**Создание научно-технического задела и экспериментальных образцов высокоэффективных двухфазных систем охлаждения с естественной циркуляцией для космических и транспортных приложений**

Соглашение **№ 14.616.21.0016** в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014-2020 годы»

**Приоритетное направление**: «Транспортные и космические системы»

**Период выполнения:** 26.09.2014- 31.12.2016

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

**Иностранный партнер:** Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, Université Aix-Marseille, CNRS, Marseille, France

**Цели выполнения прикладных научных исследований**

Создание научно-технического задела, разработка и создание экспериментальных образцов высокоэффективных двухфазных систем охлаждения с естественной циркуляцией для космических и транспортных приложений. Развитие сотрудничества с иностранным партнером.

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 26.09.2014г. **№ 14.616.21.0016** с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 4 в период с 01.01.2016 г. по 30.06.2016 г. выполнялись следующие работы:

1. Продолжены экспериментальные исследования динамики, тепломассообмена в испаряющемся мениске.

2. Созданы новая математическая модель и программы для моделирования динамики, тепломассообмена в испаряющемся мениске.

3. Проведено сопоставление расчетных и опытных данных. Проведено обобщение и оценка полученных результатов.

4. Разработана техническая документация  на изготовление  экспериментального образца контурной тепловой трубы.

5. Создан экспериментальный образец контурной тепловой трубы  и оснащен необходимой измерительной и контрольной аппаратурой.

6. Принято участие в мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию результатов.

7. Проведено численное моделирование динамики, тепло- и массообмена в испаряющемся мениске, в части вывода граничных условий для двумерной задачи (выполнено иностранным партнером).

При этом были получены следующие результаты:

Проведено экспериментальное исследование динамики, тепломассообмена в испаряющемся мениске. Применено два высокоточных оптических метода: теневой и метод с использованием микроскопа, обеспечивающий высокое разрешение. Изучено изменение краевого угла смачивания при разнице температур между подложкой и газом вблизи жидкости 5 – 6 оС. Изучено поведение динамического краевого угла мениска при натекании жидкости. Выявлено, что для исследованной подложки и при нагреве существует два четко выделенных режима: с изменением краевого угла смачивания и второй с постоянным углом. Проведено исследование стеклянных поверхностей с нанопокрытиями двух различных типов: покрытие NOA 65 и NOA 81 с силанизацией. Данные покрытия являются достаточно устойчивыми к тепловым и механическим нагрузкам. На сканирующем электронном микроскопе измерены характерные размеры вкраплений, присутствующие на NOA 81 с силанизацией, составляющие 0.5 – 1 m. Исследован гистерезис краевого угла смачивания двумя методами на DSA-100, KRUSS. Значения гистерезиса краевого угла составили около 20о для подложки NOA 81 с силанизацией и около 50о для NOA 65. Результаты полученные методом стандартной процедуры KRUSS хорошо согласуются с результатами, полученными методом изотермического испарения капли.. Для исследования динамики испаряющегося мениска производилась скоростная видеосъемка. Сценарий испарения этанола и воды качественно различались при одних и тех же условиях: температура, одна и та же стеклянная пластина. Вода в диапазоне температур подложки от 20 – 40 оС испарялась более целостно, тогда как этанол быстро распадался на мелкие фракции

С использованием основных законов сохранения в механике сплошных сред, принципов неравновесной термодинамики и действия расклинивающего давления, создана новая математическая модель и программа для моделирования динамики, тепломассообмена в испаряющемся мениске.

Проведено сопоставление расчетных и опытных данных, обобщение и оценка полученных результатов. Разработанная и созданная в ходе выполнения проекта установка по изучению динамики испаряющегося мениска позволила получить новые важные экспериментальные данные. Применено два высокоточных оптических метода: теневой и метод с использованием микроскопа, обеспечивающий высокое разрешение. Изучено изменение краевого угла смачивания при разнице температур между подложкой и газом вблизи жидкости 5 – 6 оС. Изучено поведение динамического краевого угла мениска при натекании жидкости. Получены основные характеристики испарения этанола и воды на поверхностях с различным покрытием. Построена новая математическая модель для удлиненного мениска в приближении тонкого слоя с использованием основных законов сохранения в механике сплошных сред, принципов неравновесной термодинамики и действия расклинивающего давления, создан код. Проведен линейный анализ конвективной неустойчивости, возникающей при испарении. Все полученные численные результаты качественно согласуются с экспериментами.

Разработана техническая документация на создаваемый экспериментальный образец контурной тепловой трубы. Документация представлена в виде отдельного документа в составе отчетной документации.

Создан экспериментальный образец контурной тепловой трубы и оснащен необходимой измерительной и контрольной аппаратурой. Техническая документация к образцу и Акт изготовления прилагается в составе отчетной документации.

В ходе работ по результатам работ данного ПНИ в первом полугодии 2016 года защищена 1 докторская и принята к защите 1 кадидатская диссертации.

Иностранным партнером проведено численное моделирование динамики, тепло- и массообмена в испаряющемся мениске по кинетическим уравнениям, в части вывода граничных условий для двумерной задачи. Целесообразность выполнения работы с иностранным партнером из Франции Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels состоит в том, что партнер обладает уникальным опытом в исследованиях тепломассообмена в условиях микрогравитации. Участвует в нескольких экспериментах по тепломассообмену и физике жидкостей в параболических полетах и является участницей подготовки более чем десяти экспериментов Европейского Космического Агентства и Французского Космического Агентства на Международной Космической Станции, а также участвует в программе исследований с использованием баллистических ракет. Проф. Тадрист является инициатором и координатором программы по кипению, испарению и теплообмену в ЕКА. Контакты с партнером дают доступ к уникальной информации и возможность участия в совместных исследованиях в условиях микрогравитации. IUSTI обладает значительным опытом создания контурных тепловых труб и изучением процессов в тепловых трубах, имеют контракты с индустрией по исследованиям тепловых труб. Обладают самым современным оборудованием для исследований тепломассообмена в двухфазных системах. Целый ряд научных результатов в проекте будет получен благодаря выполнению работ в международной кооперации. Будут проводиться совместные эксперименты и расчеты по испарению, где будут использованы методики, развитые в лаборатория IUSTI. Методики и ноу-хау будут передаваться в ходе совместной эксплуатации экспериментальных стендов в Новосибирске. Партнер принял активное участие в теоретическом и численном исследовании межфазной области жидкость-пар при испарении и конденсации. В этих работах участвует проф. Ирина Граур, аспирант Мин Туан Хо. В коллаборации впервые в проекте будут исследованы переходные режимы течений с фазовыми превращениями, даны физические объяснения процессам, исследуемым в проекте.

Получателем субсидии за отчетный период по этапу 4 выполнены все работы в соответствии с требованиями Технического задания, Плана-графика исполнения обязательств, отчетная документация оформлена в надлежащем порядке. Обязательства, указанные в пункте 1.2 соглашения по 4 этапу исполнены надлежащем образом и в полном объеме.

Принято участие в мероприятиях, направленных на освещение и популяризацию результатов. Сделано 7 докладов на 4 Международных и Всероссийских конференциях и семинарах для освещения и популяризации результатов ПНИ в первом полугодии 2016 года. Опубликованы 7 статей по результатам работ 1-4 этапа. Ссылка у всех статей только на данное Соглашение.

1. Polikarpov A.Ph., Ho M.T., Graur I., Transient heat transfer in a rarefied binary gas mixture confined between parallel plates due to a sudden small change of wall temperatures, International Journal of Heat and Mass Transfer, 101, P. 1292-1303, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.124> ;
2. Gatapova E.Ya., Graur I.A., Kabov O.A., Aniskin V.M., Filipenko M.A., Sharipov F., Tadrist L., The temperature jump at water - air interface during evaporation, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016 (accepted);
3. Марчук И.В., Кабов О.А., Исследование процесса конденсации пара на криволинейных ребрах с учетом капиллярных сил и гравитации, Journal of Engineering Thermophysic, номер 4, том 25, 2016 год.
4. Gatapova E., Filipenko M., Technique for the measurements of the temperature profile near liquid-gas interface, MATEC Web of Conferences, 2016. <http://www.matec-conferences.org/component/issues/?task=all&Itemid=121>
5. Lyulin Yu., Tueva I., Marchuk I., Vapor condensation on curvilinear fins with condensate suction from the interfin space, MATEC Web of Conferences, 2016. <http://www.matec-conferences.org/component/issues/?task=all&Itemid=121>
6. Polikarpov A., Ho M.T., Graur I., Unsteady heat transfer in a gas mixture, MATEC Web of Conferences, 2016. <http://www.matec-conferences.org/component/issues/?task=all&Itemid=121>
7. Марчук И.В., Барский А.А., Кабов О.А., Моделирование пленочной конденсации пара на криволинейных ребрах с отсосом конденсата из межреберных канавок, Сибирский журнал индустриальной математики, номер 2, том 20, 2017 год.