

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 536.248

Распространение фронта испарения по неизотермической поверхности*

В.Е. Жуков, Е.Ю. Слесарева

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: zhukov@itp.nsc.ru

Проведены эксперименты на фреоне R21 при величине приведенного давления 0,04 в условиях естественной конвекции. Измерена скорость распространения самоподдерживающегося фронта испарения по поверхности теплоотдачи при наличии существенного градиента температуры вдоль поверхности теплоотдачи. Показана стабилизация скорости распространения фронта в соответствии со скоростью распространения изотермы. Проведенные эксперименты показали, что при распространении фронта испарения по теплоотдающей поверхности с существенным градиентом температуры стабилизация скорости фронта происходит на масштабе порядка капиллярной постоянной.

Ключевые слова: самоподдерживающийся фронт испарения, кризис теплоотдачи, фазовый переход, гидродинамическая устойчивость, метастабильная жидкость.

Самоподдерживающийся фронт испарения реализуется в системах с высокой метастабильностью прилегающего к теплоотдающей поверхности однофазного теплового слоя жидкости. Рост одиночного пузыря в таких условиях приводит к потере устойчивости межфазной поверхности и быстрому распространению паровой фазы в пределах метастабильного теплового слоя [1]. Существует несколько моделей, описывающих механизм подвода тепла к межфазной поверхности в окрестности лобовой точки фронта и форму межфазной поверхности [2–6]. Несмотря на различия в подходах к описанию механизмов подвода тепла, авторы едины в том, что скорость распространения фронта определяется степенью метастабильности прилегающего теплового слоя. В работах [2, 7] было показано, что зависимость скорости фронта от перегрева стенки относительно температуры насыщения наблюдается в двух областях. В первой области (при малых скоростях) интенсивность испарения определяется конвективным теплообменом противоточного движения метастабильной жидкости и паровой фазы, во второй (при больших скоростях) интенсификация теплообмена происходит в результате потери гидродинамической устойчивости межфазной поверхности в окрестности лобовой точки фронта. Для фреона R21 потеря гидродинамической устойчивости наблюдалась при скорости фронта 1 м/с и выше. В работе [8] измерялась скорость распространения самоподдерживающегося фронта испарения по трубчатым и плоскому нагревателям при постоянной

* Работа выполнена в ИТ СО РАН в рамках Федеральной программы научных исследований государственных академий наук на 2017–2020 гг. (тема III.18.2.3, АААА-А17-117030310025-3).

температуре стенки во фреоне R21. Была получена зависимость скорости фронта от температуры стенки.

Цель настоящей работы состоит в исследовании динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения в условиях существенного градиента температуры теплоотдающей стенки.

Эксперименты проводились на жидком фреоне R21 в условиях свободной конвекции при приведенном давлении $P/P_c = 0,04$. Жидкость находилась на линии равновесия с паром. Экспериментальный объем диаметром 250 мм и высотой 250 мм был оснащен четырьмя окнами, позволяющими проводить скоростную видеосъемку процесса распространения самоподдерживающегося фронта испарения. Видеосъемка выполнялась на частоте 25000 кадров в секунду. Подробное описание экспериментального стенда приведено в работах [7, 9]. Рабочий участок был изготовлен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм в форме равнобедренной трапеции. Малое основание трапеции имело размер 12 мм, большое — 24 мм, высота составляла 50 мм. Через рабочий участок в направлении от одного основания трапеции к другому пропускался ступенчатый импульс электрического тока постоянной амплитуды и заданной длительности (в пределах 10–30 мс). За счет изменения локальной площади сечения в направлении протекания электрического тока формировался градиент плотности внутреннего тепловыделения с максимальным значением на меньшем основании трапеции. На временах проведения эксперимента (до 30 мс) механизм конвективного теплообмена не успевал сформироваться и для расчета температуры теплоотдающей поверхности и прилегающего теплового слоя жидкости использовались уравнения нестационарной теплопроводности. Обработка данных проводилась путем покадрового измерения координаты фронта в выделенном направлении, совпадающем с градиентом температуры стенки. Мгновенная скорость фронта на каждом кадре определялась на временном масштабе 360 мкс (9 кадров).

На рис. 1 приведены опытные данные, полученные при двух значениях длительности импульса тепловыделения. Нулевое значение координаты находится на коротком основании трапеции. Движение фронта происходит в направлении от короткого основания

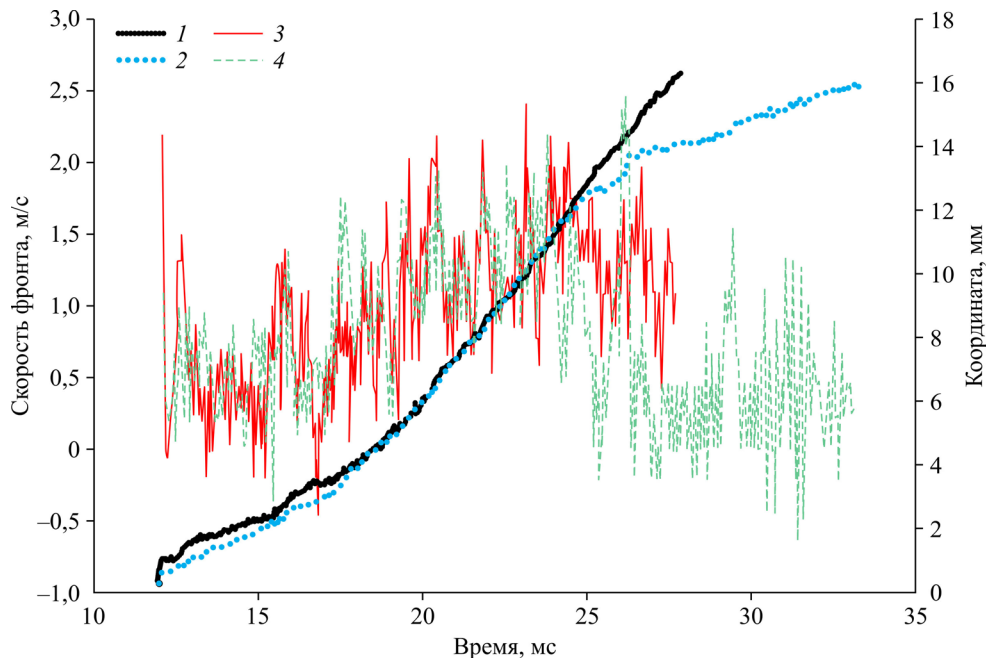


Рис. 1. Зависимость мгновенной координаты и мгновенной скорости лобовой точки фронта испарения от начала тепловыделения.

Скорость фронта при длительности тепловыделения 30 (1) и 24 (2) мс; координата лобовой точки при длительности тепловыделения 30 (3) и 24 (4) мс.

к длинному. В поле кадра видеосъемки попадает участок нагревателя в диапазоне координат 0–16 мм. На зависимости координаты лобовой точки фронта от времени наблюдаются три области. Первая область ($t < 20$ мс) соответствует ускоренному распространению фронта испарения. В этой области пространственная скорость изотермы стенки в направлении распространения фронта выше скорости лобовой точки фронта. Для рассматриваемых условий эксперимента скорость изотермы составляет 1,3 м/с. В соответствии с данными работы [8] такая скорость фронта соответствует перегреву стенки относительно температуры насыщения, равной 63 К. Таким образом, в случае отставания фронта от изотермы фронт оказывается в области более высокой температуры, что приводит к его ускорению. Увеличение скорости фронта до величины, большей 1,3 м/с, приводит к достижению лобовой точкой изотермы с перегревом 63 К и дальнейшим его движением синхронно с изотермой (область $t > 20$ мс). В момент прекращения тепловыделения распределение температуры по теплоотдающей поверхности в первом приближении фиксируется и фронт, продолжая движение, оказывается в области температур, соответствующих более низкой скорости распространения фронта, что приводит к его торможению. Приведенные на рис. 1 зависимости скорости фронта от времени с начала тепловыделения показывают, что распространение фронта испарения носит пульсирующий характер. На рис. 2 приведены зависимости амплитуды пульсаций скорости от частоты пульсаций, полученные с использованием дискретного преобразования Фурье. Зависимости представлены для областей разгона, стабилизации скорости и торможения лобовой точки фронта испарения. Характерный период низкочастотных пульсаций в области стабилизации скорости фронта составляет величину порядка 1 мс (частота 1000 Гц). Расстояние, пройденное фронтом за период пульсации при скорости 1,3 м/с, равно 1,3 мм, что соответствует величине капиллярной постоянной для фреона R21. Частота 4000–6000 Гц, на которой наблюдается второй максимум амплитудно-частотной характеристики, соответствует периоду 167–250 мкс, что соответствует масштабу порядка 220–320 мкм. По-видимому, данные пульсации определяются потерей гидродинамической

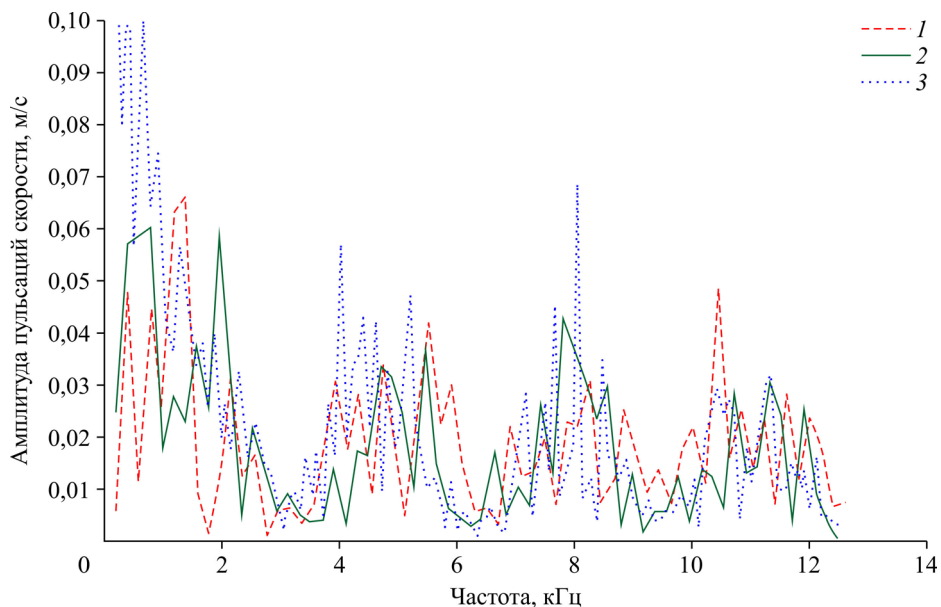


Рис. 2. Зависимость амплитуды пульсаций скорости лобовой точки фронта испарения от частоты гармоник.

1 — область разгона фронта, 2 — область стабилизации скорости фронта,
3 — область торможения фронта.

устойчивости межфазной поверхности. Пики в области частот 8 кГц соответствуют масштабу порядка 160 мкм (масштабу толщины теплового слоя). Пульсации в области 10–12 кГц соответствуют масштабу пиксельной дискретизации видеоизображения.

Проведенные эксперименты показали, что при распространении фронта испарения по теплоотдающей поверхности с существенным градиентом температуры стабилизация скорости фронта происходит на масштабе порядка капиллярной постоянной.

Список литературы

1. Okuyama K., Kozawa Y., Inoue A., Aoki S. Transient boiling heat transfer characteristics of R113 at large step-wise power generation // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1988. Vol. 31, No. 10. P. 2161–2174.
2. Павлеко А.Н., Лель В.В. Приближенная расчетная модель самоподдерживающегося фронта испарения // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6, № 1. С. 111–124.
3. Павлов П.А., Виноградов В.Е. Динамика формирования паровой пленки при быстром перегреве жидкости // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 5. С. 717–724.
4. Шарыпов О.В. Описание формы самоподдерживающегося фронта испарения в слое метастабильной жидкости // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 4. С. 41–47.
5. Авсентюк Б.П., Овчинников В.В. Третий кризис теплоотдачи при недогреве // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 2. С. 281–289.
6. Актершев С.П., Овчинников В.В. Модель стационарного движения межфазной поверхности в слое сильноперегретой жидкости // Прикл. механика и технич. физика. 2008. Т. 49, № 2. С. 47–55.
7. Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Tsoi A.N., Tairov E.A., Levin A.A. Investigation of transient processes at liquid boiling under nonstationary heat generation // J. Engng Thermophys. 2011. Vol. 20, No. 4. P. 380–406.
8. Жуков В.Е., Моисеев М.И., Слесарева Е.Ю. Динамика распространения самоподдерживающегося фронта испарения на плоском и цилиндрических нагревателях // Международный научный журнал «Инновационная наука». 2017. № 12. С. 32–34.
9. Zhukov V.E., Pavlenko A.N., Moiseev M.I., Kuznetsov D.V. Propagation dynamics of self-sustained evaporation front and characteristics of small-scale perturbations at the interface // 15th Intern. Heat Transfer Conf. 2014. P. 2487–2500.

*Статья поступила в редакцию 2 июля 2020 г.,
после доработки — 7 июля 2020 г.,
принята к публикации 5 августа 2020 г.*