

В.М. Жуков¹, Ю.А. Кузма-Кичта², В.А. Ленков¹, А.А. Рахманов³

Институт высоких температур РАН, Москва, Россия (1)

Московский энергетический институт (технический университет), Россия (2)

Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН, Москва, Россия (3)

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ФРЕОНА 113 НА ПОВЕРХНОСТИ СФЕРЫ С ПОРИСТЫМ ПОКРЫТИЕМ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования нестационарного теплообмена при кипении фреона 113 на сфере с медным пористым покрытием в условиях свободной конвекции. При кипении насыщенного и недогретого до температуры насыщения фреона обнаружены кратковременные пики теплового потока в пленочном и пузырьковом режимах кипения. Обсуждаются обнаруженные особенности влияния пористого покрытия на теплообмен при охлаждении сферы, разогретой до высокой температуры, в жидкости.

1. ВВЕДЕНИЕ

Эффективным методом интенсификации теплообмена при кипении является нанесение пористых покрытий на поверхность нагрева [1,2]. Отмеченные эффекты интенсификации теплообмена при кипении зависят от теплофизических свойств, толщины, шероховатости поверхности покрытия. Существует немало практических ситуаций, когда процесс кипения развивается в условиях резкого охлаждения или нагрева теплоотдающей поверхности (закалка металлических изделий, охлаждение трубопроводов криогенными жидкостями, потеря теплоносителя в каналах реакторов, появление «нормальной зоны» при переходе сверхпроводника из сверхпроводящего состояния в «нормальное»). В этих условиях характеристики теплообмена при кипении зависят от скорости охлаждения или нагревания. В [3] были обнаружены некоторые особенности теплообмена в нестационарных условиях, однако они относятся к непроницаемым малотеплопроводным покрытиям.

Целью работы является изучение особенностей нестационарного теплообмена в широком диапазоне температурных напоров при охлаждении сферы с пористым металлическим покрытием в насыщенном и недогретом до температуры насыщения фреоне 113.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Как и в [4,5], исследование теплообмена при кипении фреона 113 проводилось нестационарным методом путем погружения разогретой выше температуры Лейденфроста медной сферы в жидкость при атмосферном давлении. Выбор сферы в качестве рабочего участка был обусловлен отсутствием концевых эффектов, которые при проведении опытов квазистационарным методом на образцах любой

геометрической формы могут приводить к образованию холодных зон, преждевременному сходу пленки пара и увеличению значений $q_{кр2}$ и $\Delta T_{кр2}$. На поверхность сферы диаметром $D = 0,02$ м путем спекания в водородной среде наносилось пористое покрытие из порошка меди с размером частиц 0,063 мм. Толщина покрытия 0,4 мм, пористость - около 50%. Сферы с помощью специального тонкостенного трубчатого зонда устанавливались в зоне нагрева, где выдерживались при заданной температуре, а затем погружались в жидкость при синхронном включении системы сбора и обработки данных.

Для измерения температуры поверхности сфер использовалась хромель-алюмелиевая термопара с диаметром термоэлектродов 0,2 мм, которая с помощью термостойкого клея ВС-10Т заделывалась в глухое отверстие диаметром 1 мм и глубиной 19 мм, просверленное в сфере под углом 45° к вертикальной оси. Кроме того, проводились измерения температуры рабочей жидкости и нагревательного устройства. Сигналы термопар подавались на 24-разрядный аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) Е24 фирмы L-Card, настроенный на частоту 20-40 Гц, подключенный к персональному компьютеру с установленной специальной программой. Измерение пульсаций давления в паровом пространстве рабочего бака, возникающих в процессе кипения на сферах, производилось с помощью электронного преобразователя Сапфир-22М ДД.

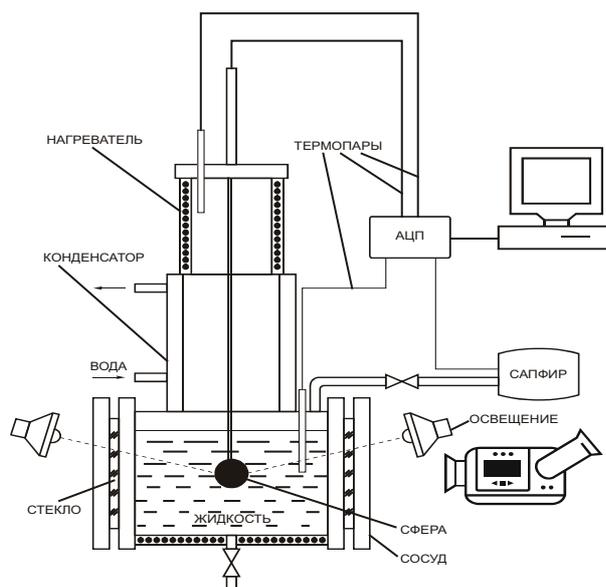


Рис.1. Схема экспериментальной установки

Опыты проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. Кипение жидкости осуществлялось в горизонтально расположенном цилиндрическом сосуде, снабженном двумя смотровыми окнами для проведения визуальных наблюдений и видео-фотосъемки. К верхней части сосуда с помощью фланцевого соединения крепился вертикальный конденсатор, охлаждаемый водопроводной водой. Над конденсатором устанавливалась камера, снабженная снаружи электрическим нагревателем для нагрева сферических образцов. Поддержание исследуемой жидкости в сосуде при заданной температуре также осуществлялось с помощью электрического нагревателя.

Для нахождения кривых кипения при охлаждении образца использовалась методика, основанная на регистрации изменения его температуры от времени и преобразовании в зависимость q от ΔT . Мгновенное значение q на поверхности сферы рассчитывалось из уравнения теплового баланса:

$$q = -\frac{Cm}{F} \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (1)$$

где dT/dt - скорость охлаждения сферы. При известных теплофизических свойствах материала, размерах и массе сферы задача сводится к нахождению производной зависимости температуры от времени. Для сферы с пористым покрытием температура и плотность теплового потока относились к поверхности, на которую наносилось пористое покрытие. Границе прекращения пленочного кипения соответствует минимальное значение скорости изменения температуры во времени dT/dt , а максимальное изменение скорости dT/dt соответствует точке кризиса пузырькового кипения.

Программа обработки в реальном времени позволяла пересчитать значения ЭДС термопары, установленной в сфере, в температуру и записывать в файл функцию $T = f(\tau)$. После окончания измерений программа пересчитывала данные в виде $q = f(T)$. Далее файл данных $q(T)$ вводился в программу построения и обработки данных Microcal Origin. В процессе охлаждения сфер наблюдались небольшие случайные колебания температуры тела, что приводило к необходимости сглаживания кривой $q(T)$ для уменьшения погрешности при нахождении dT/dt и построения соответствующего графика. В режиме пленочного кипения при $Bi = 0,06$ погрешность ΔT составляет 10%, q - 5% и α - 15%.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Кипение насыщенной жидкости

Сфера без покрытия. Нестационарный теплообмен при кипении фреона 113 исследовался на поверхности сферы без покрытия при температуре насыщения жидкости. Обнаружено, что длительный нагрев сферы при температуре свыше 200°C с последующим ее погружением в кипящую жидкость может вызывать на поверхности сферы загрязнения в виде отложений и продуктов разложения фреона

113. Загрязнения на поверхности нагрева, особенно в случае кипения на капиллярно-пористых покрытиях, могут приводить к дополнительной дестабилизации течения паровой пленки и разбросу опытных данных, полученных при одинаковых режимах параметров [6].

На рис. 2 для сравнения представлены кривые кипения фреона 113 в условиях большого объема, полученные в настоящей работе и опытах [7,8] с использованием различных методов нагрева рабочих участков. В [7] при проведении опытов использовался стационарный метод нагрева конденсирующимся водяным паром высокого давления медного горизонтального диска $D = 42$ мм, а в [8] – квазистационарный метод нагрева и охлаждения медного блока массой 30 кг, торец которого был выполнен в виде горизонтальной пластины размером 30×40 мм. Здесь на рис. 2 приведены результаты расчета по формуле (2):

$$Nu_D = 0,175 Ar_D^{1/3} Pr_f^{1/3} f(K), \quad (2)$$

для турбулентного режима течения пленки пара на поверхности сферы [9].

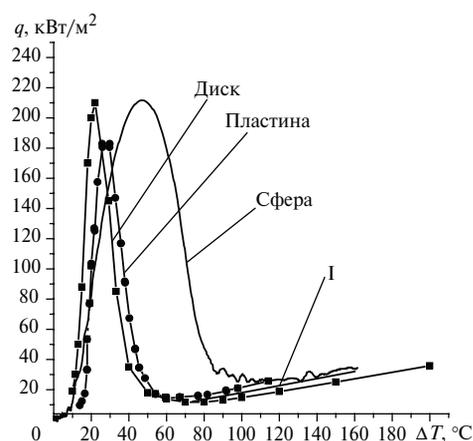


Рис. 2. Кривые кипения фреона 113 на поверхностях без покрытий: $T_S = 47,8^\circ\text{C}$, $P_S = 0,1$ МПа; сфера – настоящее исследование, диск – данные [7], пластина – данные [8], I - расчет по формуле (2) [9]

Из рис. 2 видно, что полученные данные для сферы и результаты [7,8] удовлетворительно согласуются в пузырьковом режиме кипения в области малых и умеренных плотностей теплового потока, а значения $q_{кр1}$ практически совпадают с данными [7]. В области пленочного кипения полученные данные совпадают с результатами [8] и расчетом по формуле (2) [9].

Значения $\Delta T_{кр1}$ и $q_{кр2}$ оказались существенно выше значений, полученных в [7,8]. Как отмечалось в [3,6] на основе анализа большого массива экспериментальных данных, значения $\Delta T_{кр1}$ и $q_{кр2}$, определенные нестационарным методом, располагаются выше величин, полученных в стационарных опытах.

Сфера с покрытием. На рис. 3 приведены видеок кадры различных режимов кипения фреона 113 на сфере с покрытием при температуре насыщения. В

отличие от сферы без покрытия процесс кипения был неустойчивый и сопровождался пульсациями поверхности нагрева в области пленочного кипения. При охлаждении сферы в области пузырькового режима кипения при малых плотностях теплового потока в течение продолжительного времени наблюдалось образование большого количества мелких пузырьков пара.

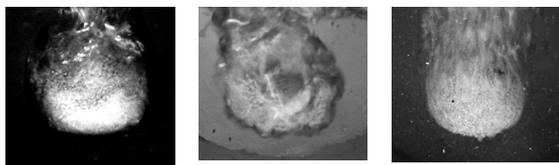


Рис. 3. Пленочный, переходный и пузырьковый режимы кипения фреона 113: $T_S = 47,8^\circ\text{C}$, $P_S = 0,1\text{ МПа}$, медное пористое покрытие

Приведенные на рис. 4 кривые изменения во времени температуры сферы и давления пара при кипении фреона-113 на сфере с медным пористым покрытием показывают, что наиболее резкое изменение этих параметров наблюдается вблизи кризиса кипения. Начало возрастания давления пара соответствует кризису пленочного кипения, при котором происходит разрушение устойчивого течения пленки пара и появление контактов жидкости с поверхностью сферы. Пик на кривой давления $\Delta P = 2,5\text{ кПа}$ соответствует $q_{кр1}$.

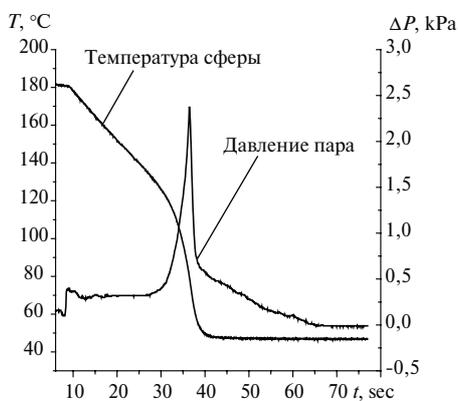


Рис.4. Изменение давления пара и температуры сферы с пористым покрытием во времени: $T_S = 47,8^\circ\text{C}$, $P = 0,1\text{ МПа}$

На рис. 5 представлены кривые кипения для сфер без покрытия и с покрытием. Увеличение теплоотдачи наблюдается в переходном и пузырьковом режимах кипения. Значения $\Delta T_{кр2}$ и $q_{кр2}$ резко возрастают, что свидетельствует о влиянии шероховатости поверхности пористого покрытия (диаметр частиц покрытия соизмерим с расчетной толщиной парового слоя) на течение пара, обтекающего сферу. Значение $\Delta T_{кр2}$ увеличивается до 140°C , а значение $q_{кр2}$ увеличивается почти в два раза по сравнению с поверхностью без покрытия и достигает величины 40 кВт/м^2 .



Рис. 5. Кривые кипения на сфере с покрытием и без покрытия: $T_S = 47,8^\circ\text{C}$, $P_S = 0,1\text{ МПа}$

3.2. Охлаждение сфер в жидкости, недогретой до температуры насыщения

Для повышения интенсивности теплообмена при кипении в условиях свободной и вынужденной конвекции в каналах, широко используется недогретая до температуры насыщения жидкость. Увеличение теплоотдачи, как правило, наблюдается во всех режимах кипения. В проведенных опытах значение недогрева достигало примерно 27°C и было ограничено температурой охлаждающей воды в конденсаторе. Характерное изменение основных параметров q , T и ΔP во времени при кипении фреона 113 на сфере с пористым покрытием при недогреве 17°C приведено на рис. 6. Установлено, что значения $q_{кр1}$ и соответствующие ему ΔP существенно растут ($q_{кр1} = 300\text{ кВт/м}^2$, $\Delta P = 7,5\text{ кПа}$). При пленочном режиме кипения недогрев жидкости приводит к возрастанию теплоотдачи вследствие уменьшения толщины паровой пленки.

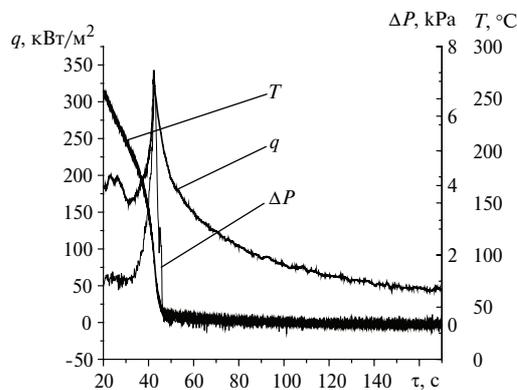


Рис. 6. Изменение температуры, плотности теплового потока и давления пара во времени при кипении фреона 113 на сфере с пористым покрытием: $P_S = 0,1\text{ МПа}$, $\Delta T_{нед} = 17^\circ\text{C}$

На рис. 7 приведены кривые кипения фреона 113 на сфере с пористым покрытием при $T_{ж} = T_S$ и разных значениях $\Delta T_{нед}$. Здесь для сравнения приведена кривая для сферы без покрытия и сферы с покрытием при $T_{ж} = T_S$. Из рис. 7 видно, что при максимальном значении $\Delta T_{нед} = 27^\circ\text{C}$, достигнутом в эксперименте, $q_{кр1}$ увеличилось примерно в 1,5 раза, а $q_{кр2}$ в два раза.

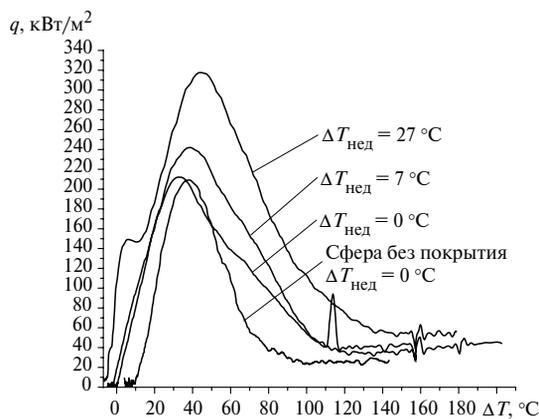


Рис 7. Влияние недогрева жидкости до температуры насыщения на теплообмен при кипении фреона

Обращает на себя внимание возникновение на кривых кипения двух пиков в условиях недогрева жидкости: первый – в пленочном режиме при $\Delta T_{\text{нед}} = 7^\circ\text{C}$, аналогичный обнаруженным в [5,8], другой – при $\Delta T_{\text{нед}} = 27^\circ\text{C}$ в пузырьковом режиме. Пик плотности теплового потока на пузырьковой ветви кривой кипения сопровождался всплеском давления, что указывает на увеличение парообразования при охлаждении сферы в области $\Delta T \sim 5^\circ\text{C}$. Вероятно, такое явление связано с кратковременной активацией дополнительных центров парообразования, когда температура скелета капиллярно-пористого покрытия достигает температуры близкой к температуре насыщения жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Медное пористое покрытие приводит к сокращению времени захлаживания сферы (по сравнению со сферой без покрытия), деформации кривой кипения и увеличению теплоотдачи во всех режимах кипения фреона 113.

2. В области больших значений недогрева жидкости $\Delta T_{\text{нед}} > 7^\circ\text{C}$ в пузырьковом и пленочном режимах кипения обнаружены кратковременные пики теплового потока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 05-08-18113

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

T — температура стенки, $^\circ\text{C}$;
 T_s — температура насыщения, $^\circ\text{C}$;
 ΔT — перегрев стенки, $^\circ\text{C}$;
 $\Delta T_{\text{нед}}$ — недогрев жидкости до температуры насыщения, $^\circ\text{C}$;
 $\Delta T_{\text{кр1}}$ — первый критический температурный напор, $^\circ\text{C}$;
 $\Delta T_{\text{кр2}}$ — второй критический температурный напор, $^\circ\text{C}$;
 P — давление, МПа;
 ΔP — перепад давления, Па;

q — плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 $q_{\text{кр1}}$ — первая критическая плотность теплового потока, $\text{кВт}/\text{м}^2$;
 $q_{\text{кр2}}$ — вторая критическая плотность теплового потока, $\text{кВт}/\text{м}^2$;
 a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 C — теплоемкость металла, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;
 C_p — теплоемкость при постоянном давлении, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;
 g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;
 m — масса тела, кг;
 R, D — радиус и диаметр сферы, м;
 F — площадь поверхности сферы, м^2 ;
 r — теплота испарения, $\text{кДж}/\text{кг}$;
 α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$;
 λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$;
 ρ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ν — кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;
 τ — время, с;
 $Ag_D = (g D^3 / \nu^3) (\rho_f / \rho_v - 1)$;
 $Bi = \alpha R / \lambda$;
 $Nu_D = \alpha D / \lambda_f$;
 $K = r / (C_{pf} \Delta T)$;
 $Pr_f = \nu_f / a$.

Индексы:

f — жидкость;
 v — пар;
 s — насыщение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузма-Кичта Ю.А. Методы интенсификации теплообмена. М.: Издательство МЭИ, 2001. 189 с.
2. Ковалев С.А., Соловьев С.Л. Испарение и конденсация в тепловых трубах. М.: Наука, 1989. 231 с.
3. Кошкин В.К., Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Нестационарный теплообмен. М.: Машиностроение, 1973. 328 с.
4. Кузма-Кичта Ю.А., Ленков В.А., Сорокин Д.Н. Влияние пористых покрытий на теплообмен при пленочном кипении // ИФЖ. 1981. Т. XL. № 4. С. 592-596.
5. Жуков В.М., Кузма-Кичта Ю.А., Ленков В.А. Особенности теплообмена при захлаживании сфер с пористыми покрытиями в кипящих жидкостях // Труды 3 РНКТ. М.: Издательство МЭИ, 2002. Т. 4. С. 112-117.
6. Bergles A.E., Thompson W.G. Relationship of quench data to steady state pool boiling data // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1970. Vol. 13. P. 55-68.
7. Kovalev S.A., Zhukov V.M., Kuzma-Kichta Ya.A. Investigation of boiling heat transfer of Freon-113 in the wide range of temperature differences. // Proc. Intern. Summer School Heat Mass Transfer, Yugoslavia. 1969. Vol. 1. P. 271-277.
8. Ковалев С.А., Гешеле В.Д. Экспериментальное исследование переходного кипения // ТВТ. 1982. Т. 20. № 2. С. 389 – 391
9. Grigoriev V.A., Klimenko V.V. Pool boiling from submerged spheres // Proc. of 7 Intern. Heat Transfer Conf. Munich. 1982. Vol. 4. P. 387-392.