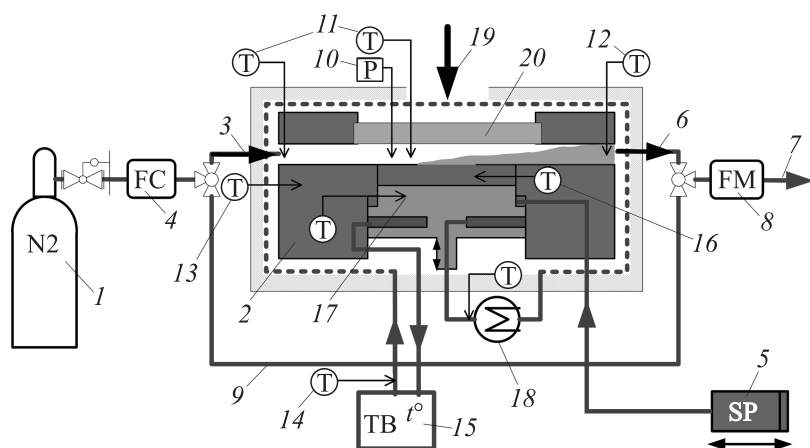


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

тивные течения вызваны действием таких факторов, как касательные напряжения со стороны газа, термокапиллярные напряжения на границе раздела, естественная конвекция и тепломассоперенос в слое жидкости. Исследовалось влияние этих факторов на интенсивность испарения с поверхности слоя жидкости; представлены экспериментальные данные по измерению массовой скорости испарения в зависимости от средней скорости газа, температуры газа и жидкости, а также толщины слоя жидкости.

Экспериментальные исследования проведены на экспериментальном стенде по изучению конвекции, обусловленной интенсивным испарением в горизонтальном слое жидкости под действием потока газа. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки, которая состоит из рабочего участка, газового и жидкостного контура, системы термостабилизации, системы сбора данных и оптической системы. Газ из баллона 1 поступает в рабочий участок 2. Массовый расход этого газа контролируется на входе 3 в рабочий участок с помощью регулятора расхода 4. Для подачи жидкости в рабочий участок используется высокоточный шприцевый насос 5. Насос также предназначен для поддержания постоянного уровня испаряющегося слоя жидкости в рабочем участке. Далее парогазовая смесь выходит из рабочего

участка 6 и поступает в вентиляционную линию 7. Поток парогазовой смеси на выходе измеряется с помощью массового расходомера 8. Обводной канал 9 для потока газа используется для синхронизации показаний регулятора расхода и расходомера. Давление газа в рабочем участке измеряется с помощью датчика давления 10. На входе и выходе рабочего участка измеряется температура газа 11 и парогазовой смеси 12. Температура рабочего участка 13 контролируется с помощью воды, которая прокачивается через специальные каналы в рабочем участке с контролируемой температурой 14 с помощью термостата 15. Температура жидкости в рабочем участке 16 определяется температурой основания подложки 17. Температура этого основания контролируется с помощью воды, которая дополнительно прокачивается через специальный теплообменник 18. Таким образом, разница между температурой жидкости и газа поддерживается не более 0.1°C .

Рабочий участок выполнен из двух соединенных между собой блоков оргстекла, которые формируют прямоугольный газовый канал высотой 4 mm и шириной 100 mm, а также прямоугольную жидкостную камеру. Жидкостная камера представляет собой квадратный вырез (40×40 mm) с изменяемой высотой. Высота камеры изменяется с помощью вертикально передвигающегося основания подложки. Между жидкостной камерой и газовым каналом установлена пластина из нержавеющей стали толщиной 200 μm . Эта пластина имеет квадратный вырез (10×10 mm) по центру, где происходит соприкосновение жидкости и газа. По периметру кромки выреза на пластине сделана микроканавка. Эта микроканавка удерживает жидкость в области выреза, а также предотвращает разлив жидкости по поверхности пластины, используя эффект острой кромки. Возможность использования микроканавки в качестве противосмачиваемого барьера для жидкости с низким поверхностным натяжением исследована в работе [6].

Для контроля и наблюдения за положением поверхности испаряющейся жидкости в рабочем участке используется теневой метод 19 с отражением оптического луча от границы раздела жидкости и газа, а также от зеркальной подложки основания. Оптическая система устанавливается сверху рабочего участка, и регистрация изображения ведется через оптическое окно 20. Метод позволяет определять деформацию границы раздела жидкости и газа в оттенках серого цвета. Положение поверхности жидкости поддерживается в плоском состоянии в ходе всех

экспериментов, которое определяется равномерным распределением оттенка серого цвета отраженного оптического луча.

Измерение расхода испарения с поверхности слоя жидкости, обдуваемого потоком газа, происходит с помощью двух методов. Первый метод основан на определении среднего расхода жидкости, который необходимо подать в рабочий участок для того, чтобы в процессе испарения обеспечить постоянный объем в слое жидкости. Вторым методом заключается в измерении разницы массового расхода чистого газа на входе в рабочий участок и массового расхода парогазовой смеси на выходе. Вторым методом определения расхода испарения применен и апробирован для подобных задач впервые. В целом оба метода хорошо согласуются между собой. Отличие в определении расхода испарения составляет не более 15%.

Эксперименты проводились в горизонтально установленном рабочем участке при атмосферном давлении в контуре. В качестве рабочей жидкости и газа использовались жидкость HFE-7100 и азот (99,8%). Расход подаваемой жидкости изменялся от 40 до 350 $\mu\text{l}/\text{min}$, что соответствует массовой скорости испарения от 0,014 до 0,11 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$. В процессе эксперимента изменялись три основных параметра: расход газа от 0,1 до 5 l/min (число Рейнольдса 40–200), что соответствует средней скорости газа от 0,014 до 0,24 m/s ; температура жидкости и газа от 20 до 40°C; толщина слоя жидкости от 1,5 до 8 mm .

На рис. 2 представлена зависимость массовой скорости испарения от средней скорости потока газа для различных температур жидкости и газа. Видно, что скорость испарения увеличивается при увеличении скорости потока газа для всех температур жидкости и газа. Зависимость скорости испарения от средней скорости потока газа является нелинейной и может описываться экспоненциальной функцией $Q_I = AU_g^n$, где Q_I — массовая скорость испарения в $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, U_g — средняя скорость газового потока в m/s , A — постоянная величина и n — степень. Степень n находится из соотношения $n = \text{tg}(\alpha)$, где α — угол наклона кривой на рис. 2. Также видно, что массовая скорость испарения увеличивается при увеличении температуры жидкости и газа. Зависимость скорости испарения от температуры также описывается экспоненциальной формулой. Таким образом, обобщив экспериментальные данные, для определения массовой скорости испарения в зависимости от средней скорости газа и температуры жидкости и газа

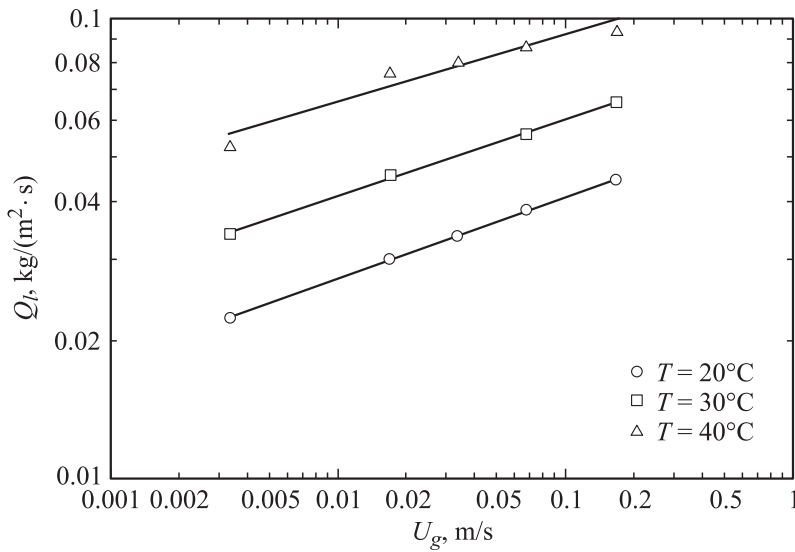


Рис. 2. Зависимость массовой скорости испарения от средней скорости потока газа. Толщина слоя 3 mm. Символы обозначают экспериментальные данные для различных температур. Черные линии обозначают тренды, описывающие экспериментальные данные.

могут использоваться следующие эмпирические формулы (1)–(4):

$$Q_1 = 1.5 \cdot 10^{-4} \cdot T^{1.82} U_g^{0.147}, \quad (1)$$

$$Q_1 = 1.5 \cdot 10^{-4} \cdot T^{1.89} U_g^{0.164}, \quad (2)$$

$$Q_1 = 1.5 \cdot 10^{-4} \cdot T^{1.86} U_g^{0.173}, \quad (3)$$

$$Q_1 = 1.5 \cdot 10^{-4} \cdot T^{1.75} U_g^{0.161}, \quad (4)$$

T — температура жидкости и газа в °C. Формула (1) описывает зависимость скорости испарения от скорости газа и температуры для толщины слоя 1.5 mm. Формулы (2)–(4) соответствуют толщине слоя жидкости 3, 5, 8 mm. Формулы (1) и (3) аппроксимируют скорость испарения с погрешностью менее чем 15%, формула (4) менее чем 20% и формула (2) менее чем 25%. Эти зависимости могут использоваться

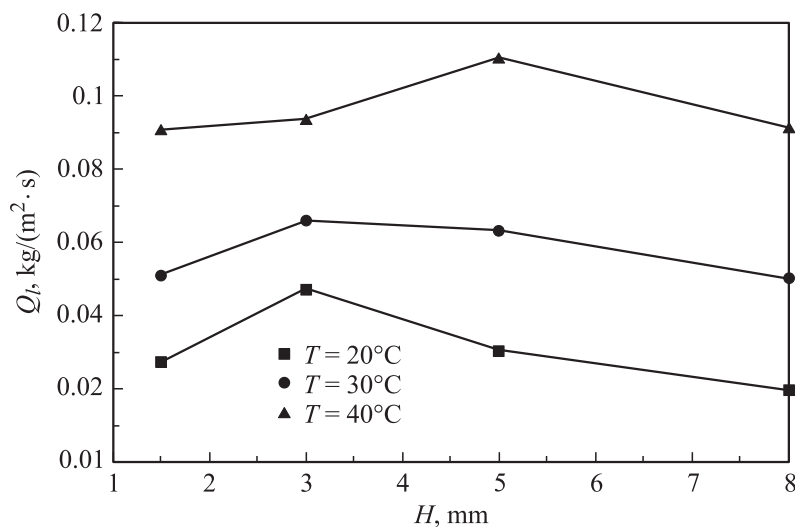


Рис. 3. Зависимость массовой скорости испарения от толщины слоя жидкости при постоянной температуре. Скорость потока газа 0.24 м/с.

для сравнения с данными численных расчетов и проверки адекватности теоретических моделей.

На рис. 3 представлена зависимость массовой скорости испарения от толщины слоя для разных температур жидкости и газа. Средняя скорость потока газа составляет 0.24 м/с. Из рисунка видно, что при увеличении толщины слоя испаряющейся жидкости значение скорости испарения имеет локальный максимум. Для температуры жидкости и газа 20°C максимальная скорость испарения достигается при толщине слоя жидкости 3 мм. При температуре 30°C максимальная скорость испарения достигается также при толщине слоя жидкости 3 мм. В то же время скорость испарения при толщине слоя 5 мм близка по значению к скорости испарения в слое 3 мм. Дальнейшее увеличение температуры до 40°C приводит к тому, что максимальное значение скорости испарения достигается при толщине слоя 5 мм. Следовательно, увеличение температуры жидкости и газа от 20 до 40°C приводит к смещению локального максимума массовой скорости испарения с 3 до 5 мм толщины слоя жидкости.

Таким образом, выполнено исследование динамики испарения в слое жидкости под действием потока газа. Измерен средний расход испарения в зависимости от трех параметров: расхода газа, температуры и толщины слоя. Обнаружено, что эти параметры оказывают существенное влияние на интенсивность испарения и конвекцию в слое жидкости. Получены корреляционные зависимости расхода испарения от расхода потока инертного газа и температуры. Также обнаружено, что при увеличении толщины слоя жидкости расход испарения имеет локальный максимум. Локальный максимум существенно зависит от температуры жидкости и газа. При увеличении температуры газа и жидкости локальный максимум расхода испарения смещается к большему значению толщины слоя жидкости.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 12-08-01285а), Сибирского отделения РАН (проект партнерских фундаментальных исследований 96) и Европейского космического агентства (проект CIMEX).

Список литературы

- [1] Андреев В.К., Гапоненко Ю.А., Гончарова О.Н., Пухначев В.В. // Современные математические модели конвекции. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
- [2] Goncharova O.N., Kabov O.A. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2010. V. 53. P. 2795–2807.
- [3] Iorio C.S., Goncharova O.N., Kabov O.A. // Microgravity Sci. Technol. 2009. V. 21 (1). P. 313–320.
- [4] Iorio C.S., Kabov O.A., Legros J.-C. // Microgravity Sci. Technol. 2007. V. XIX-3/4. P. 27–29.
- [5] Scheid B., Margerit J., Iorio C.S., Joannes L., Heraud M., Queeckers P., Dauby P.C., Colinet P. // Experiments in Fluids. 2012. V. 52. P. 1107–1119.
- [6] Grishaev V., Amirfazli A., Chikov S., Lyulin Yu., Kabov O. // Microgravity Sci. Technol. 2012. V. 25 (1). P. 27–33.