

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 533.77

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО КИПЕНИЯ С НЕДОГРЕВОМ
НА СОСТОЯНИЕ КИПЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

© 2016 П.А. Пономаренко, М.А. Фролова, Н.Н. Ленивенко

Севастопольский государственный университет, Севастополь, Крым, Россия

В статье представлены результаты изучения явления пузырькового кипения с недогревом на состоянии теплоотдающей поверхности тепловыделяющей элемента в процессе работы реакторной установки с помощью специальной установки. Установка позволяла непрерывно измерять плотность потока тепла от пластин, выполненных из различных материалов к теплоносителю, величину недогрева в ядре потока и пульсации температуры кипящей поверхности.

Ключевые слова: тепловыделяющий элемент, теплоносители, пузырьковое кипение с недогревом, радиоэкологическая безопасность.

Поступила в редакцию 10.02.2016 г.

Самой главной характеристикой атомной энергетической установки является её безопасность и, особенно, радиоэкологическая безопасность. Эта безопасность является функцией надежности и долговечности барьеров на пути распространения радиоактивных веществ от ядерной энергетической установки в целом в окружающую среду. Главным элементом ядерной энергетической установки, генерирующим проникающую радиацию (нейтронное и гамма излучение) и радиоактивные вещества, является активная зона реактора, а в ней ядерное топливо и продукты его деления.

Первым барьером на пути распространения продуктов деления ядерного топлива в окружающую среду является матрица топливной композиции. Вторым и главным барьером на этом пути являются оболочки тепловыделяющих элементов, которые подвергаются воздействию огромного количества физических и химических факторов в процессе работы ядерного реактора, снижающих надежность и долговечность этих оболочек. Оболочки должны сохранить герметичность в течение всей их работы. Третьим барьером на этом пути является контур первичного теплоносителя, состоящий из реактора, парогенератора и трубопроводов, связывающих эти два главных элемента, а также целый ряд систем, подсистем и их элементов, обеспечивающих нормальную безопасную работу первого контура и его составляющих. Главным качеством этого барьера является его герметичность. И четвертым главным барьером является гермозона и её герметичность в целом, а также герметичность её элементов в отдельности.

Настоящая статья посвящена экспериментальным исследованиям одного из физических явлений, которое испытывает оболочка тепловыделяющего элемента в процессе работы реакторной установки, явлению теплопередачи от оболочки к теплоносителю и некоторые особенностями этого процесса.

В многочисленной литературе указано, что теплопередача от теплопередающей поверхности к теплоносителю (воде) может осуществляться путем кипения на этой

поверхности и без него. При этом замечено, что, если подогрев теплоносителя (вода) в активной зоне не превышает 20°C , кипение на поверхности тепловыделяющих элементов отсутствует, если подогрев теплоносителя превышает 30°C , поверхностное пузырьковое кипение с недогревом в ядре потока, как правило, имеет место. Кроме того, продолжительность работы оболочек без их разгерметизации в первом случае превышает 12000 часов, во втором – не превышает ≈ 7500 часов [1]. Этот факт наводит на мысль о неблагоприятном влиянии пузырькового кипения с недогревом на состояние теплоотдающей поверхности.

В Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности была создана экспериментальная установка (рисунок 1) для изучения именно этого влияния.

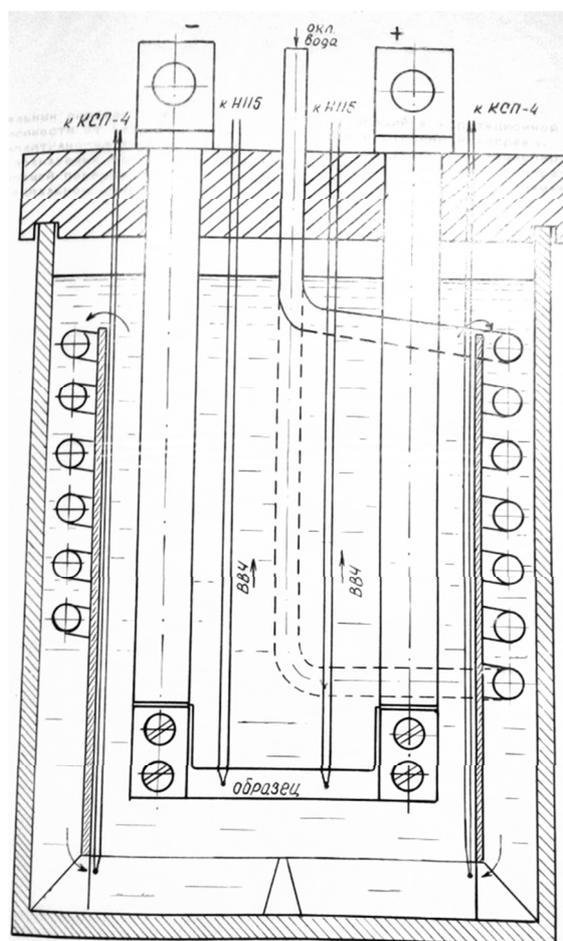


Рис. 1. – Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка размещена в специальном шкафу. Она состоит из цилиндрического стеклянного сосуда, выполненного из кварцевого стекла. Внутри этого сосуда на крестовине из титанового сплава помещается обечайка из кварцевого стекла. В кольцевом зазоре между стенками сосуда и внутренней обечайкой помещен змеевик – холодильник, изготовленный из красномедной трубки. Концы трубок змеевика проходят через стеклотекстолитовую крышку, которой закрывается наружный сосуд. К трубкам змеевика шлангами подсоединяются напорный водопровод и слив. Внутри обечайки помещен образец из стали, на котором организуется поверхностное пузырьковое кипение. К образцу по медным тоководам, закрепленным в стеклотекстолитовой крышке, подводится постоянный электрический ток. В установку

наливается вода высокой чистоты, циркуляция которой осуществляется за счет естественной циркуляции: внутри обечайки вода поднимается вверх до перелива через ее верхний срез, омывая горизонтально расположенный образец, на котором организовано кипение. В верхней части кольцевого зазора, соприкасаясь со змеевиком, вода охлаждается и опускается вниз. Через пространство, образованное между днищем сосуда и нижним срезом обечайки с помощью крестовины, вода поступает во внутреннюю полость обечайки. Далее цикл повторяется.

Установка позволяла при атмосферном давлении организовать пузырьковое кипение с различным по величине недогревом на пластинчатых образцах из различных материалов, которые могут быть использованы и уже используются для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов. Это были нержавеющие стали марок 18 Н10Т, Х16Н15МЗБ, Х16Н15МЗТ.

Нагрев пластин осуществлялся постоянным током. Система позволяла измерять непрерывно плотность потока тепла от пластины к теплоносителю, величину недогрева в ядре потока и пульсации температуры кипящей поверхности. Поверхность кипения перед началом обследовалась экспертом - металловедом под металловедческим микроскопом с 160 кратным увеличением. После 30-часового режима кипения воды высокой чистоты (сухой остаток не более 1 мг/л), поверхность кипения обследовалась повторно при том же увеличении. Некоторые результаты проведенных экспериментов и их анализ приводятся ниже в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты экспериментов изменения кипящей поверхности сталей

Образец из стали Х18Н10Т									
Исходное состояние поверхности: рельеф из мелких язвочек и редких рисок				Состояние поверхности после кипения при $q=150\text{кВт/м}^2$, время кипения 30 часов, рельеф язвочек и рисок, появление ореола в виде концентрических колец вокруг язвочек, рельефность ореола 2-4мкм					
Размер язвочек – диаметр, мкм	Глубина самых больших язвочек, мкм	Плотность язвочек, шт/см ²	Микротвердость металла	Размер язвочек – диаметр, мкм	Глубина самых больших язвочек, мкм	Плотность язвочек, шт/см ²	Плотность язвочек с ореолом, шт/см ²	Микротвердость	
								Основной материал	В ямке (язвочке)
3-5	5-7	≈400	196	3-120	5-10	≈2000	130	206	221
Образец из стали Х16Н15МЗБ									
Исходное состояние поверхности: рельеф из мелких язвочек и редких рисок				Состояние поверхности после кипения при $q=150\text{кВт/м}^2$, время кипения 30 часов, рельеф язвочек и рисок, большинство язвочек кратерообразной формы					
Размер язвочек в плане – диаметр, мкм	Глубина самых больших язвочек, мкм	Плотность язвочек, шт/см ²	Микротвердость металла	Размер язвочек – диаметр, мкм	Глубина самых больших кратеров, мкм	Плотность кратеров, шт/см ²	Микротвердость		
							Основной материал	Дно кратера	
3-25	3-5	≈300	145	3-60	5-10	≈400	204	253	
Образец из стали Х16Н15МЗТ									
Исходное состояние поверхности: рельеф из язвочек и остроконечных бугорков от выпавших включений					Состояние поверхности после кипения при $q=190\text{кВт/м}^2$, $t=32$ часа, рельеф канавок и бугорков				
Размер язвочек – диаметр, мкм	Плотность язвочек, шт/см ²	Диаметр бугорков у основания, мкм	Плотность бугорков, шт/см ²	Микротвердость металла	Диаметр бугорков у основания, мкм	Плотность бугорков, шт/см ²	Микротвердость основного металла		
15	45	10	≈1000	160	45	450	194		

Анализ процесса пузырькового кипения с недогревом в ядре потока:

1) Образование межфазной поверхности на поверхности кипения носит взрывной характер и сопровождается микроударными волнами гидравлического характера, то есть имеют место процессы аналогичные кавитационным [3-7].

2) В центре ножки пузыря имеет место всплеск температуры поверхности кипения по сравнению с поверхностью в контакте с водой, после отрыва пузырька пара температура поверхности под ножкой пузырька падает и снова поднимается или на этом месте снова образуется пузырек пара с ножкой [2].

3) Температура кипящей поверхности носит пульсирующий (колебательный) характер [2], следовательно, поверхность подвергается температурным напряжениям колебательного характера, что может привести к температурной усталости кипящей поверхности и появлению на ней в защитной окисной пленке трещин (рисунок 2). Частота и амплитуда колебаний температуры поверхности зависит от тепловой нагрузки поверхности.

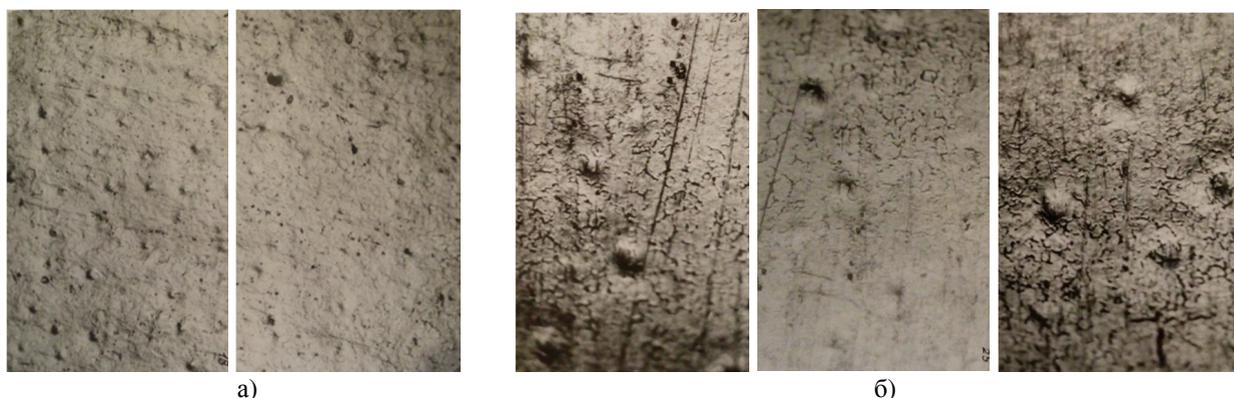


Рис. 2. – Состояние образца исходное (а) и повреждаемость после испытаний (б)

4) Отрыв парового пузыря от поверхности кипения сопровождается гидравлическим ударом в точке-центре ножки оторвавшегося пузыря, появление твердости на дне образовавшегося кратера тому доказательство [8-11].

5) Конденсация парового пузыря в недогретом ядре потока жидкости сопровождается гидравлическим ударом в точке, ударная волна которого по-видимому сферической формы распространяется в кипящей среде, приводит к раннему схлопыванию других паровых пузырьков и в конечном счете, повышая твердость всей поверхности кипения (явление наклепа) [12-14].

ВЫВОДЫ

1) Во всех случаях приведенных примеров повышается микротвердость кипящей поверхности и основного металла, и дна кратера, и ямки.

2) Плотность образования ямок и кратеров на кипящей поверхности растет от времени кипения и величины недогрева.

3) Размеры ямок и кратеров на кипящей поверхности увеличиваются от длительности кипения.

4) Появление ореола вокруг ямок в виде концентрических колец можно в первом приближении объяснить изменениями в кристаллической решетке металла или окисной пленки, которые связаны с микрогидроударами и нестационарной пульсацией температуры на кипящей поверхности под ножкой пузыря и после его отрыва.

5) Плотность бугорков на кипящей поверхности снижается, а их диаметр у

основания растет.

6) Плотность дефектных образований растет при увеличении тепловой нагрузки, величины недогрева и времени кипения.

7) Плотность возникающих неоднородностей поверхности кипения и их величина способствуют возникновению коррозионных процессов электрохимического характера, что вместе с особенностями тепловых и гидравлических процессов отрицательно влияет на долговечность и надежность самой поверхности кипения. Эти явления приобретают особенную значимость, если они имеют место на оболочках тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, так как способствуют более раннему растрескиванию (потере герметичности) оболочек, и выходу высокорadioактивных осколков – продуктов деления ядерного топлива в контур первичного теплоносителя, значительно увеличивая его удельную активность, что, в конечном счете, может привести к невозможности эксплуатации ядерной энергетической установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головизнин, А.М. и др. Судовые ядерные энергетические установки [Текст] / А.М. Головизнин, В.А. Кузнецов, Б.Г. Пологих, А.К. Следзюк, Н.С. Хлопкин, Л.С. Циганков – М.: Атомиздат, 1976. – 375 с.
2. Исаченко, В.П. и др. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сухомел. – М.-Л.: Издательство «Энергия», 1965. – 423 с.
3. Rayleigh, Lord (Strutt J.W.) On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *Phil. Mag.*, 1917, Vol. 34, pp. 94–98.
4. Cook S. Erosion by water hammer. *Broc. Roy. Soc.*, 1928, Vol. 119A.
5. Silver R.S. Theory of stress due to collapse of vapourbubbles in a liquid. *Engineering*, 1942, Vol. 154, p. 501.
6. Trilling L. The collapse and rebound of a gas bubble. “*Journ. Appl. Phys.*”, 1950, Vol. 23, pp. 14–17.
7. Рождественский В.В. Кавитация [Текст] / В. В. Рождественский. – Л.: «Судостроение», 1977. – 247 с.
8. Poritaky H. The collapse or growth of spherical bubble or cavity in a viscous fluid. *Proc. First U.S. Natl. Congr. Appl. Mech. (ASME)*, 1952, pp. 813–821.
9. Harrison M. An experimental study of single bubble cavitation noise. *DTMB Rept 815*, 1952.
10. Cutton G.W. Photoelastic study of strain waves caused by cavitation. *Calif. Inst. of Tech. Hydrodyn. Lab. Rept 21-21*, 1955.
11. Shulter N.D., Mesler R.B. A photographic study of the dynamics and damage capabilities of bubble collapsing near solid boundaries. “*Trans. Am. Soc. Mech. Engrs Journ. Basic Engng*”. 1961, Vol. 83, p. 648.
12. Benjamin T.B., Ellis A.T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries, *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 1966, vol. 260, p. 221.
13. Gibson D.C. Cavitation adjacent to plane boundaries. *Conf. oh Inst. Engrs, Australia, on Hydraulics and Fluid Mechanics*, 1968, p. 210.
14. Brunton J.H. The deformation of solids by cavitation and drop impingement // Неустановившиеся течения воды с большими скоростями. Труды Международного симпозиума в Ленинграде 22-26 июня 1971 г. – М.: «Наука», 1973. – С. 139–151.

REFERENCES

- [1] Goloviznin A.M., Kuznecov V.A., Pologih B.G., Sledzjuk A.K., Hlopkh N.S., Cigankov L.S. *Sudovye jadernye jenergeticheskie ustanovki* [Ship nuclear power plants]. M. Pub. Atomizdat [Atomizdat], 1976. – 375 p. (in Russian)
- [2] Isachenko V.P., Osipova V.A., Suhomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. M. Leningrad. Pub «Jenergija» [Energy], 1965. – 423 p. (in Russian)
- [3] Rayleigh, Lord (Strutt J.W.) On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *Phil. Mag.*, 1917, Vol. 34, pp. 94–98. (in English)
- [4] Cook S. Erosion by water hammer. “*Broc. Roy. Soc.*”, 1928, Vol. 119A. (in English)
- [5] Silver R.S. Theory of stress due to collapse of vapourbubbles in a liquid, *Engineering*, 1942, Vol. 154, p. 501. (in English)

- [6] Trilling L. The collapse and rebound of a gas bubble. "Journ. Appl. Phys.", 1950, Vol. 23, pp. 14–17. (in English)
- [7] Rozhdestvenskij V.V. Kavitacija [Cavitation]. – Leningrad. Pub. «Sudostroenie» [Shipbuilding], 1977, 247 p. (in Russian)
- [8] Poritaky H. The collapse or growth of spherical bubble or cavity in a viscous fluid. Proc. First U.S. Natl. Congr. Appl. Mech. (ASME), 1952, pp. 813–821. (in English)
- [9] Harrison M. An experimental study of single bubble cavitation noise. DTMB Rept 815, 1952. (in English)
- [10] Cutton G.W. Photoelastic study of strain waves caused by cavitation. Calif. Inst. of Tech. Hydrodyn. Lab. Rept 21–21, 1955. (in English)
- [11] Shulter N.D., Mesler R.B. A photographic study of the dynamics and damage capabilities of bubble collapsing near solid boundaries. "Trans. Am. Soc. Mech. Engrs Journ. Basic Engng". 1961, Vol. 83, p. 648. (in English)
- [12] Benjamin T.B., Ellis A.T. The collapse of cavitation bubbles and the pressures thereby produced against solid boundaries, Phil. Trans. Roy. Soc. A, 1966, Vol. 260, p. 221. (in English)
- [13] Gibson D.C. Cavitation adjacent to plane boundaries. Conf. on Inst. Engrs, Australia, on Hydraulics and Fluid Mechanics, 1968, p. 210. (in English)
- [14] Brunton J.H. The deformation of solids by cavitation and drop impingement. Neustanovivshiesja techenija vody s bolshimi skorostjami [Unsteady flow of water at high speeds]. Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma v Leningrade 22-26 ijunja 1971 g. [Materials of the International Symposium in Leningrad, 22-26 June 1971] M. Pub. «Nauka» [Science], 1973, pp. 139–151. (in Russian)

Influence of Surface Boiling at Underheating on Boiling Area State

P.A. Ponomarenko, M.A. Frolova, N.N. Lenivenko

*Sevastopol State University
1 Kurchatov St., Crimea, Sevastopol, Russia, 299016
e-mail: frolova-85@mail.ru*

Abstract – Results of study of nucleate boiling phenomenon with underheating on a status of the heatgiving surface of the heat-generating part of an element during reactor installation by means of special apparatus are provided. The apparatus allowed to measure heat flux density continuously from the plates made from different materials to the heat carrier, value of underheating in flow core and temperature pulsation of the boiling surface.

Keywords: the heat-generating element, heat carriers, underheating nucleate boiling with, radio ecological safety.