

**ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ:
МЕХАНИЗМЫ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ С ПОМОЩЬЮ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ**

Кипение является одним из наиболее эффективных методов отвода тепла и характеризуется существенно более высокими коэффициентами теплоотдачи по сравнению с однофазным теплообменом. По этой причине данный процесс широко используется в различных технологиях и отраслях промышленности, включая химические технологии, тепловую и ядерную энергетику, термическое опреснение и т. д. Отдельный интерес кипение представляет для задач стабилизации температурного режима различных устройств, включая силовую электронику, а также микроэлектронику. Давление является основным режимным параметром процесса кипения и оказывает комплексное влияние на теплообмен и локальные характеристики процесса.

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния давления в диапазоне 10 - 103 кПа на механизмы интегрального и локального теплообмена при кипении этилового спирта и воды. Опыты были проведены с использованием экспериментальной установки, подробно описание которой представлено в [1]. Главной особенностью данной установки является прозрачный нагревательный элемент, представляющий собой тонкую пленку оксида индия-олова (ИТО), нанесенную на сапфировую подложку. Использование такой конструкции нагревательного элемента позволяет проводить высокоскоростные термографическую и видеосъемку с его нижней стороны. Для анализа эволюции паровых пузырей была проведена высокоскоростная видеосъемка с частотой съемки до 5000 Гц. Для анализа температурного поля нагревателя была проведена высокоскоростная термографическая съемка частотой 1500 Гц.

В первую очередь, с использованием данных методик в работе были изучены механизмы влияния понижения давления на процессы тепло- и массообмена при кипении жидкости. На рис. 1 представлены т.н. кривые кипения этилового спирта при разных давлениях, из которых следует, что понижение давления от атмосферного до 12 кПа приводит к ухудшению теплоотдачи более, чем в 1.5 раза.

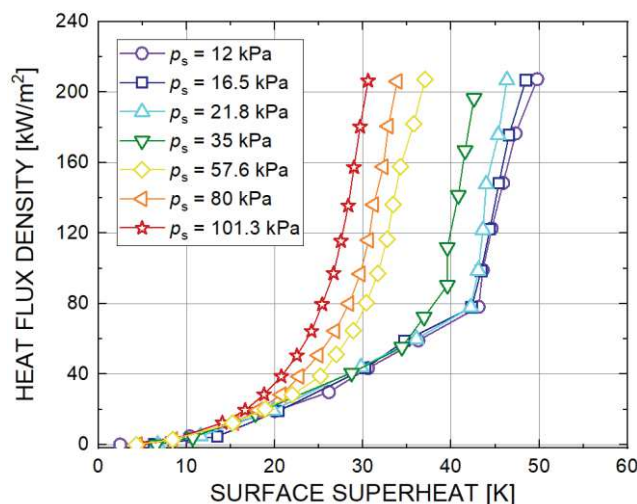


Рисунок 1 – Влияние понижения давления на интенсивность теплообмена при кипении этилового спирта

Как показал анализ результатов по исследованию интенсивности локального теплообмена под отдельными пузырями, такое понижение интенсивности теплоотдачи связано с понижением теплового потока, отводимого за счет испарения тонкого слоя жидкости (микрослоя) под пузырями. Данная информация является важной и необходимой для лучшего понимания механизмов теплообмена при кипении и разработки новых методов его интенсификации, в т.ч. за счет использования различных функциональных нанопокровтий.

В частности, на сегодняшний день использование функциональных поверхностей, в том числе нанопокровтий, является одним из наиболее перспективных способов интенсификации теплообмена при кипении. Одним из наиболее перспективных и актуальных направлений в данной области является управление свойствами смачивания поверхности. Однако подавляющее большинство исследований, посвященных влиянию поверхностей с различными свойствами смачивания на теплообмен и локальные характеристики процесса кипения, были проведены только в условиях атмосферного давления. В рамках настоящей работы также было проведено комплексное исследование влияния гидрофобных и бифильных поверхностей на ключевые локальные характеристики и интенсивность теплообмена при кипении воды в условиях большого объема при давлениях до 10 кПа.

Для создания гидрофобной и бифильной поверхностей использовался коммерческий продукт NeverWet Rust-Oleum. Он представляет собой двух компонентный спрей коллоидного раствора. Для проведения экспериментов было создано две поверхности: (1) сплошная гидрофобная поверхность ($\theta = 124^\circ$) (рис. 2а); (2) бифильное покрытие с гидрофобными пятнами ($\theta = 124^\circ$) нанесенными на гидрофильную

сапфировую подложку ($\theta = 70^\circ$) (рис. 2б). В исследовании была выбрана следующая бифильная конфигурация (рис. 2в): диаметр пятна – 1.5 мм, размер шага – 10 мм.

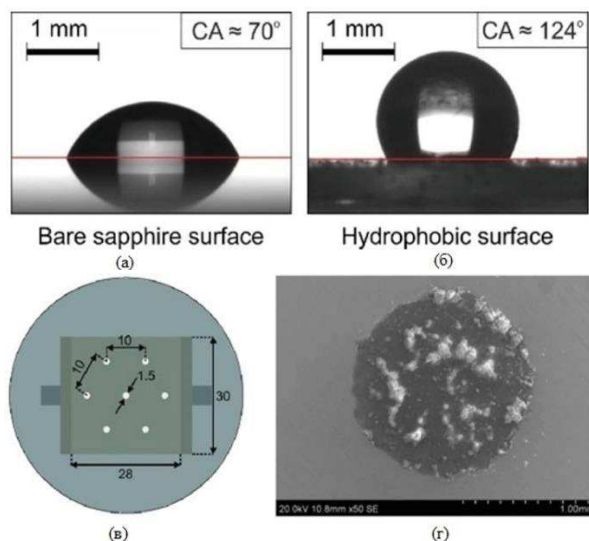


Рисунок 2 – Угол смачивания для базовой сапфировой поверхности (а) и гидрофобного покрытия (б); Конфигурация бифильного покрытия (в); Отдельное гидрофобное пятно (г).

В первую очередь, с использованием данных высокоскоростной визуализации процесса кипения с нижней стороны прозрачного нагревателя был проведен анализ частот отрыва паровых пузырей для отдельных центров зародышеобразования, а также величин отрывных диаметров пузырей. Анализ полученных данных показал, что процесс зарождения пузырей на гидрофобной и бифильной поверхностях принципиально отличается от гидрофильной поверхности. В частности, при кипении на бифильной и гидрофобной поверхностях в области субатмосферных давлений величины отрывных диаметров паровых пузырей существенно ниже, чем при кипении на базовой гидрофильной поверхности. При этом, зависимость частоты отрыва пузырей от давления на бифильной и гидрофобной поверхности имеет противоположный тренд по сравнению с гидрофильной.

С помощью скоростной термографии были построены кривые кипения для бифильной и гидрофобной поверхностей и проведено их сравнение с данными, полученными для необработанной поверхности. На рис. 3 показаны результаты для диапазона давлений 10-43 кПа. Видно, что для гидрофобной и бифильной поверхностей температура начала кипения значительно снижается (до 4-5 раз) при всех исследованных давлениях.

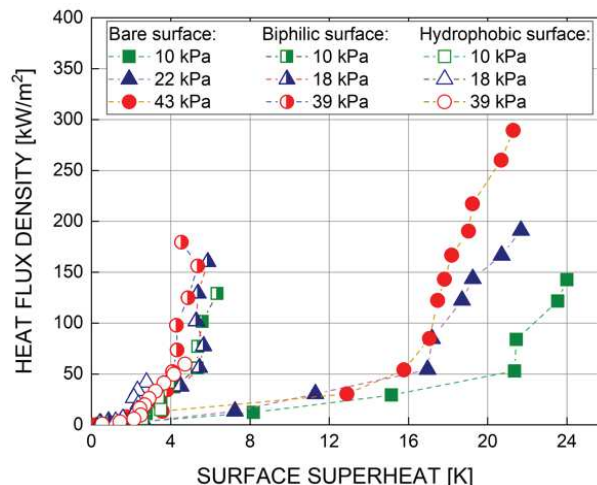


Рисунок 3 – Кривые кипения воды при различных давлениях для базовой, гидрофобной и бифильной поверхностей

В результате происходит существенное увеличение коэффициента теплоотдачи по сравнению с необработанной поверхностью. Однако, при кипении на гидрофобном покрытии уже при тепловых потоках 30-70 кВт/м² в зависимости от давления, наступает переход к плёночному режиму кипения. В свою очередь, использование бифильного покрытия позволяет избежать такого раннего кризиса кипения. Сравнение данных также показывает, что для бифильной и гидрофобной поверхностей кривые кипения, полученные для различных давлений, практически совпадают, и интенсивность теплоотдачи слабо зависит от давления.

Таким образом, полученные в работе результаты позволяют как разработать новые теоретические подходы к описанию локального и интегрального теплообмена при кипении жидкости в широком диапазоне режимных параметров, так и демонстрируют высокую перспективность использования бифильных нанопокровтий для интенсификации теплообмена при кипении жидкости.

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ № 22-79-00174.

ЛИТЕРАТУРА

1. Serdyukov V. et al. Bipilic surface to improve and stabilize pool boiling in a vacuum // Applied Thermal Engineering. - 2022. - P.118298.