

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ВО ФРЕОНЕ R21

Кузнецов Д.В.

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

Введение. В настоящее время существует достаточное количество моделей, описывающих распространение самоподдерживающегося фронта испарения. Во всех моделях межфазная граница рассматривается гладкой, невозмущенной, тогда как на практике, во многих экспериментах, отмечалось возникновение мелкомасштабных возмущений на межфазной поверхности. Попытки установления причинно-следственной связи между интенсивностью, линейными масштабами возмущений на межфазной границе и скоростью распространения фронта испарения были лишь единичными. Целью данной работы является экспериментальное изучение динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения и динамики формирования мелкомасштабных возмущений межфазной поверхности в условиях нормальной и уменьшенной гравитации, а также анализ полученных результатов с позиций развития неустойчивости Ландау.

Методика экспериментального исследования. Эксперименты проводились на фреоне-R21 (CHCl₂F). Жидкость в данных опытах находилась на линии равновесия с паром при приведенном давлении $P/P_{cr} = 0.037$ (0.193 МПа).

В качестве рабочего участка использовалась трубка из нержавеющей стали внешним диаметром 3 мм. Визуальные наблюдения динамики образования и распространения паровой фазы на теплоотдающей поверхности фиксировались высокоскоростной цифровой видеокамерой Phantom v7.0. Скорость съёмки составляла 10000 – 25000 кадров в секунду с экспозицией 26 мкс. Условия уменьшенной гравитации реализовались во время свободного падения рабочего объема в продолжении 100 мс.

Нестационарное тепловыделение на рабочем участке создавалось управляемым источником постоянного тока, который обеспечивал ступенчатый импульс тока необходимой длительности с фронтами не более 1 мс. В данной серии экспериментов темп разогрева стенки составлял 2180 К/с. Суммарное время разогрева рабочего участка, образования самоподдерживающегося фронта испарения и его распространения не превышало 70 мс.

Динамика распространения фронта испарения. Зависимость скорости распространения фронта от температуры перегрева жидкости имеет две характерных области с различной крутизной зависимости скорости от перегрева жидкости. Первая область соответствует низким скоростям фронта (до 1 м/с), которая удовлетворительно описывается моделью для невозмущенного фронта [1]. Начиная с некоторой критической величины скорости (порядка 1 м/с) наблюдается резкое увеличение темпа нарастания скорости от температуры теплоотдающей поверхности. Авторы [1] объясняют эффект интенсификации испарения с межфазной поверхности возникновением

мелкомасштабных возмущений из-за развития неустойчивости Ландау [2].

Был проведен ряд экспериментов в условиях нормальной и уменьшенной гравитации (среднее значение гравитации составило $0.0056 \pm 0.004 g_n$). Зависимость средней (без учета пульсационной составляющей) скорости фронта от перегрева теплоотдающей поверхности осталась практически (в пределах погрешностей) неизменной.

Как показали эксперименты, одной из характерных особенностей распространения самоподдерживающегося фронта испарения является наличие пульсаций межфазной границы вдоль поверхности нагревателя на масштабах порядка его диаметра – 3 мм. Частота и амплитуда пульсаций скорости приведены в [3]. В результате пульсаций, межфазная поверхность испытывает знакопеременные ускорения, величины которых варьируются в широком диапазоне и могут достигать значений до нескольких сотен g. По этой причине стоит рассматривать эффективное поле массовых сил, учитывающее ускорение межфазной границы.

Для оценки устойчивости межфазной поверхности воспользуемся линейным анализом. В соответствии с [2] для устойчивости межфазной поверхности требуется выполнение следующего условия:

$$\sigma k^2 \frac{V_1 V_2}{j} - k V_1 V_2 (V_2 - V_1) + g (V_2 - V_1) > 0. \quad (1)$$

Где V_1 и V_2 – скорость испарения жидкости и скорость пара соответственно. Скорость пара и испарения жидкости могут быть выражены через скорость распространения фронта, используя следующие выражения:

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad \text{и} \quad \rho_1 V_{fp}^2 = \rho_2 V_2^2, \text{ как} \quad V_2 = \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} V_{fp}.$$

Частота колебаний межфазной поверхности в устойчивой области и инкремент нарастания в неустойчивой области определяется из [2] следующим образом:

$$\omega = -\frac{V_2 \rho_2 k}{\rho_1 + \rho_2} + \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2 V_2^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} \left[1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} - \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \right] k^2 - \frac{\sigma}{\rho_1 + \rho_2} k^3 - \frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1 + \rho_2} k}$$

На рис. 1 показано сравнение характерного времени нарастания возмущений межфазной поверхности для волнового числа 667 м^{-1} , определенного по периметру нагревателя, и периода пульсаций межфазной поверхности, измеренного в эксперименте [3].

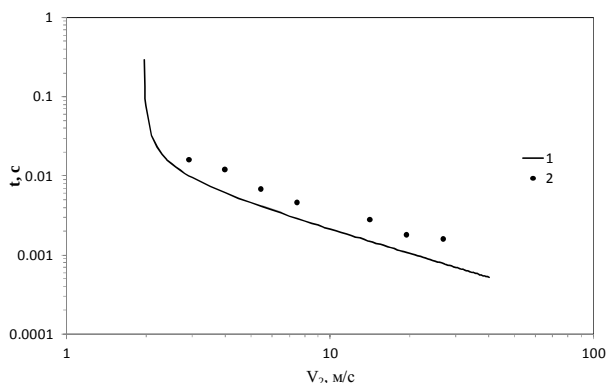


Рис. 1. Сравнение характерного времени нарастания возмущений межфазной поверхности для волнового числа 667 м^{-1} и периода пульсаций межфазной поверхности, измеренной в эксперименте при различных скоростях пара.
1 – время нарастания возмущений, 2 – период пульсаций.

Как видно из рисунка, характерное время нарастания возмущения равно половине периода пульсации. Стадия ускорения фронта соответствует росту возмущения в e раз. На стадии торможения происходит стабилизация возмущений за счет изменения направления эффективного ускорения массовых сил.

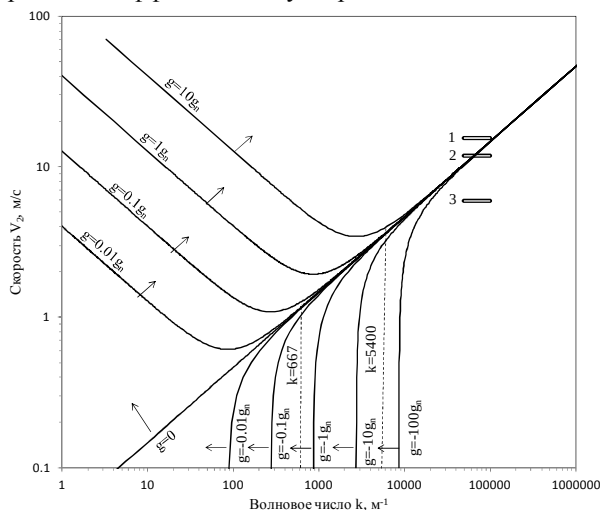


Рис. 2. Диаграмма устойчивости межфазной границы при различных значениях ускорения гравитации, рассчитанная по (1) с экспериментальными данными для скорости фронта 1 – 1.3 м/с, 2 – 1 м/с, 3 – 0.5 м/с. Фреон-R21; $P = 0.193 \text{ МПа}$.

На рис. 2 приведена диаграмма устойчивости межфазной поверхности, рассчитанная по (1), ускорение массовых сил является параметром. Каждая линия соответствует границе устойчивости при данном значении ускорения массовых сил.

Макровидеоосъемка в проведенных экспериментах показала возникновение мелкомасштабных возмущений, размер которых меньше толщины слоя метастабильной жидкости (порядка 100 мкм), при скоростях распространения фронта более 1 м/с. На диаграмме устойчивости отмечены экспериментальные данные для низкой скорости распространения фронта – 0.5 м/с, которая соответствует области невозмущенного фронта, скорости равной 1 м/с, соответствующей переходной области к интенсифицированному теплообмену и скорости 1.3 м/с, соответствующей об-

ласти с наличием мелкомасштабных возмущений. Как видно, на диаграмме эти данные попадают в три характерных области – область устойчивости межфазной границы, переходное состояние и область развитой неустойчивости.

Заключение. Проведенные эксперименты по динамике распространения самоподдерживающегося фронта испарения на цилиндрическом нагревателе во фреоне показали наличие мелкомасштабных возмущений на межфазной границе при скоростях более 1 м/с. Значительное уменьшение гравитации не привело к изменению зависимости скорости фронта от перегрева теплоотдающей поверхности относительно температуры насыщения. Пульсирующий характер распространения фронта вдоль поверхности нагревателя приводит к значительным знакопеременным ускорениям границы фронта. На масштабах возмущений с длиной волны порядка периметра нагревателя (волновое число 667 м^{-1}) на развитие неустойчивости сказывается величина эффективного ускорения. Неустойчивость успевает развиваться только на временном масштабе равном половине периода пульсации и не вносит вклада в увеличение средней скорости фронта испарения. Анализ устойчивости для волновых чисел 50000 – 100000, соответствующих масштабу толщины слоя метастабильной жидкости, показал, что при скоростях фронта более 1 м/с реализуется барокапиллярная неустойчивость, влияющая на эффективность испарения с межфазной поверхности и приводящая к более сильной зависимости скорости фронта от перегрева жидкости, чем в области с устойчивой межфазной поверхностью.

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.

Список литературы:

1. Pavlenko A.N. and Lel' V.V. Approximate model for calculation of self-sustaining evaporation front // Thermophysics and Aeromechanics. 1999. N 1. P. 105-117.
2. Ландау Л.Д. К теории медленного горения // ЖЭТФ. 1944. Т. 14. № 6. С. 240–245
3. Жуков В.Е., Моисеев М. И. Динамические характеристики межфазной границы самоподдерживающегося фронта испарения во фреоне-21 // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. ISSN 2076-6866, Днепропетровск: «НПБК Триакон», 2013. - Т. 1 (12). - С. 322-328.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-00178-а)