DOI: 10.17117/na.2015.08.885

Поступила (Received): 20.08.2015

<http://ucom.ru/doc/na.2015.08.885.pdf>**Сироткина А.Л.****К вопросу о влиянии пленки из наночастиц на поверхности нагрева на процесс кипения наножидкости****Sirotkina A.L.****Towards to explanation of nanoparticles film on the heated surface impact on nanofluids boiling process**

В статье рассматривается вопрос влияния пленки из наночастиц на поверхности нагревателя на процесс кипения и кризис кипения. Описывается история вопроса, современные исследования. Рассматриваются теоретические подходы и модели

Ключевые слова: наножидкость, кризис кипения, кипение, смачиваемость

The paper contains description of nanoparticle film on the heated surface impact on nanofluids boiling process and boiling crisis. Problem history and modern researches are considered. Theoretical approaches and models are described

Key words: nanofluid, boiling crisis, boiling, wettability

Сироткина Александра Львовна

Магистр, аспирант

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СПб, ул. Политехническая, 29

Sirotkina Aleksandra Lvovna

Master, graduate

St.-Petersburg state polytechnic university the Peter Great

St.-Petersburg, Politechnicheskaya st., 29

Достаточно давно замечено, что характеристики поверхности нагрева существенно влияют на процесс кипения и на кризис кипения. В частности, к ним относятся смачиваемость и шероховатость поверхности (стоит отметить, что эти две характеристики связаны между собой). Основным параметр, определяемый ими, – краевой угол смачивания θ , от величины которого зависят критический диаметр парового пузыря, время наступления кризиса и т.п.

В середине 20 в. В.И. Яшновым была проведена серия работ по изучению влияния смачиваемости поверхности нагрева на кризис кипения в большом объеме на трубке и пластине (результаты представлены в [1]). Опыты проводились в несколько серий: кипение на трубках из нержавеющей стали 8-9 класса чистоты; исследование влияния шероховатости поверхности нагрева – обработка наждачной бумагой; кипение на предварительно прокаленных стальных трубках (покрытых оксидной пленкой); кипение на стальной поверхности, подвергшейся травлению кислотами; кипение на горизонтальных, поставленных на ребро пластинках.

Анализ результатов данных опытов позволил автору утверждать, что «все многочисленные и различные по своей физической сущности факторы,

влияющие на кризис, можно охарактеризовать и количественно оценить единой величиной – краевым углом» [1, с.84].

Итак, уже первые исследования кипения и кризиса кипения продемонстрировали, что характеристики данных процессов очень сильно зависят от свойств поверхности. Очевидно, что, модифицируя поверхность, можно добиться более высоких критических потоков.

Почти 50 лет спустя вопрос все еще не потерял своей актуальности. Например, в работе [2] рассматривается влияние покрытий различного вида на теплоотдачу при кипении. В качестве примера приведены: покрытие пятнами фторопласта, сплошной пленкой фторопласта, перфорированной пленкой полимерного материала; биметаллические трубки (сталь плюс покрытие медью, цинком, оловом, хромом, никелем, кадмием); наноразмерные покрытия – диоксид титана, диоксид кремния.

Основные выводы, к которым приходит автор в ходе анализа экспериментальных данных, сводятся к следующему [2, с.266]: нанесение какого-либо покрытия на металл изменяет условия его смачивания, что приводит, как правило, к интенсификации теплоотдачи. Однако в то же время покрытие может являться хорошим теплоизолятором. Соотношение вышеизложенных факторов и определяет конечный эффект.

Стремление к уменьшению возможности покрытия служить неким теплоизолятором привело к переходу на наномасштабы. Нанесение на поверхность покрытия, имеющего толщину порядка 100 нм и пористую структуру различными напылениями и т.п. возможно, однако достаточно трудоемко. Многочисленные эксперименты по исследованию кипения наножидкостей (НЖ) показывают, что в ходе данного процесса на поверхности нагрева образуется пленка иерархической структуры и высокой пористости, и именно в ней кроется ответ на загадку аномального поведения наножидкости при кипении и кризисе кипения.

В подтверждение вышеизложенной гипотезы, например, Ю.А. Кузма-Кичта (и др.) в МЭИ была проведена серия опытов на наножидкости с частицами карбида кремния и оксида алюминия [3]. Опыты проводились на трубке и медном блоке. Основным результатом работы явилось хорошее совпадение данных (фактически – экспериментальное подтверждение) по критическому тепловому потоку (КТП) с корреляцией С. Кандликара [3, с.37]. Также крайне важен постулат о том, что основная причина изменения величины КТП – изменение краевого угла смачивания.

Стоит отметить, что, несмотря на то, что однозначно имеет место образование пленки различной толщины и морфологии в ходе кипения НЖ, прирост размера КТП имеется не всегда, и далеко не монотонен. Так, в работе [4] на примере наножидкости с частицами оксида циркония ZrO_2 различных концентраций было показано, что при определенной концентрации (в случае оксида циркония – 0,15% vol.) теплообмен при кипении НЖ гораздо хуже базовой жидкости, и значение КТП гораздо меньше [4, с.1001]. Объяснения феномену авторы не дают.

Интересно, что дисперсии частиц микро-размера также образуют на поверхности нагрева пленку, влияющую на теплообмен при кипении и кризис кипения [5, с.410]. Однако получаемая в данном процессе величина КТП, хоть и превышает значение для воды, значительно ниже, чем в случае дисперсии наночастиц.

Впрочем, даже добавление различного рода эмульсий в базовую жидкость также может привести к образованию некоторого рода пленки, также улучшающей смачиваемость поверхности. В работе [6] как показатель смачиваемости поверхности сравнивались значения краевых углов θ для поверхностей: чистой стальной, закаленной в воде, в растворе три-фосфата натрия TSP и наножидкости с частицами оксида алюминия Al_2O_3 соответственно. При этом в случае добавления TSP значение θ меньше, чем в случае НЖ. Непосредственно процесс кризиса кипения авторами [6] не наблюдался.

J. Buongiorno, L.-W. Hu и I.Ch. Bang в работе [7] отмечают, что на поверхности, покрытой пленкой НЧ в ходе кипения происходит крайне интересный и необычный процесс, связанный с движением горячих и холодных пятен. По сравнению с кипением обычной жидкости, в НЖ исследователями найдено 4 особенности поведения пятен [7, с.3]:

- наличие основного «большого» горячего пятна и россыпи более мелких пятен вокруг него;
- огромное количество «холодных» пятен рядом с горячими;
- вышеупомянутые «холодные» пятна могут распространяться как вокруг горячих, так и изнутри них;
- полуциклическая природа распространения горячих пятен.

В целом, авторы [7] делают вывод о том, что на кризис кипения в большой степени влияет смачиваемость поверхности нагрева, изменяющаяся из-за образования пленки из НЧ.

Многими исследователями отмечается, что покрытие из наночастиц на поверхности нагревателя влияет не только на характеристики кипения и кризиса кипения НЖ, но и на данные процессы в обычной жидкости. Например, в работе [8] проведено сравнение достигнутых значений КТП при кипении наножидкости на покрытом НЧ нагревателе, воды на покрытом НЧ нагревателе, НЖ на «чистом» нагревателе и воды на «чистом» нагревателе. Результаты наглядно демонстрируют [8, с.67]: НЧ, распределенные в жидкости, уменьшают КТП, притом, что наличие пленки на поверхности нагревателя значительно его увеличивает.

Поскольку экспериментальные данные говорят о том, что наибольшее влияние на кризис теплообмена оказывает пленка из наночастиц на поверхности нагревателя, очевидно, что корреляции и модели для расчета КТП должны содержать в каком-либо виде характеристики свойств этой поверхности, в частности, смачиваемость. В работе [9] рассматриваются четыре основных модели кризиса кипения:

- теория гидродинамической неустойчивости;
- теория осушения макрослоя;
- теория «горячих/сухих» пятен;

– теория взаимодействия паровых пузырей.

Авторами [9] продемонстрировано, что из вышеперечисленных теорий наиболее приближенной к реальности является третья. Однако использование корреляций, например, разработанных Theofanous и Dinh, сопряжено с некоторым неудобством – в частности, необходимо измерять (знать) краевой угол смачивания. Отсюда возникает задача по разработке расчетной корреляции, включающей в себя параметры, которые могут быть заданы «априори», то есть без проведения специальных измерений и до опыта.

Список используемых источников:

1. Яшнов В.И. Влияние смачиваемости поверхности нагрева на кризис кипения // Труды ЦКТИ. Котлотурбостроение. 1965. №58. С. 78-84.
2. Гогонин И.И. Влияние краевого угла смачивания на теплоотдачу при кипении // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т.17 (2). С. 261-267.
3. Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Шустов М.В., Чурсин П.С., Чистякова А.В., Звонарев Ю.А., Жуков В.М., Васильева Л.Т. Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро- и нанорельефом // Теплоэнергетика. 2014. №3. С. 35-38.
4. Chopkar M., Das A.K., Manna I., Das P.K. Pool boiling heat transfer characteristics of ZrO₂-water nanofluids from a flat surface in a pool // Heat Mass Transfer. 2008. 44. P. 999-1004.
5. Vassalo P., Kumar R., D'Amico S. Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. №47. P. 407-411.
6. Jeong Y.H., Chang W.J., Chang S.H. Wettability of heated surfaces under pool boiling using surfactant solutions and nano-fluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008. №51. P. 3025-3031.
7. Buongiorno J., Hu L.-W., Bang I.Ch. Towards an explanation of the mechanism of boiling critical heat flux enhancement in nanofluids // Proceedings of the Fifth International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels, Puebla, Mexico, 2007. P. 1-7.
8. Kim H., Kim J., Kim M. Experimental study on CHF characteristics of water-TiO₂ nano-fluids // Nuclear Engineering and Technology. 2006. Vol. 38(1). P. 61-68.
9. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. №50. P. 4105-4116.

© 2015, Сироткина А.Л.

К вопросу о влиянии пленки из наночастиц на поверхности нагрева на процесс кипения наножидкости

© 2015, Sirotkina A.L.

Towards to explanation of nanoparticles film on the heated surface impact on nanofluids boiling process