УДК 536.248

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ВО ФРЕОНЕ – 21

Жуков В.Е., Моисеев М.И.

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 различной шероховатости во фреоне-21 в условиях свободной конвекции. Получены опытные данные по скорости распространения и структуре фронтов испарения, проведен анализ спектра пульсации межфазной границы при различной метастабильности теплового слоя. Показано, что существенное изменение шероховатости рабочего участка не привело к значительным изменениям скорости распространения фронта испарения. Установлена связь между частотой основной гармоники пульсации скорости межфазной границы и скоростью распространения фронта испарения. Показано, что отношение амплитуды основной гармоники пульсации скорости фронта испарения к средней скорости фронта уменьшается с ростом скорости в диапазоне скорости фронта до 0.5 м/с. При более высоких скоростях отношение остается на постоянном уровне.

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]. Для других приложений актуальность данных исследований определяется необходимостью обеспечения устойчивой и безопасной работы теплообменных систем различного функционального назначения при наличии интенсивных пульсаций теплового потока, например, при расчетах тепловой стабилизации устройств с использованием сверхпроводящих материалов, электронного оборудования и т. д. 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. Инициирование самоподдерживающихся фронтов испарения в стекающих пленках жидкости при набросах тепла приводит к интенсивному выбросу жидкости в виде капель и быстрому осушению теплоотдающей поверхности [3,4]. 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.

Практическая значимость таких исследований также обусловлена необходимостью создания надежных систем защиты при аварийной разгерметизации устройств, содержащих жидкости при высоких давлениях и температурах (например, атомные и химические реакторы, емкости со сжиженным газом). Переход в равновесное двухфазное состояние также носит в этих случаях взрывной характер и получило название «flashing”.

В работах [5 – 8] представлены различные подходы к модельному описанию самоподдерживающегося фронта испарения. В основном, авторы моделей сходятся в том, что испарение происходит на межфазной границе движущегося вдоль поверхности нагрева парового фронта за счет тепла, запасенного в метастабильном слое жидкости. Интенсивность испарения, а, следовательно, 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 [6] предложена приближенная модель описания распространения фронта испарения с учётом развития барокапиллярной неустойчивости Ландау.

В работе [9] авторы исследуют влияние наноразмерных добавок на динамику распространения самоподдерживающегося фронта испарения. Существенное увеличение скорости фронта в присутствии наноразмерных добавок авторы предположительно связывают с изменением динамических характеристик межфазной границы в условиях интенсивного испарения жидкости, содержащей добавки наноразмерных частиц. Также на динамику развития паровой полости может сказаться осаждением частиц на поверхность.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния шероховатости поверхности теплоотдачи на динамику распространения фронта испарения, изучение динамических и структурных характеристик межфазной границы самоподдерживающегося фронта испарения.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проводились на фреоне-21 при приведенных давлениях P/P_{cr}= 0.037 (0.193 MPa). Для проведения экспериментальных исследований теплообмена и динамики переходных процессов при нестационарном тепловыделении в условиях свободной конвекции создан стенд, подробное описание котрого приведено в [10].

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. Фотографии поверхности рабочих участков показаны на рис. 1.

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 в 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.

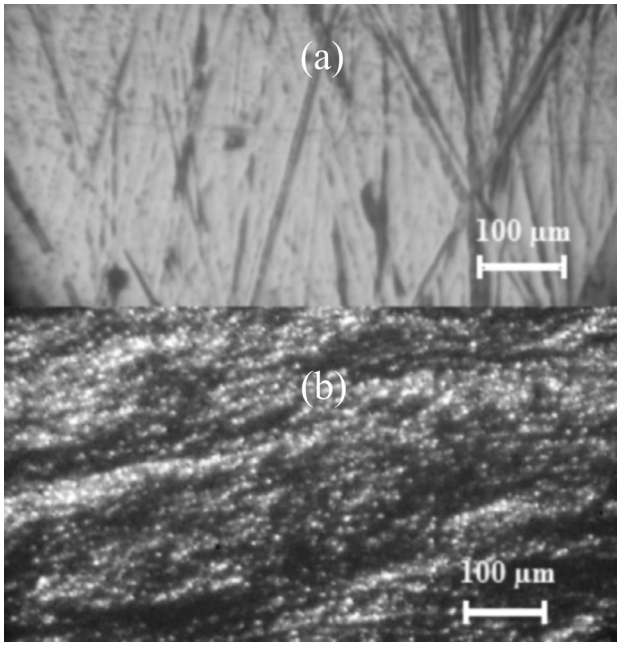

Рис.1 Фотографии поверхности рабочих участков. а – нагреватель №1; б – нагреватель №2.

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 составляла 25000 (в отдельных опытах до 50000) кадров в секунду с экспозицией 26 мкс. 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%..

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ РАЗЛИЧНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

Эксперименты в данной серии опытов проводились на фреоне-21 ($CHCl_2F$). Жидкость в данных опытах находилась на линии равновесия с паром. Опыты проводились при горизонтальной ориентации тепловыделяющего элемента.

На нагреватель подавался прямоугольный импульс тока силой 300, 420 или 600 А (соответствующие темпы разогрева – 1090, 2180 и 4500 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 (практически по 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 рас-

пространения 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 зависимости скорости от перегрева стенки, в условиях нарастающей температуры стенки (методика 1), строилась зависимость от времени координаты лобовой точки фронта на фиксированной образующей. Отдельно, в области малых перегревов (DT < 55 К) и в области больших перегревов (DT > 65 К), проводилась интерполяция зависимости координаты от времени. Дифференцированием по времени интерполяционных зависимостей были получены зависимости мгновенной скорости фронта с осредненными пульсациями от перегрева стенки в области малых и больших перегревов.

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 трех величинах темпа разогрева теплоотдающей поверхности.

Данные по скорости распространения фронта испарения на поверхностях с различной шероховатостью представлены на рис. 2.

Данные, полученные при распространении фронта в условиях растущей температуры стенки (методика 1), показаны линиями 1 (нагреватель №1) и 2 (нагреватель №2). Линия 3 – расчет по модели [5]. Символами показаны значения средней скорости фронта, измеренной при постоянной температуре теплоотдающей поверхности (методика 2). Закрашенные символы относятся к нагревателю №1, незакрашенные символы – нагреватель №2. Данные 4,5 – темп разогрева 1090 К/с; 6,7 – 2180 К/с; 8,9 – 4500 К/с.

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 [6].

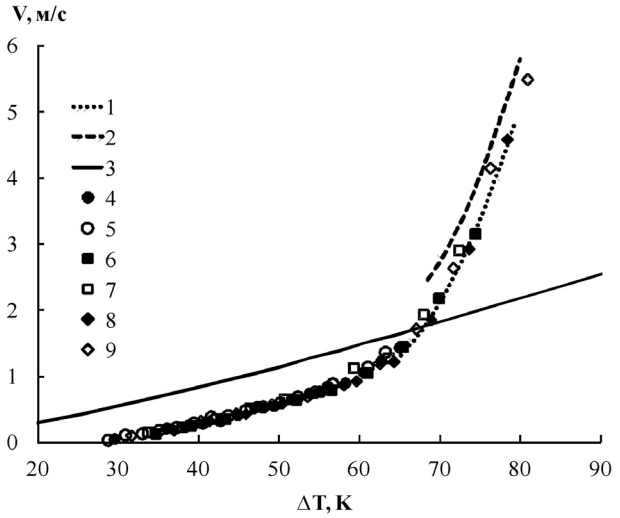

Рис.2 Зависимость скорости фронта испарения от перегрева стенки.

В области высоких перегревов, как и в работах [6,9], наблюдается существенно больший темп роста скорости фронта от перегрева стенки. Данные, полученные по методике 2 для рабочих участков с разной шероховатостью, совпадают между собой в пределах погрешности. Также не отмечается влияние разных темпов разогрева стенки до постоянной температуры. В то же время наблюдается различие между данными, полученными по методике 1 для нагревателей №1 и2 в условиях ускоряющегося фронта испарения при постоянном разогреве теплоотдающей поверхности. В области больших скоростей, при одних и тех же перегревах стенки, данные, полученные по методике 2, лежат между данными, полученными по методике 1 для различных нагревателей. При этом наблюдается более высокая скорость фронта на нагревателе с большей шероховатостью. Поскольку нагреватели имели собственную температурную градуировку для каждого из них, то эффект влияния шероховатости следует рассматривать на уровне величины систематической погрешности в определении перегрева стенки, В данном случае, смещение данных по оси температур в пределах 2 К приводит к вырождению эффекта.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ 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 межфазной границы. Процесс снимался на высокоскоростную цифровую камеру. С помощью специально написанной нами программы на каждом кадре определялась линия межфазной границы. На рис. 3 приведен пример распространения фронта испарения при температуре 67 К. До этой температуры стенка разогревалась с темпом 2180 К/с. Временной интервал между линиями – 80 мкс. Направление распространения фронта – справа налево.

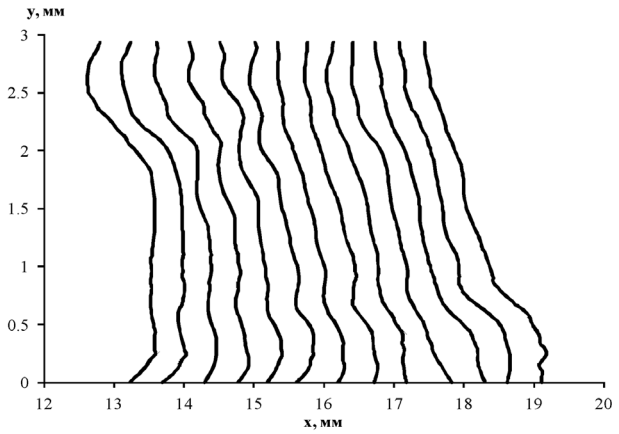

Рис.3 Эволюция межфазной границы при распространении фронта испарения.

По полученным данным определялась средняя скорость фронта V_0. Для исследования колебаний межфазной границы бралась зависимость координаты x от времени по одной из образующих нагревателя, то есть для фиксированного значения координаты y. Из полученной зависимости вычитался линейный тренд, соответствующий расстоянию, пройденному при постоянной скорости V_0. К отклонениям координаты от пути при постоянной скорости применялось преобразование Фурье. Характерный вид спектра показан на рис. 4. Спектр получен при анализе распространения фронта испарения на временном интервале 18 мс при температуре стенки 35 К. До этой температуры стенка разогревалась с темпом 2180 К/с.

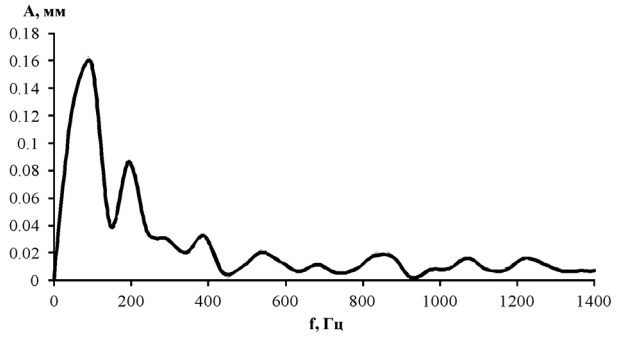

Рис.4 Пример спектра колебаний межфазной границы.

Во всех спектрах наблюдается выраженный пик основной гармоники. Зависимость частоты и амплитуды этого пика от средней скорости представлена на рис. 5. Символом 1 обозначена частота основной гармоники, символом 2 – ее амплитуда.

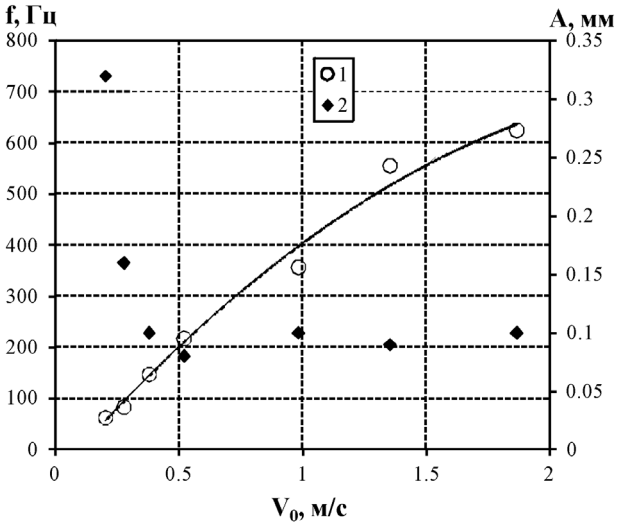

Рис.5 Зависимость частоты и амплитуды основной гармоники от средней скорости фронта испарения.

Из графиков видно, что частота основной гармоники возрастает с увеличением средней скорости, а амплитуда сначала уменьшается, потом выходит на постоянное значение.

За время одного периода основной гармоники фронт испарения проходит цикл разгона и торможения. При этом фронт перемещается на расстояние d равное произведению средней

скорости фронта V_0 на период основной гармоники. На рис. 6 показана зависимость d(V_0) (символы 1). Как видно из графика, линейный масштаб d остается практически постоянной величиной в пределах 2.5 – 3.5 мм в исследованном диапазоне средней скорости фронта испарения. Также на рисунке приведена зависимость отношения амплитуды скорости пульсации фронта к средней скорости фронта. Амплитуда скорости пульсации определялась как произведение амплитуды основной гармоники на круговую частоту.

При малых величинах средней скорости (и, соответственно, малых значениях перегрева) колебания межфазной границы имеют более выраженный характер. Возникают редкие возмущения с большей амплитудой, которые могут существенно искривлять межфазную границу. При больших значениях средней скорости возмущения возникают с большей частотой, и единичное отклонение не успевает достичь большой амплитуды до развития соседних возмущений, то есть межфазная граница приближается к квазиплоской. По рис. 5 и 6 можно условно определить значение средней скорости, при котором начинается переход к квазиплоскому фронту, как 0.5 м/с. Это значение примерно соответствует точке перегиба на графике зависимости средней скорости от температурного напора (рис. 2). На основании вышеописанных наблюдений можно заключить, что характеристики развития быстрорастущих мелкомасштабных возмущений на межфазной поверхности оказывают существенное влияние на характер зависимости скорости распространения самоподдерживающегося фронта испарения от температурного напора.

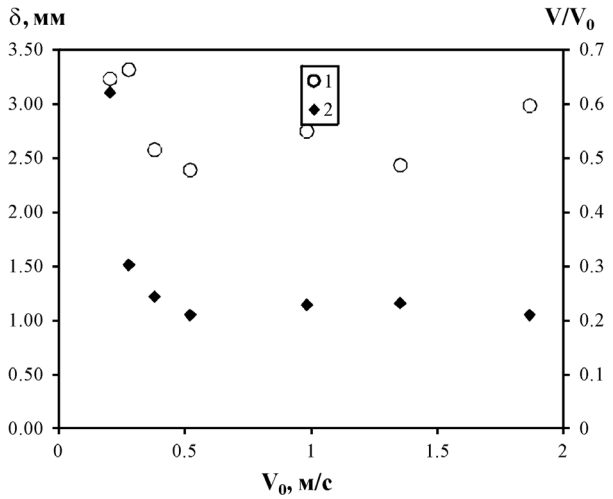

Рис.6 Зависимость линейного масштаба d и относительной скорости основной гармоники пульсации фронта от седней скорости фронта испарения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что при данной величине перегрева теплоотдающей поверхности относительно равновесной температуры жидкости при данном давлении, скорость самоподдерживающегося фронта испарения одна и та же, как в условиях ускоряющегося фронта, так и в условиях фронта, распространяющегося с постоянной средней скоростью при фиксированном перегреве стенки. Существенное изменение шероховатости рабочего участка не привело к значительным изменениям скорости распространения фронта испарения. Наблюдаемый эффект находится в пределах точности измерений.

Установлена связь между частотой основной гармоники пульсации скорости межфазной границы и скоростью распространения фронта испарения. Обнаружено, что процесс разгона и торможения зон фронта испарения в выделенных вдоль образующей цилиндрического нагревателя направлениях наблюдается на практически одинаковом масштабе (2.5 – 3.5 мм) в диапазоне скоростей 0.2 – 2 м/с. Показано, что отношение амплитуды основной гармоники пульсации скорости фронта испарения к средней скорости фронта уменьшается с ростом скорости в диапазоне скорости фронта до 0.5 м/с. При более высоких скоростях отношение остается на постоянном уровне.

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. Pavlenko A.N., Chekhovich V.Yu. Interconnection between dynamics of liquid boiling-up and heat transfer crisis for nonstationary heat release // Journal of Engineering Thermophysics, Vol.16, №3, 2007, pp.175-187.
4. Pavlenko A.N., Surtaev A.S., Starodubtseva I.P., Volodin O.A., Chernyavskiy A.N., Tsoy A.N., Pyatkov A.S. Decay of falling wavy liquid films at nonstationary heat release // Proc. of 14-th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-14), Washington, USA, 8-13 August 2010, IHTC 2010-22174.
5. Avksentyuk B. P. Non-equilibrium model of an evaporation front // Russian Journal of Engineering Thermophysics, 1995, vol. 5, pp. 1-8.
6. 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.
7. 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.
8. Pavlov P.A., Vinogradov V.E. Dinamics of vapor film formation upon rapid superheating of liquid // High Temperature, 2010, T. 48, № 5, pp 683-690.
9. Pavlenko A. N., Zhukov V. E., Starodubtseva I. P. Propagation of self-sustained evaporation fronts at step-wise heat generation and crisis phenomena at pool boiling // Computational Thermal Sciences. – 2011. – Vol. 3, – No. 5. – P. 1–8.
10. 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*