УДК 536.248

ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НОРМАЛЬНОЙ И МИКРО- ГРАВИТАЦИИ

Жуков В.Е., Кузнецов Д.В., Моисеев М.И., Барташевич М.В.

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

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00178).

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментального исследования динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения при ступенчатом тепловыделении на горизонтально ориентированной цилиндрической поверхности технической шероховатости во фреоне-21 в условиях свободной конвекции. Получены опытные данные по скорости распространения и структуре межфазной границы фронтов испарения как в условиях нормальной гравитации, так и в условиях микрогравитации на уровне 0.005g. Микрогравитация создавалась свободным падением рабочего объема в течение 0.1 с, при временах развития процесса до 0.07 с. Показано, что значительное уменьшение гравитации не привело к существенным изменениям зависимости скорости распространения самоподдерживающегося фронта испарения от метастабильности теплового слоя.

В условиях нормальной гравитации получены опытные данные по динамике развития мелкомасштабных возмущений межфазной границы в пределах масштаба теплового слоя. Показано, что возмущения развиваются в направлении поперечном тепловому слою и имеют практически одинаковые характеристики при скоростях распространения фронта испарения 0.58 и 3.9 м/с.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение переходных процессов при кипении в условиях резко изменяющейся во времени тепловой нагрузки является предметом интенсивных исследований в последнее время. С одной стороны это связано с разработкой микроустройств различного назначения, технологий обработки материалов и создания модифицированных поверхностей с заданными свойствами при интенсивных нестационарных тепловых воздействиях [1, 2]. Предельные значения удельных тепловых потоков, воспринимаемых охлаждающими жидкостями от тепловыделяющих поверхностей, ограничены кризисом теплоотдачи. Поэтому исследованиям критических тепловых нагрузок, а также механизмов развития критических явлений в стационарных и нестационарных условиях работы разнообразных теплопередающих устройств уделяется большое внимание. В области низких приведенных давлений развитие самоподдерживающихся фронтов испарения вдоль тепловыделяющей поверхности при нестационарном тепловыделении является важнейшим фактором перехода к пленочному режиму кипения при значительно более низких тепловых потоках, чем критические тепловые потоки при стационарном тепловыделении. Чрезвычайная сложность взаимосвязанных процессов теплообмена и гидродинамики жидкости у межфазной границы, а также учет возникающей гидродинамической неустойчивости фронта, структурообразования, неравновесности испарения и термокапиллярных эффектов затрудняют их строгое математическое описание.

В работах [3 – 6] представлены различные подходы к модельному описанию самоподдерживающегося фронта испарения. В основном, авторы моделей сходятся в том, что испарение происходит на межфазной границе движу-

© Жуков В.Е., Кузнецов Д.В., Моисеев М.И., Барташевич М.В.

щегося вдоль поверхности нагрева парового фронта за счет тепла, запасенного в метастабильном слое жидкости. Интенсивность испарения и скорость распространения фронта, определяется интенсивностью конвективной теплоотдачи в жидкости в окрестности лобовой точки фронта испарения. Многими авторами отмечалось формирование мелкомасштабных возмущений на межфазной границе, но были лишь единичные попытки установления причинно-следственной связи между интенсивностью, линейными масштабами возмущений на межфазной границе и скоростью распространения фронта испарения. В работе [4] предложена приближенная модель для расчета скорости распространения фронта испарения с учётом развития барокапиллярной неустойчивости Ландау. Приведенная в работе формула, для определения порогового значения плотности теплового потока через межфазную границу, содержит зависимость от произведения коэффициента поверхностного натяжения и ускорения силы тяжести в степени 0.25. В работе [7] авторы рассматривают развитие неустойчивости межфазной границы при росте пузыря пара в локально перегретом объеме жидкости *н*-гептана. Для описания развития неустойчивости авторы используют модифицированное дисперсионное уравнение Ландау для плоской границы раздела с учетом капиллярных сил и без учета силы гравитации.

В работе [8] авторы показывают, что гравитационными и капиллярными силами можно пренебречь при развитии мелкомасштабных возмущений на межфазной границе воды в условиях интенсивного испарения.

Целью данной работы является экспериментальное изучение динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения и динамики формирования мелкомасштабных возмущений межфазной границы в условиях нормальной и уменьшенной гравитации.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на фреоне-21 при приведенных давлениях P/P_{cr}= 0.037 (0.193 МРа). Исследования динамики переходных процессов и теплообмена при нестационарном тепловыделении в условиях свободной конвекции проводились на стенде, подробное описание котрого приведено в [9]. Для проведения исследований в условиях уменьшенной гравитации стенд был дооснащен специальным устройством, обеспечивающим свободное падение рабочей камеры.

Рабочая камера представляет собой герметичный цилиндрический сосуд из нержавеющей стали. Внутренний диаметр камеры – 250 мм, высота рабочего пространства – 250 мм. Рабочая камера оснащена окнами для визуальных наблюдений и видеосъемки. В качестве рабочих участков использовались две цилиндрические трубки из нержавеющей стали длиной 50 мм, внешним диаметром 3 мм и внутренним диаметром 2 мм с различной шероховатостью поверхности. Шероховатость поверхности нагревателя №1 представлена поперечными рисками шириной 5 - 25 мкм. Шероховатость поверхности нагревателя №2 – крупными кавернами радиусом 100 - 150 мкм и глубиной 20 мкм. Кроме того, поверхность нагревателя №2 имеет зернистую структуру с зернами 5 – 20 мкм. Нестационарное тепловыделение на рабочем участке создавалось управляемым источником постоянного тока, который обеспечивал длительность фронта токового сигнала не более 1 мс.

Управление источником тока и измерение сигналов датчиков осуществлялось через персональный компьютер посредством платы 16-разрядного 16-канального АЦП с частотой 1 МГц и платы ЦАП. Температура рабочих участков в квазистационарных режимах измерялась платиновыми термометрами сопротивления HEL-700 номинального сопротивления 1000 Ом. С использованием такого же термометра измерялась температура в объеме жидкости. Постоянная времени термометров, установленных на рабочем участке, составила 1 с. Средняя по длине температура рабочего участка в переходных процессах измерялась по температурной зависимости сопротивления участка. Для этого в средней части каждого рабочего участка на отрезке 31 мм измерялось падение напряжения. В каждом измерении проводилась калибровка по температуре невозмущенной жидкости. Такая методика позволила измерять среднюю температуру рабочего участка с ошибкой не более ±3 К.

При ступенчатом тепловыделении проведено сравнение динамики изменения измеренной температуры стенки с расчетом для

режима нестационарной теплопроводности. Сравнение измеренного в переходном процессе температурного напора на временах менее времени развития конвекции показало хорошее соответствие эксперимента и численного расчета.

До момента вскипания жидкости зависимость от времени мгновенной температуры стенки определялась по вольтамперной характеристике рабочего участка. С момента образования паровой фазы на измеряемом отрезке рабочего участка температура стенки бралась из расчета по уравнениям нестационарной теплопроводности. Такой подход справедлив при достаточно больших скоростях разогрева рабочего участка, когда конвективный механизм отвода тепла от стенки не успевает развиться.

Визуальные наблюдения динамики образования и распространения паровой фазы на теплоотдающей поверхности фиксировались высокоскоростной цифровой видеокамерой Phantom v7.0. Скорость съёмки в условиях нормальной и уменьшенной гравитации составляла 10000 кадров в секунду с экспозицией 26 мкс. В условиях нормальной гравитации также проводилась съемка при скорости 25000 кадров в секунду. Для измерения скорости распространения парового фронта использовалось прилагаемое к камере программное обеспечение. Погрешность измерения средней скорости на участе вдоль нагревателя 6-12 мм не превышала 0.05 м/с, мгновенной скорости на масштабе 5 кадров - в пределах 10%.

Условия уменьшенной гравитации реализовались во время свободного падения рабочего объема в продолжение 100 мс. Суммарное время разогрева рабочего участка, образования самоподдерживающегося фронта испарения и его распространения не превышало 70 мс. Фотография стенда с устройством, обеспечивающим условия микрогравитации, приведена на рис. 1. Рабочая камера (5), соединенная со штоком (3) подвешена на капроновой нити (1) к закрепленному на потолочной балке корпусу устройства. При обрезании нити рабочая камера со штоком начинает свободное падение. Начало движения штока приводит к срабатыванию оптронного синхронизатора (7), который вырабатывает синхроимпульс, запускающий видеокамеру (6) и ступенчатое тепловыделение на рабочем участке. Процесс вскипания наблюдается через окно (4). Торможение рабочего объема осуществляется с помощью пружинных амортизаторов (2). Максимальные перегрузки при торможении – 10 *g*.

Для определения ускорения, с которым падал рабочий объем, использовались данные высокоскоростной видеосъемки. Покадрово определялась координата *y* фиксированной точки рабочего участка и строилась зависимость данной координаты от времени *y(t)*. Зависимость хорошо апроксимировалась полиномом второй степени, вторая производная от которого давала величину ускорения системы. Величина гравитации определялась через ускорение системы в долях от нормальной для данной широты гравитации. Было проведено более 40 опытов в условиях уменьшенной гравитации. Среднее значение гравитации составило 0.0056±0.004 *g*.

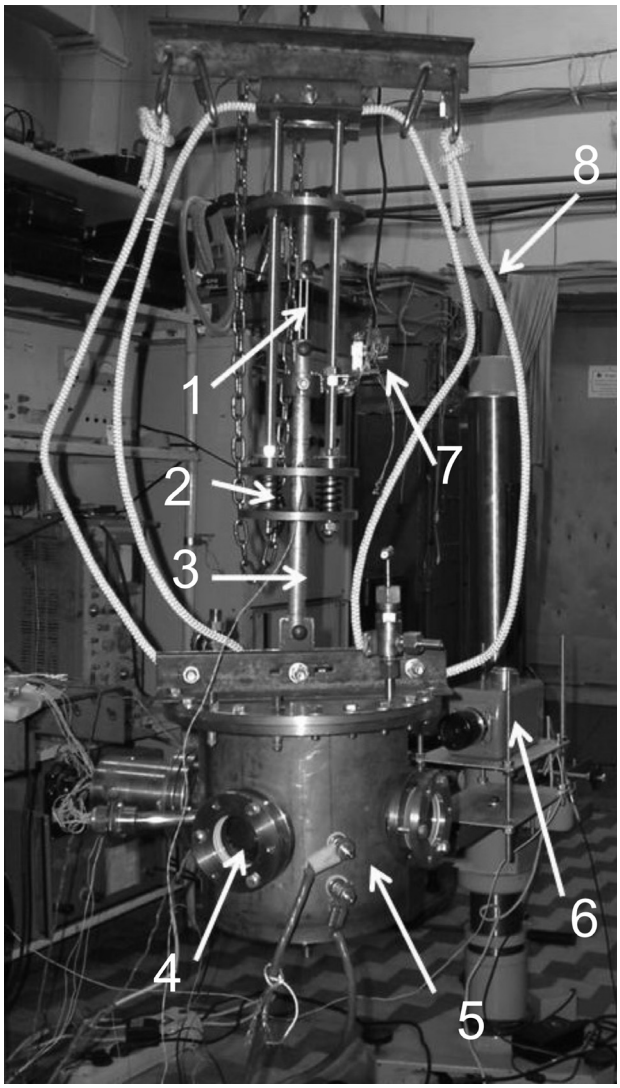

Рис.1 Фотография стенда.

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ПРИ НОРМАЛЬНОЙ И УМЕНЬШЕННОЙ ГРАВИТАЦИИ

Эксперименты в данной серии опытов проводились на фреоне-21 ($CHCl_2F$). Жидкость в опытах находилась на линии равновесия с паром. Опыты проводились при горизонтальной ориентации тепловыделяющего элемента. Эксперименты были проведены как на нагревателе №1, так и на нагревателе №2. В данной работе приводятся данные, полученные на нагревателе №2.

На нагреватель подавался прямоугольный импульс тока силой 420 А, что соответствовало темпу разогрева 2180 К/с. Поскольку нагреватель обладал достаточно большой инерционностью, то разогрев стенки происходил на временах развития фронта испарения (порядка 50 мс) практически линейно от времени (начальный участок экспоненты). Опыты проводились по двум различным методикам.

Первая методика предусматривала подачу ступенчатого тепловыделения длительностью, которая обеспечивала разогрев рабочего участка до температуры, превышающей температуру насыщения жидкости на 100 К. Сформировавшийся в таких условиях фронт испарения распространялся с ускорением при постоянно меняющейся (близко к линейному закону) температуре стенки.

Вторая методика предусматривала разогрев теплоотдающей поверхности до требуемой температуры, варьируя время импульса. Ступенчатое отключение нагревателя прекращало тепловыделение внутри стенки, а поскольку, теплопроводность жидкости на два порядка меньше теплопроводности стенки и нагреватель имеет значительную инерционность, то температура стенки оставалась практически постоянной на временах распространения фронта испарения. Численный расчет по уравнениям теплопроводности показал, что за время прохождения фронта температура стенки перед фронтом изменяется не более, чем на 0.2 К. Таким образом, в каждом опыте исследовалось распространение самоподдерживающегося фронта испарения при заданной постоянной температуре стенки.

Определение средней скорости фронта на коротком промежутке времени (5 кадров видеосъемки) дает значительный разброс данных вследствие пульсации фронта при движении. Для получения осредненной зависимости скорости от перегрева стенки в условиях нарастающей температуры стенки (методика 1) определялась средняя скорость на интервале температур 3 К.

Определение средней скорости при фиксированном перегреве стенки (методика 2) проводилось измерением времени прохождения фронтом отрезка длиной 6 – 12 мм. Достижение требуемой температуры стенки обеспечивалось прямоугольным тепловым импульсом необходимой длительности при фиксированной величине темпа разогрева теплоотдающей поверхности.

Данные по скорости распространения фронта испарения при нормальной и уменьшенной гравитации представлены на рис. 2. Данные, полученные в условиях нормальной гравитации, показаны символами 1, 3. Данные для условий с гравитацией 0.005g показаны символами 2, 4. Данные 1, 2 получены по методике 2 (распространение фронта при постоянной температуре стенки), данные 3, 4 – по методике 1 (распространении фронта в условиях растущей температуры стенки). Линия 5 – расчет по модели [4]. Линии 6 и 7 – расчет скорости фронта при которой развивается неустойчивость Ландау при достижении плотности теплового потока через межфазную границу пороговой величины в соответствии с формулой (1) из [4]. Линия 6 – расчет для условий нормальной гравитации, линия 7 – расчет для условий гравитации 0.0056 g.

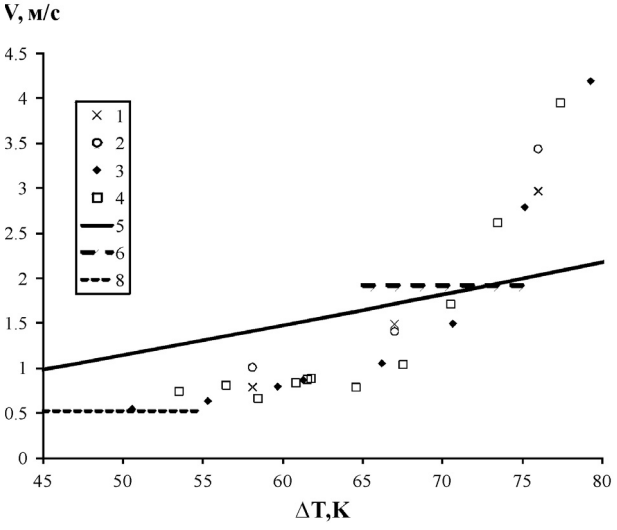

Рис.2 Зависимость скорости фронта испарения от перегрева стенки.

$$q = \sqrt{2}\cdot r(sg/(r_L - r_V))^{0.25}(r_L \cdot r_V)^{0.5} \quad (1)$$

Как видно из диаграммы, наблюдаются две области с различным темпом изменения скорости парового фронта в зависимости от роста температуры. В области низких перегревов опытные данные удовлетворительно описываются расчетом по модели [4]. В области высоких перегревов, как и в работах [4,9], наблюдается существенно больший темп роста скорости фронта от перегрева стенки. Не наблюдается влияния величины гравитации на характер зависимости скорости фронта от перегрева стенки в пределах погрешности измерений. Результаты экспериментов показали низкую чувствительность системы к изменению гравитации. Известно, что процессы в микросистемах мало зависят от гравитации, и эффект гравитации уменьшается с уменьшением размеров системы. По-видимому, доминирующими факторами, оказывающими влияние на развитие неустойчивости межфазной поверхности, являются барокапиллярные эффекты.

ЭВОЛЮЦИЯ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ

В опытах по методике 2 при постоянной температуре стенки средняя скорость фронта оставалась постоянной. Пульсирующее распространение фронта проявлялось в периодическом ускорении и замедлении движения отдельных участков межфазной границы. На фронте формируются мелкомасштабные возмущения, создающие ячеистую структуру межфазной границы. На рис. 3 приведены фрагменты видеосъемки распространяющегося фронта испарения при перегреве стенки 76 К, как в условиях нормальной гравитации, так и при микрогравитации. Как видно на фотографиях, не наблюдается какого-либо влияния гравитации на характер формирования мелкомасштабных возмущений межфазной границы.

Для детализации процесса формирования мелкомасштабных возмущений была проведена макровидеосъемка распространения фронта испарения при освещении объекта в проходящем свете (рис. 4). Опыт проводился при перегреве стенки 76 К. В качестве источника освещения использовался лазерный нивелир с длиной волны 650 нм. Распространение фронта наблюдалось на верхней образующей нагревателя. При разогреве нагревателя вблизи стенки формировался тепловой слой. Изменение коэффициента преломления с изменением температуры создавало теневую

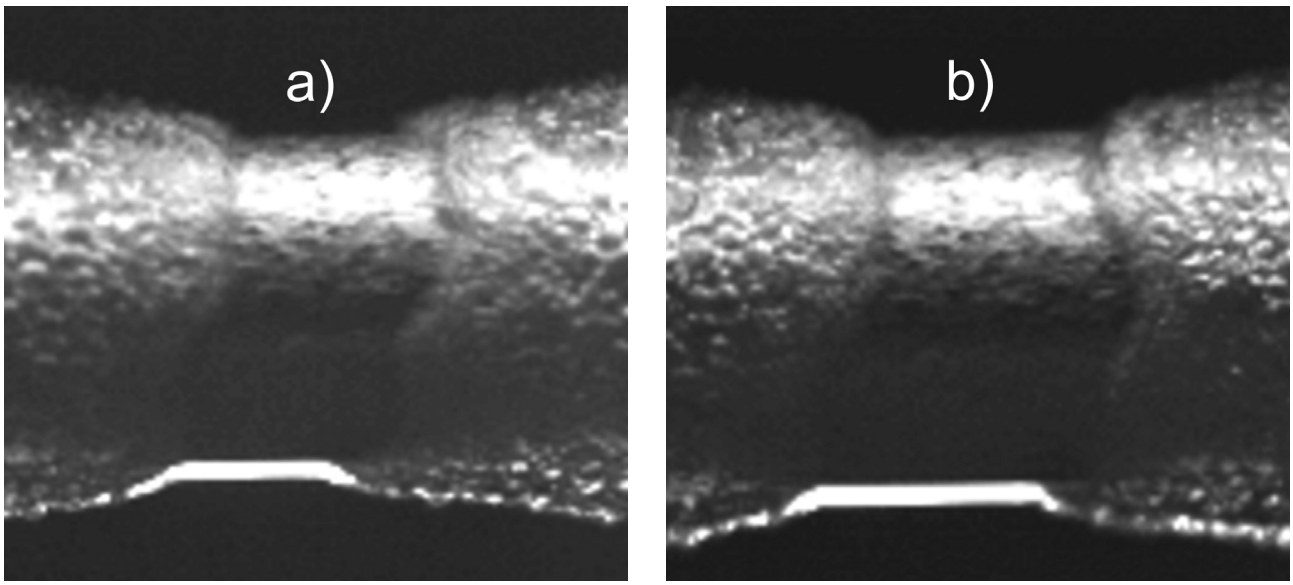

Рис.3 Самоподдерживающийся фронт испарения в условиях нормальной (a) и микрогравитации (b).

картину теплового слоя. На рисунке показана толщина теплового слоя (112 мкм) для данных условий. Пунктирная линия – граница теплоотдающей поверхности. Видно, что тепловой слой перед фронтом не возмущен. Фронт испарения проникает в тепловой слой примерно на две трети толщины без деформации теплового слоя. Далее наблюдается рост толщины парового слоя с одновременным оттеснением теплового слоя перегретой жидкости.

На этом участке явно наблюдается потеря устойчивости межфазной границы, ее значительное искривление и развитие парового языка на масштабе теплового слоя. После быстрого роста паровые выбросы резко замедляются. Из кинограмм следует, что характерный продольный размер сформировавшихся языков практически совпадает с толщиной теплового слоя.

Как показывают оценки, полученные по результатам видеосъемки, при данных условиях скорость распространения фронта составляет 3.9 м/с, а скорость роста возмущений межфазной границы – 2 – 2.5 м/с. Размер возмущений - до 100 мкм в направлении роста при поперечном размере порядка 20 – 40 мкм. Проведенные видеосъемки при перегреве стенки 50 К показали качественно аналогичную картину. Скорость распространения фронта составила 0.58 м/с, а скорость роста возмущений межфазной границы – 0.9 - 1.6 м/с. Характерные размеры возмущений на стадии роста через метастабильный слой примерно такие же, как и при перегреве 76 К.

Для изучения влияния мелкомасштабных возмущений на среднюю скорость распространения фронта испарения необходимы дальнейшие детальные исследования характеристик скорости их роста, характерных масштабов и их зависимости от массовых сил и приведенного давления. Варьирование этих параметров в широком диапазоне позволит исследовать влияние массовых сил, неравновесных эффектов испарения, противодавления, взаимосвязных термокапиллярных эффектов на динамику развития данных переходных процессов.

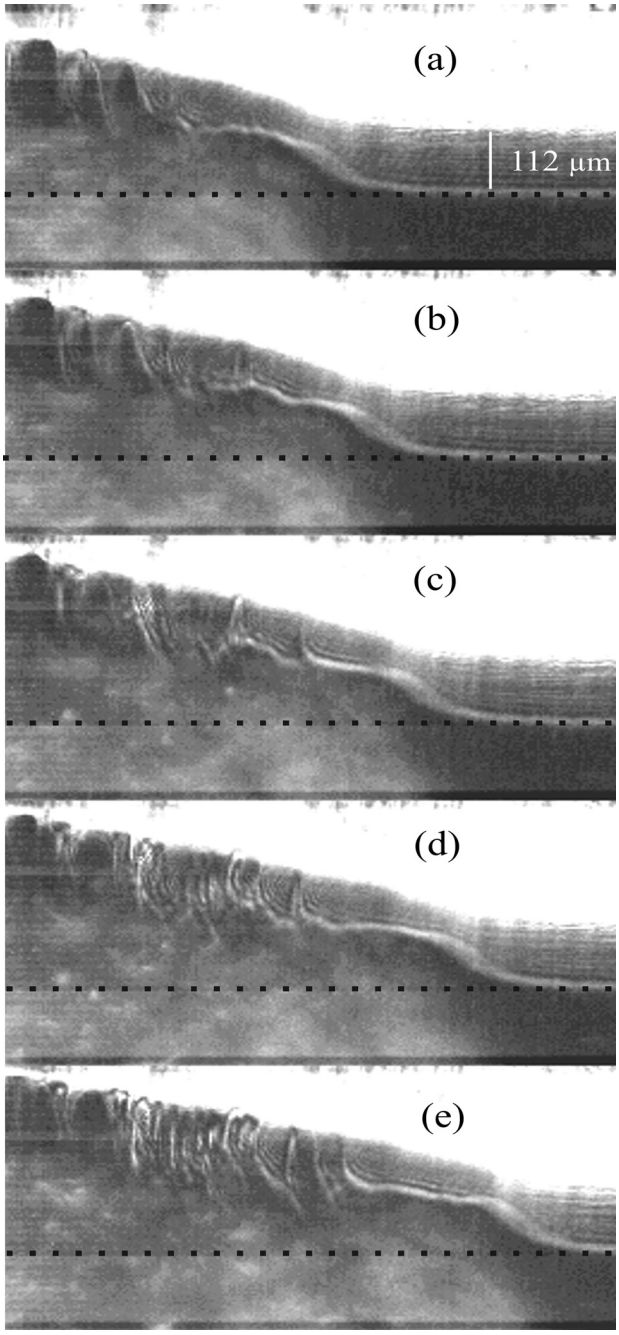

Рис.4 Эволюция возмущений межфазной границы. (a) - 35.92 ms; (b) - 35.96 ms; (c) - 36.00 ms; (d) - 36.04 ms; (e) - 36.08 ms.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения в условиях нормальной гравитации и в условиях микрогравитации показали, что:

- не обнаружено заметного влияния величины гравитации на скорость распространения фронта испарения и на характер мелкомасштабных возмущений межфазной границы;

- мелкомасштабные возмущения формируются в результате развития неустойчивости межфазной границы в зоне оттеснения перегретого слоя жидкости растущим паровым слоем;
- скорость роста возмущений и их характерные масштабы мало зависят от скорости распространения самоподдерживающегося фронта испарения для скоростей фронта 0.58 и 3.9 м/с. Характерный продольный размер быстрорастущих языков соизмерим с толщиной теплового слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Okuyama K.,Takehara R., Iida Y., and Kim J. Pumping action by boiling propagation in a microchannel // Microscale Thermophys. Eng., 2005, vol. 9, no. 2, pp. 119-135.
2. Huai X., Wang G., Jin R.,Yin T., and Zou Y. Microscopic explosive boiling induced by a pulsed-laser irradation // Heat Mass Transfer,2008, vol.45, pp. 117-126.
3. Avksentyuk B. P. Non-equilibrium model of an evaporation front // Russian Journal of Engineering Thermophysics, 1995, vol. 5, pp. 1-8.
4. Pavlenko A. N., Lel V.V. Model of self-maintaining evaporation front for superheated liquids // Proceedings of the Third Intern. Conf. on Multiphase Flow, ICMF-98, Lyon, France, June 8-12, no. 4. 3-5., Prod. By File M-www. filem. com.,1998, 10 p.
5. Aktershev S. P., Ovchinnikov V. V. Model of stationary motion of multiphase surface in the layer of extremely heated liquid // J. Appl. Mech. Tech. Phys., 2008,vol. 49, no.2, pp. 47-55.
6. Pavlov P.A., Vinogradov V.E. Dinamics of vapor film formation upon rapid superheating of liquid // High Temperature, 2010, T. 48, vol 5, pp 683-690.
7. Syromyatnikov S.N., Pavlov P.A. Instability of evaporating surface // High Temperature, 1998, T. 36, vol 2, pp 282-286.
8. O. A. Sinkevich, V. V. Glazkov, Yu. P. Ivochkin and A. N. Kireeva Vapor Films under Influence of High Heat Fluxes:Nongravity Surface Waves and Film Explosive Disintegration// Int. J. Nonlinear Sci. Numer. Simul. 2013; 14(1): 1 – 14
9. Жуков В. Е., Павленко А.Н., Суртаев А. С., Моисеев М. И. Динамика вскипания и кризисные явления при ступенчатом тепловыделении в условиях свободной конвекции во фреоне-21 // Труды Пятой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-5).– 25-29 октября 2010, Москва. – 2010. – Т. 4. – С. 84-87. *Zhukov V.E., Pavlenko A.N., Surtaev A.S., and Moiseev M.I. Boiling-up dynamics and crisis phenomena at stepped heat release under the conditions of free convection in Freon-21 // Proceedings of the 5th Russian National Conference on Heat Transfer (RNCHT-5).– October 25-29, 2010, Moscow. – 2010. – Vol. 4. – P. 84-87*

© Жуков В.Е., Кузнецов Д.В., Моисеев М.И., Барташевич М.В.