

**Тема: Охлаждение электронного оборудования с высоким
тепловыделением посредством испаряющихся микрокапель жидкости**

Соглашение № 075-15-2021-988 от 28.09.2021

Мероприятие 4.3.2. Проведение исследований в рамках международного многостороннего и двустороннего сотрудничества, в том числе в рамках Европейского союза

Приоритетное направление: «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика»

Период выполнения: 28.09.2021- 31.12.2021

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Иностранный партнер: Trinity College, г. Дублин, Ирландия

Цели выполнения научных исследований

Проект направлен на поиск новых методов существенной интенсификации теплообмена, всестороннее научное обоснование этих методов и демонстрацию современных возможностей по передаче тепла, теплоотводу и термостабилизации. Цель проекта разработать научный задел для создания высокоэффективных систем газоспрейного охлаждения ближайшего будущего, которые будут основаны на новых физических принципах.

В ходе выполнения проекта на этапе № 1 в период с 28.09.2021 г. по 31.12.2021 г. выполнялись следующие работы:

1. Обзор и анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках настоящих научных исследований.
2. Напыление специального покрытия на сапфировую подложку для использования ИК-камеры при измерении температуры поверхности в эксперименте с испарением капли на нагреваемой сапфировой подложке при граничных условиях на поверхности подложки близких к $Q = \text{const}$. Характеризация покрытия и измерение его характеристик смачивания водой.
3. Проведение экспериментов по исследованию локальных характеристик теплообмена (локальных тепловых потоков и коэффициентов теплопередачи) в области контактной линии капли жидкости, а также жидких образований на

твёрдой нагреваемой подложке при граничных условиях на поверхности подложки близких к $Q = \text{const}$.

4. Проведение экспериментальных исследований по теплообмену в контактной линии смачивания капли на сапфировой подложке с граничными условиями $T = \text{const}$ (по периметру подложки).
5. Определение локальных тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи для разных условий эксперимента математическим методом прямого расчета теплового потока в сапфировой пластине.
6. Разработка и создание нового рабочего участка для экспериментального исследования испарения капли жидкости при постоянной площади контакта между каплей и нагреваемой подложкой, что обеспечивается микроканавкой, при различных контактных углах смачивания, а также при различных положениях подложки относительно вектора силы тяжести. Характеризация рабочей поверхности и канавки, измерение характеристик смачивания водой.
7. Проведение экспериментальных исследований по испарению капли жидкости при постоянной площади контакта между каплей и нагреваемой подложкой, при различных контактных углах смачивания, а также при различных положениях подложки относительно вектора силы тяжести.
8. Разработка и создание нового стенда для экспериментального исследования процессов тепло- и массообмена при высокоинтенсивном газо-спрейном охлаждении тепловыделяющего элемента, моделирующего электронное оборудование, с высоким временным и пространственным разрешением.
9. Сравнительный анализ исследуемых в проекте спрейных систем охлаждения.
10. Анализ теплообменных характеристик с учетом данных из литературы для 1) спрейных систем; 2) систем с кипением в микро- и миниканалах; 3) систем с микроструями и 4) систем с пленкой жидкости, увлекаемая потоком воздуха.
11. Разработка предложений по оптимизации систем охлаждения электронного оборудования.
12. Разработка математических моделей и методики моделирования для прямого численного моделирования процесса импактного взаимодействия капли и нагретой подложки с учетом испарения жидкости и сопряженного теплообмена.
13. Систематические расчетные исследования по установлению основных механизмов теплообмена при испарении импактной капли на нагретой подложке.
14. Определение зависимости характеристик теплообмена от начальной скорости капли, ее размера, теплофизических свойств жидкости, и условия нагрева.

15. Численное моделирование неподвижных капель в переменных гравитационном и электрическом полях (выполнено иностранным партнером).
16. Экспериментальное исследование испарения лежащих капель с различной смачиваемостью (выполнено иностранным партнером).

При этом были получены следующие результаты:

1. Получены значения локальных тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи в области трехфазной контактной линии, сформированной каплей или другими жидкими образованиями на твердой нагреваемой подложке, при различных условиях эксперимента.
2. Создан экспериментальный стенд для исследования процесса газоспрейного охлаждения нагреваемой подложки, моделирующей тепловыделяющий элемент электронного оборудования, с современными оптическими методиками с высоким пространственным и временным разрешением. Созданный экспериментальный стенд способен генерировать тепловыделение на уровне 1,5 кВт. В ходе испытаний стенда удалось отвести тепловую мощность 1,1 кВт от нагревателя размером 10×10 мм², при этом продемонстрирована перспективность дальнейших исследований.
3. Выполнен сравнительный анализ исследуемых в проекте спрейных систем охлаждения.
4. Выполнен анализ теплообменных характеристик с учетом данных из литературы для 1) спрейных систем; 2) систем с кипением в микро- и миниканалах; 3) систем с микроструями и 4) систем с пленкой жидкости, увлекаемой потоком газа.
5. Сформулированы предложения по оптимизации систем охлаждения электронного оборудования.
6. Разработана комплексная методика для прямого численного моделирования процесса импактного взаимодействия капли и нагретой подложки с учетом испарения жидкости и сопряженного теплообмена.
7. Проведено систематическое моделирование процессов теплообмена при испарении импактной капли на нагретой подложке.
8. Установлены зависимости характеристик теплообмена от начальной скорости капли, ее размера, теплофизических свойств жидкости, и условий нагрева.
9. Иностраным партнером разработана численная модель в коммерческом программном пакете ANSYS Fluent, включающая воздействие электрического поля на динамику капель.

10. Иностранным партнером выполнены исследования по влиянию краевого угла смачивания на теплопередачу при испарении сидячих капель. Получено, что максимум теплоотдача наблюдается в области тройной контактной линии, как на гидрофильных так и на гидрофобных поверхностях.