

**ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ
САМОПОДДЕРЖИВАЮЩЕГОСЯ ФРОНТА ИСПАРЕНИЯ ВО ФРЕОНЕ-R21
С ДОБАВКАМИ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ SiO_2**

Моисеев М. И.

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

Введение. В области низких приведенных давлений развитие самоподдерживающихся фронтов испарения вдоль тепловыделяющей поверхности при нестационарном тепловыделении является важнейшим фактором перехода к пленочному режиму кипения при существенно более низких тепловых потоках, чем критические тепловые потоки при стационарном тепловыделении. Многими авторами отмечалось формирование мелкомасштабных возмущений на межфазной границе. В работе [1] впервые выдвинута гипотеза о решающей роли механизма неустойчивости Ландау в развитии возмущений на межфазной поверхности. В работе [2] предложена приближенная модель описания распространения фронта испарения с учётом развития неустойчивости Ландау. В работе [3] показано, что при нестационарном тепловыделении влияние быстрорастущих мелкомасштабных возмущений на скорость распространения фронта испарения наблюдается при существенно меньших перегревах, чем следует из оценок [2], полученных для условий квазистационарного тепловыделения. Таким образом, эксперименты демонстрируют существенное влияние мелкомасштабных возмущений на скорость самоподдерживающегося фронта испарения при интенсивных потоках тепла через межфазную границу. Но были лишь единичные попытки установления причинно-следственной связи между интенсивностью, линейными масштабами возмущений на межфазной границе и скоростью распространения фронта испарения.

В последние годы ведутся интенсивные исследования свойств жидкостей с добавлением наночастиц, или наножидкостей. Как показывают эксперименты, наличие даже небольшого количества наночастиц в жидкости может оказывать существенное влияние на теплофизические свойства жидкости, коэффициенты теплоотдачи при конвекции и кипении, критические тепловые потоки. Причём результат неоднозначно зависит от типа жидкости, типа наночастиц, их концентрации, размера, формы и других факторов. Наножидкости с улучшенными теплофизическими свойствами могут быть перспективной заменой классическим жидкостям, используемым в качестве теплоносителей в различных приложениях, таких как энергетика, холодильная техника, микроэлектроника и т.д. В большинстве работ, касающихся наножидкостей, исследуется теплообмен в стационарных условиях. Исследования критических явлений при нестационарном тепловыделении в наножидкостях практически не проводились, а эксперименты по распространению самоподдерживающегося фронта испарения были проведены впервые в рамках работы [4].

Целью данной работы является экспериментальное изучение динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения в наножидко-

стях, в том числе изучение влияния наночастиц на динамические и структурные характеристики пульсаций межфазной границы фронта испарения.

Методика экспериментального исследования.

Эксперименты проводились на фреоне-R21 (CHCl_2F) с добавлением наночастиц SiO_2 со средним диаметром 20-25 нм. Жидкость в данных опытах находилась на линии равновесия с паром при приведенном давлении $P/P_{\text{cr}} = 0.037$ (0.193 МПа). 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.

Визуальные наблюдения динамики образования и распространения паровой фазы на теплоотдающей поверхности фиксировались высокоскоростной цифровой видеокамерой Phantom v7.0. Скорость съёмки составляла 25000 кадров в секунду с экспозицией 26 мкс.

Эксперименты проводились следующим образом: на нагреватель подавался прямоугольный импульс тока фиксированной длительности, что позволяло разогреть поверхность до требуемой температуры. Запуск скоростной камеры был синхронизирован с подачей 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 уравнению 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.

Обсуждение результатов. Получены опытные данные по динамике распространения фронта испарения как в чистой жидкости, так и в наножидкости. Зависимость скорости фронта от температурного напора $V_f(T_w - T_s)$ имеет две области различной крутизны. В опытах при постоянной температуре стенки средняя скорость фронта оставалась постоянной. Пульсирующее распространение фронта проявлялось в периодическом ускорении и замедлении движения межфазной границы. Пульсация межфазной границы вдоль образующей цилиндрической поверхности рабочего участка обрабатывалась с помощью преобразования Фурье. Во всех полученных спектрах наблю-

дался выраженный максимум. Построены зависимости частоты и амплитуды этого пика от средней скорости фронта.

Мелкомасштабные возмущения межфазной поверхности наблюдались при распространении фронта испарения во всем исследованном диапазоне параметров. Для детализации процесса формирования мелкомасштабных возмущений была проведена макровидео съемка распространения фронта испарения при освещении объекта в проходящем свете на верхней образующей нагревателя. В качестве источника освещения использовался лазерный нивелир с длиной волны 650 нм, что позволило визуализировать тепловой слой. Фронт испарения проникал в тепловой слой примерно на две трети толщины без деформации теплового слоя. Далее наблюдался рост толщины парового слоя с одновременным оттеснением слоя перегретой жидкости. На этом участке наблюдалась потеря устойчивости межфазной поверхности, ее значительное искривление и развитие паровых языков на масштабе теплового слоя.

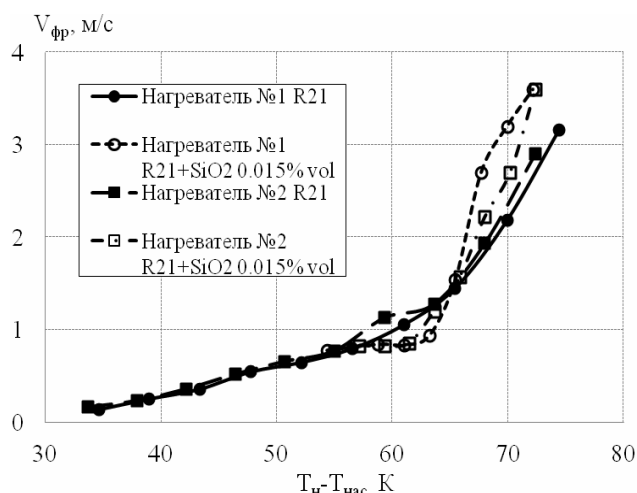


Рис. 1. Сравнение зависимости скорости фронта от перегрева стенки в чистой жидкости и в наножидкости.

Добавление наночастиц в жидкость привело к существенному изменению характеристик самоподдерживающегося фронта испарения по сравнению с чистой жидкостью:

1) Возросла величина перегрева жидкости, необходимая для образования фронта испарения.

2) Скорость фронта увеличилась, причём данный эффект наблюдался только при высоких перегревах, соответствующих порогу развития неустойчивости межфазной границы. Эффект увеличения скорости был выражен на нагревателе с меньшей шероховато-

стью поверхности, в то время как для более шероховатого нагревателя был практически незаметен (рис. 1)

3) Изменились амплитуды и частоты колебаний межфазной границы.

Заключение. Характеристики развития быстрорастущих мелкомасштабных возмущений на межфазной поверхности оказывают существенное влияние на характер зависимости скорости распространения самоподдерживающегося фронта испарения от температурного напора.

Добавление наночастиц в жидкость приводит к изменению скорости и амплитудно-частотных характеристик пульсаций межфазной поверхности самоподдерживающегося фронта испарения. Вклад в этот эффект могут вносить как осаждение наночастиц на теплоотдающую поверхность и изменение её физических свойств, так и влияние наночастиц на волновые характеристики межфазной границы фронта испарения вследствие их концентрации на межфазной поверхности. Для выяснения механизмов воздействия наночастиц на распространение фронта испарения необходимы дальнейшие исследования.

Кроме того, 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 температурного напора, массовых сил и приведенного давления.

Список литературы:

1. Frost L. D. Dynamics of explosive boiling of a droplet // Phys. Fluid. 1988. Vol. 31. № 9. P. 2554-2561.
2. Pavlenko A. N., Lel V. V. Approximate simulation model of a self-sustaining evaporating front // Thermophysics and Aeromechanics. 1999. Vol. 6. № 1. P. 105-117.
3. 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.
4. Жуков В. Е., Павленко А. Н., Моисеев М. И. Экспериментальное исследование динамики распространения самоподдерживающегося фронта испарения во фреоне-21 с нанодобавками SiO₂ // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. 2011, №2(7), С. 132-138.

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