

Тема: Кипение в миниканалах при высоких и сверхвысоких тепловых потоках применительно к солнечной энергетике

Соглашение № 075-15-2021-957 от 30.09.2021

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: 30.09.2021- 31.12.2021

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

Иностранный партнер: Проф. Герхард Рибатски, Университет Сан-Паулу, Бразилия

Цели выполнения научных исследований

Разработка совместно с бразильскими партнерами новых методов интенсификации процессов теплообмена в мини- и микроканальных теплообменниках, применительно к системам термостабилизации высокоэффективных каскадных фотопреобразователей в концентраторных солнечных батареях. Целью проекта также является разработка математических и физических моделей основных процессов теплообмена реализуемых в мини- и микроканальных системах при высоком тепловыделении, а кроме того получение конкретных данных о процессах для валидации данных моделей.

В ходе выполнения проекта на этапе № 1 в период с 30.09.2021 г. по 31.12.2021 г. выполнялись следующие работы:

1. Аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей науднотехническую проблему, исследуемую в рамках проекта, включает 66 источников.
2. Проведены патентные исследования по ГОСТ 15.011-96.
3. Исследование гидродинамики течения двухфазного потока выполнены в изотермических условиях и условиях интенсивного кипения в миниканалах высотой 0.5 – 3 мм. Эксперименты выполнены на воде и легкокипящей диэлектрической жидкости.

4. Детальная высокоскоростная визуализация закипания жидкости и динамики роста пузырей выполнена на воде и легкокипящей диэлектрической жидкости при скоростях съемки до 775 000 кадров в секунду.

5. Исследование теплообмена и кризиса теплообмена в миниканальных системах выполнено при тепловыделениях до 1000 Вт/см². Эксперименты выполнены на воде и легкокипящей диэлектрической жидкости.

6. Разработанные математические модели и методика расчета применимы для численного расчета процессов теплообмена и кипения жидкостей в плоских миниканалах и обеспечивают верификацию расчетных алгоритмов.

7. Тестирование и верификация разработанной методики расчета процессов теплообмена и кипения жидкостей в плоских миниканалах проводились путем сравнения с экспериментальными данными.

8. Заключительный раздел отчета об исследованиях включает обобщение и оценку результатов, а также практические рекомендации.

9. Иностранным партнером выполнены исследования гидродинамики двухфазного потока при кипении в микроканальном теплообменнике с расширяющимися вдоль течения микроканалами с шероховатой поверхностью. В качестве рабочей жидкости использовалась жидкость R1336mzz(Z).

10. Иностранным партнером выполнены исследования теплообмена при кипении в микроканальном теплообменнике с расширяющимися вдоль течения микроканалами с шероховатой поверхностью. В качестве рабочей жидкости использовалась жидкость R1336mzz(Z).

При этом были получены следующие результаты:

1. В проекте получены новые экспериментальные данные для течения двухфазного потока в плоских миниканалах высотой 0.5, 1 и 1.2 мм в изотермических условиях. Построены карты режимов, позволяющие определять особенности течения двухфазного потока в каналах солнечных коллекторов. Впервые определена пороговая высота горизонтального канала, при которой возникает вспененный режим. Обнаружен способ воздействия на границу между вспененным и пузырьковым режимами с использованием выступа. Показано, что для канала с выступом происходит увеличение области вспененного режима, в которой наблюдается более высокая интенсивность теплообмена. Установлено,

что область вспененного режима двухфазного течения увеличивается с увеличением ширины канала.

2. Выполнено исследование гидродинамики, теплообмена и кризиса теплообмена для воды и диэлектрической легкокипящей жидкости HFE-7100 при кипении в плоских миниканалах высотой 0.5, 1.5 и 3 мм с высоким и сверхвысоким локальным тепловыделением (до 1 кВт с нагревателя площадью 1 см²). При помощи высокоскоростной визуализации (частота съемки до 775 000 к/с) с высоким оптическим разрешением (до 1 мкм) исследована динамика роста микроразмерных паровых пузырей. Показано, что с уменьшением недогрева рабочей жидкости максимальный диаметр паровых пузырей увеличивается, а интенсивность теплообмена и критический тепловой поток уменьшаются. Установлено существенное снижение интенсивности теплообмена и критического теплового потока с уменьшением высоты канала. Для легкокипящей жидкости HFE-7100 установлено увеличение максимального диаметра пузырей, а также существенное снижение интенсивности теплообмена и критического теплового потока, по сравнению с чистой водой.

3. Разработаны математическая модель и комплексная методика для численного моделирования процессов теплообмена при кипении жидкостей в плоских миниканалах. Проведены систематические расчетные исследования влияния расхода жидкости, температуры нагревателя и высоты канала на объем паровой фазы, плотность теплового потока на нагревателе, перепад давления и другие характеристики тепломассообмена. Получено хорошее качественное согласие результатов расчетов и данных экспериментов.

4. Иностраным партнером получены новые данные по гидродинамике и теплообмену двухфазного потока при кипении в микроканальном теплообменнике с расширяющимися вдоль течения микроканалами с шероховатой поверхностью.

Проект объединяет группу исследователей из Института Теплофизики СО РАН, г. Новосибирск, имеющих богатый опыт экспериментальных и теоретических исследований двухфазных течений в микро- / миниканалах и обладающих современным уровнем экспериментальных оптических методов и группу из Университета Сан-Паулу, Бразилия, которая имеет большой опыт прикладных исследований в области тепломассообмена применительно к задачам солнечной энергетики и кондиционирования, а также к другим отраслям энергетики. В результате выполнения проекта, опыт бразильских партнеров в

прикладных исследованиях был передан российской команде, и наоборот, что привело к получению ряда важных результатов, в частности российской командой был достигнут рекордный тепловый поток (1 кВт с нагревателя площадью 1 см²) при кипении в канале для сравнительно небольших расходах жидкости.

Выполненные систематические экспериментальные и численные исследования кипения в мини- и микроканалах при высоких и сверхвысоких тепловых потоках обеспечивают фундаментальный задел для разработки систем управления температурным режимом высокоэффективных каскадных фотопреобразователей в концентраторных солнечных батареях. Полученные результаты имеют высокую практическую значимость для развития таких областей техники, как малая распределенная энергетика и силовая электроника. Результаты исследований можно также использовать для разработки новых энергоэффективных испарительных систем охлаждения теплонапряженных компонентов в системах теплового регулирования космической техники. Полученные результаты могут быть использованы для дополнения учебных дисциплин ВУЗов: Новосибирского государственного университета (НГУ), Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), НОЦ «Энергетика» ИТ СО РАН и НГУ, что позволит усовершенствовать существующие программы подготовки научных работников и специалистов.

В ходе выполнения проекта было принято в печать 3 статьи в журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus:

1. Flow boiling of HFE 7100 in a minichannel with local heating, Journal of Physics: Conference Series, Белослудцев В.В., Зайцев Д.В. и Кабов О.А.
2. Investigation of the two-phase flow hydrodynamics in minichannels of solar collectors under isothermal conditions, Journal of Physics: Conference Series, Чиннов Е.А., Роньшин Ф.В.
3. The effect of channel height on flow boiling heat transfer and CHF in flat minichannels with local heating, Interfacial Phenomena and Heat Transfer, Зайцев Д.В., Белослудцев В.В., Рибатски Г., Кабов О.А.

Подана заявка на патент “Устройство для формирования расслоенного течения жидкости в микро- и мини- каналах”, Кабов О.А., Зайцев Д.В., Быковская Е.Ф. (регистрационный номер ФИПС 2021139159 от 28.12.2021).