

УДК 536.248.2

ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПОГРУЖЕНИИ НАГРЕТЫХ СФЕР С ЛУНКАМИ В ЖИДКОСТЬ

Ю. А. Кузма-Кичта¹, В. М. Жуков², А.М. Агальцов¹

¹ *Московский энергетический институт (Технический Университет), Москва, Россия*

² *Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

Проведено экспериментальное исследование нестационарного теплообмена при кипении фреона 113 и воды на поверхности сферических тел с луночным рельефом при свободной конвекции в широком диапазоне изменения температурных напоров. Обнаружено влияние лунок на увеличение теплоотдачи в пленочном и переходном режимах кипения жидкостей, а также кризис пленочного кипения. На основе данных, полученных с использованием высокоскоростной видеосъемки, обсуждаются особенности течения пленки пара, обтекающей поверхности сфер с луночным рельефом.

Введение

В настоящее время существует большое число исследований, посвященных проблемам интенсификации теплообмена с помощью лунок, наносимых на поверхности нагрева. В основном, все они относятся к интенсификации теплоотдачи от поверхностей теплообмена однофазным потоком, тогда как область двухфазного теплообмена остается практически не исследованной. Исключение составляют работа И.Л. Мостинского с сотрудниками [1], посвященная исследованию теплоотдачи от поверхности со сферическими впадинами при кипении воды в закризисной области в кольцевом парогенерирующем канале, а также работа Г.И. Кикнадзе с сотрудниками [2], в которой изучался кризис теплоотдачи при течении недогретой воды в кольцевых каналах с лунками. В этих работах на трубках с луночным рельефом удалось получить существенное увеличение критических тепловых нагрузок по сравнению с гладкими трубками, которое авторы объясняют влиянием вихревых структур, самогенерирующихся в лунках при обтекании двухфазным потоком. Все это позволяет предположить, что использование метода «смерчевой интенсификации теплообмена» при пленочном и переходном режимах кипения жидкостей в условиях свободной конвекции может дать положительный эффект.

Целью работы является изучение особенностей теплообмена и механизма кипения жидкостей при охлаждении сильно разогретых сфер с луночным рельефом в условиях свободной конвекции. В качестве исследуемых жидкостей с отличающимися теплофизическими свойствами использовались фреон 113 и дистиллированная вода, для которых теплообмен на сферах с гладкой поверхностью в режимах переходного и пленочного кипения достаточно хорошо изучен [3, 4].

Метод исследования и описание экспериментальной установки

Исследование теплообмена проводилось нестационарным методом путем погружения разогретой выше температуры Лейденфроста медной сферы с луночным рельефом в жидкость при атмосферном давлении. Выбор сферы в качестве рабочего участка был обусловлен отсутствием концевых эффектов, которые при проведении опытов на образцах любой геометрической формы могут приводить к образованию холодных пятен и, как следствие, к преждевременному сходу пленки пара, тем самым

существенно завышая значения температурного напора $\Delta T_{кр2}$ и плотности теплового потока $q_{кр2}$. Для измерения температуры поверхности сферы использовалась хромель-алюмелиевая термопара, которая с помощью терлостойкого клея ВС-10Т заделывалась в глухое отверстие диаметром 1 мм и глубиной 19 мм. Кроме того, проводились измерения температуры рабочей жидкости и нагревательного устройства, а также давление в рабочем баке экспериментальной установки. Сигналы термопар подавались на аналого-цифровой преобразователь Е 24, подключенный к персональному компьютеру с установленной специальной программой. Сферы с помощью тонкостенного трубчатого зонда поднимались в зону нагрева, где выдерживались при заданной температуре, а затем погружались в жидкость при синхронном включении системы сбора и обработки данных. Опыты проводились на экспериментальной установке, снабженной смотровыми окнами для проведения визуальных наблюдений и видео-фотосъемки (рис.1). При проведении опытов во внутреннюю полость камеры, в которой производился нагрев сферических образцов, подавался аргон для предотвращения или уменьшения окисления поверхности сферы при высокой температуре нагрева. Как показано в [3, 5], малотеплопроводные продукты окисления на поверхности нагрева, образующиеся в опытах с водой при нагреве сфер до 750 К, могут приводить к раннему сходу паровой пленки, деформации кривой кипения и разбросу опытных данных, полученных при одинаковых режимных параметрах.

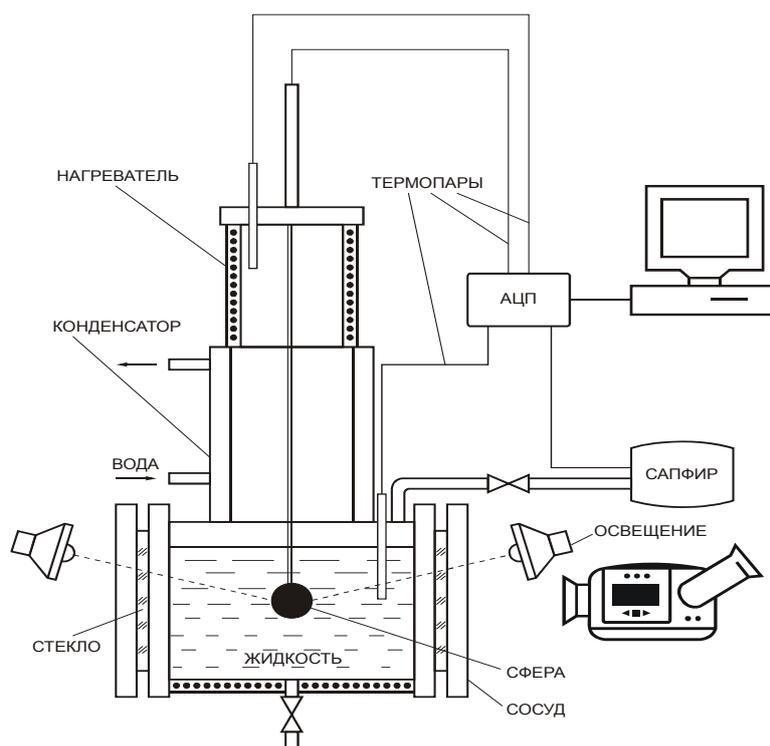


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Для сравнения данных, полученных при кипении на сфере с луночным рельефом, проводились также опыты со сферой без покрытия. Для нахождения кривых кипения при охлаждении сферы использовалась методика, основанная на регистрации изменения ЭДС термопары от времени и ее преобразовании в зависимость плотности теплового потока q от температурного напора ΔT . Мгновенное значение плотности

теплового потока q на поверхности сферы рассчитывалось из уравнения теплового баланса

$$q = - \frac{C_p (T) m}{F} \cdot \frac{dT}{d\tau},$$

Более подробно методика исследования и описание экспериментальной установки изложены в [6]. Луночный рельеф на медной поверхности сферы создавался с помощью специального устройства путем выдавливания лунок пуансоном, на конце которого заделывался стальной шарик диаметром 5мм. Способ нанесения лунок позволял изменять геометрию их расположения и размеры. В качестве исходной конфигурации на поверхность сферы были нанесены 31 лунка глубиной $h=0,41$ мм и диаметром $d=2,5$ мм ($h/d=0,164$), расстояние между лунками по долготе сферы равно 5,2мм (рис.2), среднее значение плотности распределения лунок на поверхности сферы составляло 12%. Следует отметить, что плотность лунок на сфере неравномерная: при заданном продольном расстоянии между ними: максимальная плотность лунок - на полюсах сферы, а минимальная – на экваторе. Кроме того, в условиях, когда в пленочном режиме кипения пузыри с границы раздела отрываются в самой верхней части сферы, течение пленки пара носит диффузорно-конфузорный характер, с увеличением поперечного сечения в нижней половине и уменьшением в верхней, что приводит к резкому возрастанию средней скорости пленки пара на вершине сферы. Это означает, что эффекты вихревого течения вероятно можно наблюдать в верхней половине сферы. В режиме пленочного кипения при $Vi = 0,06$ погрешность определения температурного напора ΔT оценивалась в 10%, плотности теплового потока q – 5% и коэффициента теплоотдачи α - 15%.



Рис.2. Медная сфера с лунками. 31 лунка, $d=2,5$ мм, $h=0,41$ мм, $h/d=0,164$ мм $l=5,2$ мм

Нестационарный теплообмен при кипении фреона 113 и воды на поверхности сферы с лунками

Опыты по теплообмену при кипении фреона 113 на поверхностях с луночным рельефом проводились в диапазоне температурных напоров до 250 К, охватывающем все режимы кипения при температуре насыщения и в условиях недогрева жидкости. Основное внимание уделялось изучению влияния луночного рельефа, наносимого на поверхность сферы, на основные характеристики теплообмена в переходном и пленочном режимах кипения фреона 113 (теплоотдача, вторая критическая плотность теплового потока). Представленные на рис.3 зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора для сфер с луночным рельефом и гладкой поверхностью показывают, что влияние луночного рельефа на интенсивность теплообмена наиболее

сильно проявляется в области малых температурных напоров вблизи кризиса пленочного кипения при уменьшении толщины пленки пара. Данные по теплоотдаче для заданной геометрии луночного рельефа лежат приблизительно на 30% выше результатов для гладкой сферы.

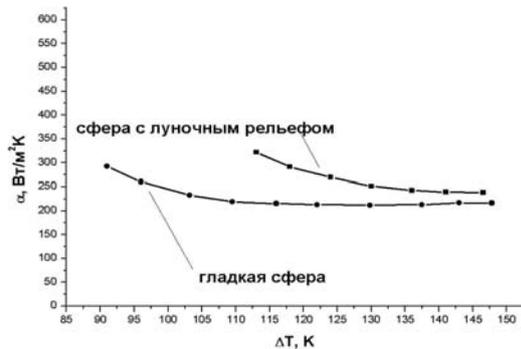


Рис.3. Влияние луночного рельефа на коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении фреона 113. $T_s=321K$

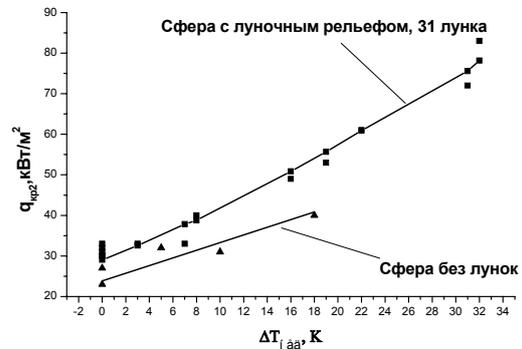


Рис. 4. Влияние недогрева жидкости на прекращение пленочного кипения фреона 113

С увеличением недогрева жидкости толщина пленки пара уменьшается, что приводит к прекращению пленочного кипения при больших значениях $\Delta T_{кр2}$ и $q_{кр2}$. На рис.4 представлены зависимости критической плотности теплового потока $q_{кр2}$ от недогрева $\Delta T_{нд}$ для сфер с гладкой поверхностью и луночным рельефом, которые демонстрируют более сильное влияние лунок на прекращение пленочного кипения по сравнению с гладкой поверхностью.

Сравнение данных по теплообмену в пленочном режиме кипения, полученных для сферы с луночным рельефом, гладкой сферы и сферы с медным пористым покрытием [6], показывает, что теплоотдача для сферы с лунками выше, чем для гладкой сферы и ниже, чем для сферы с медным пористым покрытием (рис.5).

Относительно небольшое влияние луночного рельефа на теплоотдачу в пленочном режиме кипения по сравнению с пористым покрытием, можно объяснить малой плотностью распределения лунок на поверхности сферы (~12%). Кроме того, исследуемая конфигурация лунок ($h/d=0,164 < 0,2$) относится к классу мелких лунок, для которых эффект интенсификации менее значителен, чем для глубоких лунок ($h/d > 0,2$) [7].

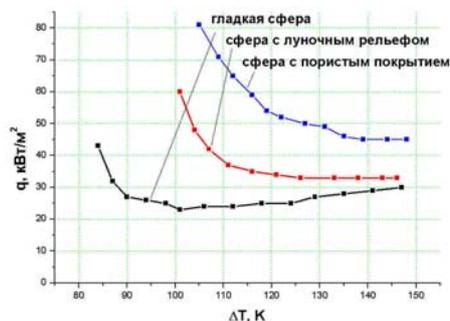


Рис.5. Теплообмен при пленочном кипении фреона 113 на сферах с различным рельефом поверхности

Как показали результаты визуальных наблюдений, на поверхности с луночным рельефом, сход пленки пара иногда возникал в нижней части сферы в отличие от гладкой сферы, когда сход пленки всегда происходил в ее верхней части. В области пузырькового кипения лунки на поверхности сферы практически не оказывают влияния на теплообмен, поскольку плотность лунок на поверхности сферы была выбрана небольшой.

В случае кипения воды в опытах использовалась та же сфера с лунками, что и при кипении фреона 113. На рис.6 представлены типичные кривые изменения температур во времени для гладкой сферы и сферы с лунками при их охлаждении в воде, недогретой до температуры насыщения. Из рисунка видно, что процесс охлаждения сферы с лунками заканчивается ранее, чем охлаждение гладкой сферы, несмотря на то, что исходная температура для сферы с лунками на 50 К выше температуры гладкой сферы. В области резкого изменения температуры, соответствующего кризисам пленочного и пузырькового кипения при больших тепловых потоках наблюдается расхождение температурных кривых, причем темп изменения температуры сферы с лунками свидетельствует о более интенсивном отводе тепла по сравнению с гладкой сферой.

На рис.7 представлены кривые кипения воды при температуре насыщения для гладкой сферы и сферы с лунками. Как установлено, влияние луночного рельефа отчетливо проявляется в пленочном и переходном режимах кипения: значения $\Delta T_{кр2}$ и $q_{кр2}$ возрастают. В отличие от фреона 113 нанесение луночного рельефа при кипении воды приводит также к заметному увеличению значений $\Delta T_{кр1}$ и $q_{кр1}$, что вероятно связано с увеличением скорости течения водяного пара в пленке по сравнению со скоростью течения пара фреона 113. Таким образом, в опытах с фреоном 113 и водой обнаружено, что нанесение лунок приводит к росту коэффициента теплоотдачи при пленочном кипении, а также повышению значений $\Delta T_{кр2}$ и $q_{кр2}$ по сравнению с гладкой поверхностью, что свидетельствует о влиянии лунок на течение пара в пленке.

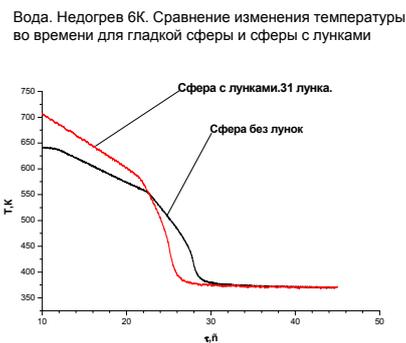


Рис.6. Изменение температуры при охлаждении сфер с гладкой поверхностью и луночным рельефом в воде, $\Delta T_{нед} = 6$ К

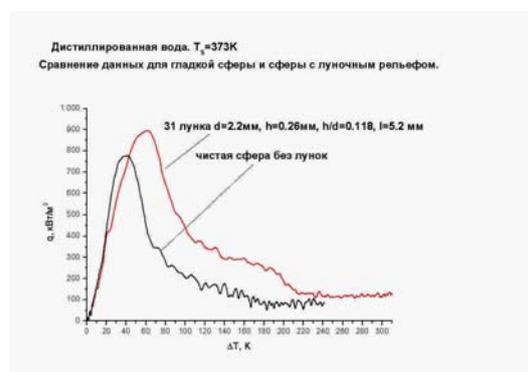


Рис.7. Влияние луночного рельефа на кривую кипения воды $T_s = 373$ К

Изучение механизма кипения фреона 113 и воды на сферах с лунками

Для изучения механизма кипения фреона 113 использовалась высокоскоростная видеокамера МОСАМ 4000 фирмы Mikrotрон с частотой кадров до 2004 Гц и экспозицией до 0,02 мс. Опыты проводились как в отраженном, так и проходящем свете от источника освещения. Освещение в проходящем свете позволило получать изображение, на котором жидкость была белой, тогда как покрытая плёнкой пара сфера имела чёрные или близкие к чёрному цвету тона. Фокусировка проводилась при меньшей выдержке и большем разрешении с передней подсветкой, фокус наводился на проволоку диаметром 2 мм, с помощью которой сфера крепилась к трубчатому зонду. В опытах производилась видеосъемка правой нижней или боковой стороны сферы вблизи ее экватора. При съемке в отраженном свете в переходном режиме кипения насыщенной жидкости обнаружены кольцевые образования пара, а также струи пара, выходящие из лунок. (Рис.8).

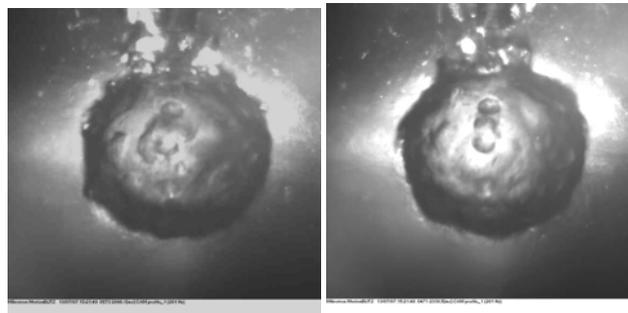


Рис.8. Переходный режим кипения фреона 113 на сфере с лунками ($f=200$ Гц).

Кроме того, в ряде опытов вблизи экватора сферы наблюдался отрыв с пленки пара мелких пузырьков пара диаметром порядка 0,1-0,2мм (Рис.9). В опытах с недогревом обнаружено возникновение вторичных течений жидкости, обусловленных градиентом температуры вблизи границы раздела пар-жидкость, и ускоряющих течение пара в пленке. Было обнаружено, что на границе раздела пар-жидкость существуют нелинейные волны с изменяющимися во времени амплитудами, значения которых соизмеримы или превышает среднюю толщину паровой плёнки ($\sim 0,2-0,3$ мм). Амплитуда этих волн увеличивалась к вершине сферы и достигала 0,7 мм. Анализ видеокадров показал, что на границе раздела фаз существуют нелинейные волны, напоминающие волны плёнки жидкости [8], стекающей вдоль вертикальной пластины или цилиндра. Их фазовая скорость равна $\frac{d\omega}{dk} = 0,6$ м/с, длина волны - $\lambda \approx 7 \div 9$ мм, волновое число - $k \approx 0,7 \div 0,9$ мм⁻¹, частота $\approx 60 \div 80$ Гц. (Рис.9). На рисунке показан характерный вид задней кромки волн.

На основе анализа Фурье для эволюции координаты одной точки во времени на границе раздела фаз обнаружены одиночные волны с частотой ≈ 100 Гц и $\approx 3,6$ Гц, а также группа волн в диапазоне частот $\approx 70 \div 75$ Гц.



Рис.9. Характерные профили волнового течения пленки пара на поверхности сферы с лунками. ($f=2004$ Гц, экспозиция 0,02 мс)

Для исследования механизма кипения воды на сферах с луночным рельефом использовалась высокоскоростная цифровая видеокамера VS FAST фирмы Videoscan с частотой кадров 500 Гц и экспозицией 1 мс. Съемка производилась в отраженном свете при кипении недогретой жидкости.

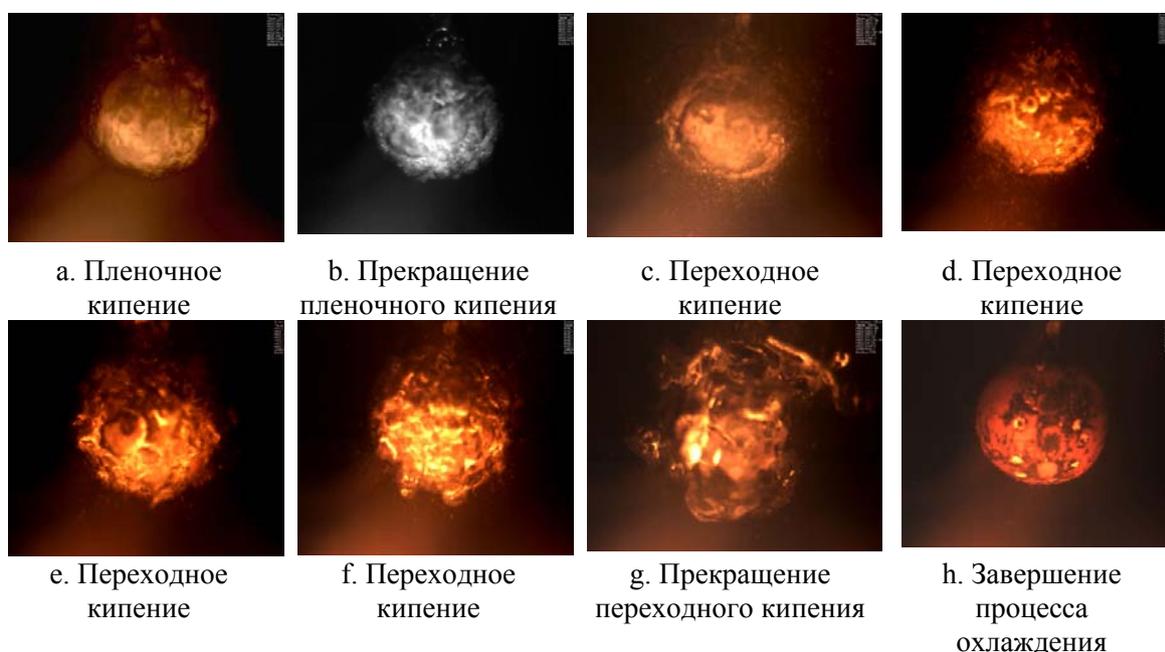


Рис. 10. Видеокадры процесса кипения воды на сфере с лунками. Недогрев жидкости 14 К

На рис. 10а-10h представлены видеокадры процесса кипения воды при пленочном, переходном и пузырьковом режимах на поверхности с луночным рельефом. Видеокадр на рис 10а соответствует пленочному кипению. Между кадрами 10а и 10б интервал времени равен 1 мс. При прекращении пленочного кипения на поверхности раздела фаз происходят интенсивные движения паровых образований и раздается характерный щелчок (рис.10б). При переходном кипении (рис.10с) мельчайшие пузырьки пара, образующиеся в результате попадания холодной жидкости на сильно разогретую поверхность сферы, выбрасываются в радиальном направлении. На сфере появляются участки, занятые фрагментами паровой пленки, и участки, смоченные жидкостью. Развитие переходного кипения можно наблюдать на рис.10с - рис.10ф. На поверхности раздела фаз видно образование ряби.

На видеокадре, показанном на рис.10д, над некоторыми лунками возникают кольцевые образования пара. По мере охлаждения сферы площадь ее поверхности покрывалась большими пузырями пара, которые закрывали всю сферу (Рис.10ф). При прекращении

переходного кипения (рис.10g) плотность теплового потока возрастала и паровое «облако» с низкочастотными колебаниями увеличивалось в размерах. На рис. 10h видна поверхность сферы с луночным рельефом после прекращения процесса кипения со следами отложений, неравномерно распределенных по поверхности нагрева. Обращает на себя внимание отсутствие отложений в лунках, что можно объяснить воздействием вихрей и струй пара, вырывающихся из лунок. Проведенные специальные опыты показали, что при длительном контакте с водяным паром (~3 часа) сильно нагретой медной сферы до 750 К на ее поверхности происходит интенсивный процесс коррозии с образованием достаточно толстого красного слоя оксида меди (по данным [5] ~20-30 мкм). В нижней части сферы, где плотность лунок больше, наблюдается отслоение толстого слоя оксида меди. В углублениях других лунок, расположенных в верхней части сферы, можно отметить уменьшение слоя оксидов. Таким образом, возникновение вихревых парожидкостных структур приводит к разрушению оксидного слоя, образовавшегося в результате коррозии металла.

Выводы

1. Впервые получены опытные данные по нестационарному теплообмену при кипении фреона 113 и воды на поверхности сферы с луночным рельефом (31 лунка, $d=2,5$ мм, $h=0,41$ мм, $l/d=0,164$ мм) в условиях свободной конвекции.
2. Полученные экспериментальные данные для сфер с луночным рельефом демонстрируют влияние лунок на теплоотдачу при переходом и пленочном режимах кипения, а также на характеристики прекращения пленочного кипения (возрастание в пределах 20-30%). Интенсивность отвода тепла при пленочном кипении на облуненной сфере ниже, чем для сферы с пористым покрытием в исследованном диапазоне параметров.
3. При охлаждении сферы наблюдались конвективные токи жидкости, взаимодействующие с волновой структурой пленки пара. В переходном режиме кипения недогретого фреона на поверхности с луночным рельефом наблюдались струи пара, вырывающиеся из лунок.
4. Обнаружено, что луночный рельеф на сфере приводит к уносу отложений, образовавшихся на поверхности нагрева в результате коррозии и выпадения солей.

Авторы выражают благодарность В.А. Ленькову, К.А. Ходакову и В.Ф. Чиннову за помощь в проведении опытов и обсуждении полученных результатов. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 05-08-18113 а).

Литература

- [1] Мостинский И.Л., Гешеле В.Д., Горяинов Д.А., Раскатов И.П. Теплоотдача от поверхности со сферическими впадинами при кипении воды и пароводяной смеси в закритической области. ИФЖ, 2001. Т.74. №3. С.13-19.
- [2] Кикнадзе Г.И., Крючков И.И., Чушкин Ю.В. Кризис теплоотдачи при самоорганизации смерчеобразных структур в потоке теплоносителя. Препринт ИАЭ-4841/1. М.: ЦНИИАтоминформ, 1989. 29 с.
- [3] Bergles A.E., Thompson W.G. Relationship of quench data to steady state pool boiling data. Int. J. Heat Mass Transfer. 1970. Vol. 13. P. 55-68.
- [4] Аметистов Е.В., Клименко В.В., Павлов Ю.М., Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергоатомиздат. 1995. С.400.

- [5] Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю. П., Кубриков К.Г. Исследование особенностей развития и схода паровой пленки на полусферических поверхностях. Сборник трудов V Международного минского форума. 24-28 мая 2004 г. Минск. Секция № 5. Доклад 5-17.
- [6] Жуков В.М., Кузма-Кичта Ю.А., Леньков В.А., Рахманов А.А. Нестационарный теплообмен при кипении фреона 113 на поверхности сферы с пористым покрытием. Труды 4 РНКТ. – М.: МЭИ. 2006. Т.4. С. 96-99.
- [7] Щукин А.В., Козлов А.П., Агачев Р.С., Чудновский Я.П. Интенсификация теплообмена сферическими выемками при воздействии возмущающих факторов. Под.ред. акад. В.Е. Алемасова. Казань: Изд-во КГТУ, 2003, 143с.
- [8] Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Изд-во Наука. Новосибирск. 1984. С. 302.