

УДК 536.24

## **ВЛИЯНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ПРОЦЕСС ПУЗЫРЬКОВОГО КИПЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКОСТИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ**

**Т.Ш. Маграквелидзе, Х.Н. Ломидзе**

*Арчил Элиашвили Институт систем управления, Тбилиси, Грузия*

Повышение интенсивности теплоотдачи в теплообменных аппаратах, как известно, является весьма актуальной проблемой. Одним из эффективных способов увеличения интенсивности теплоотдачи, как показали многочисленные исследования, является применение метода искусственной шероховатости. Процесс конвективного теплообмена в шероховатых каналах изучен достаточно основательно [1-3]. Метод искусственной шероховатости оказался эффективным также и при пузырьковом кипении в потоке недогретой до температуры насыщения воды в кольцевых каналах [4]. Наряду с этим влияние искусственной шероховатости на процессы конвективного теплообмена и пузырькового кипения в аппаратах с мешалками практически не изучено. Первые работы, посвященные изучению процесса конвективной теплоотдачи шероховатых поверхностей в аппарате, оснащенной перемешивающим устройством в виде лопастной мешалки, было опубликовано одним из авторов данной работы совместно со своими коллегами [5,6]. В этих исследованиях было установлено, что создание искусственной шероховатости на поверхности теплоотдающей кольцеобразной трубы, погруженной в аппарате с мешалкой, обуславливает увеличение коэффициента теплоотдачи примерно в два раза [5,6].

Практический интерес представляет вопрос о влиянии шероховатости поверхности на процесс пузырькового кипения в вышеупомянутых аппаратах. Задачей данной работы являлась экспериментальное исследование процесса теплоотдачи при пузырьковом кипении на гладкой и шероховатой поверхностях в условиях перемешивания жидкости в большом объеме.

С целью исследования указанной проблемы была модернизирована экспериментальная установка, описание которой дано в работах [5,6]. Экспериментальная установка представляла собой цилиндрический сосуд, изготовленный из нержавеющей стали (рис.1). Диаметр сосуда был равен 200мм, высота составляла 300мм. Цилиндрический сосуд был оснащен осью -2, на которой насаживались лопастные мешалки -3. Мешалка приводилась во вращение при помощи электродвигателя-4 типа УМФ, укрепленного на крыше сосуда. В экспериментах использовались двухлопастные мешалки.

В качестве теплоотдающего элемента использовалась кольцеобразная труба -5 из нержавеющей стали. Диаметр трубы был равен 10мм, а диаметр кольца-140мм. Опытная кольцеобразная труба была размещена в сосуде горизонтально, на расстоянии 50мм от дна сосуда. В экспериментах мешалка и кольцеобразная труба были размещены коаксиально. При этом менялся уровень размещения мешалки, т.е. менялась разница между уровнями размещения теплоотдающей трубы и мешалки в сосуде -  $\Delta H = H_1 - H_2$ .

Конденсация образующегося при кипении в сосуде пара осуществлялась при помощи змеевика -6, расположенного в верхней части сосуда. Змеевик охлаждался сетевой

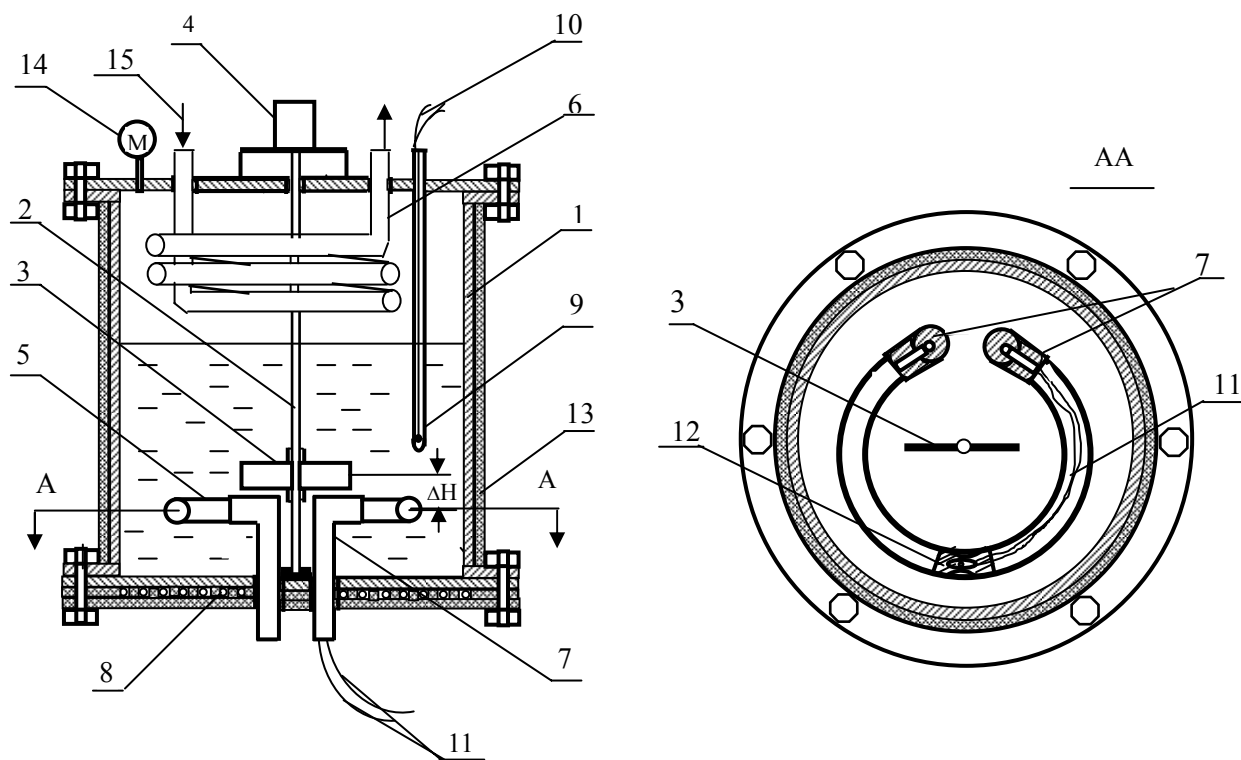


Рис.1 Экспериментальная установка

1-корпус; 2-ось мешалки; 3-мешалка; 4-электродвигатель; 5-теплоотдающая труба; 6-змеевик; 7 -токовводы; 8- вспомогательный нагреватель; 9- гильза для термопары; 10,11- термопары; 12-тефлоновая камера; 13- теплоизоляция; 14- мановакуумметр; 15 -охлаждающая вода;

водой -15. В качестве опытной жидкости в экспериментах использовалась дистиллированная вода. Уровень воды в сосуде определялся при помощи уровнемера.

Экспериментальная труба обогревалась путем непосредственного пропускания через нее переменного тока низкого напряжения. Для этого к концам кольцеобразной трубы были припаяны медные токовводы -7, выходящие в наружу через дно цилиндрического сосуда. Для понижения напряжения использовался трансформатор напряжения –ОСУ-20. Мощность, подаваемая на экспериментальную трубу, регулировалась регулирующим трансформатором –РНО-250-10. Цилиндрический сосуд был оснащен также и вспомогательным нагревателем -8.

Сила тока измерялась цифровым прибором В7-35, присоединенным с выходящим из трансформатора – ОСУ-20 кабелем при помощи трансформатора тока - УТТ-6. Падение напряжения измерялось цифровым прибором - В7-21А.

Температура внутренней поверхности опытной трубы измерялась тремя хромель-алюмелевыми термопарами -11, размещенными в тефлоновых камерах -12. Температура наружной поверхности теплоотдающей трубы определялась путем пересчета по известной формуле. Температура дистиллированной воды измерялась термопарой -10, размещенной в гильзе -9 с трансформаторным маслом. Э.д.с. термопар измерялась цифровым вольтметром - В7-21А.

Число оборотов мешалки измерялось цифровым мультиметром -Ф4800, которому импульс подавался при помощи фото преобразователя, состоящего из фотодиода, осветителя и перфорированного диска, жестко связанного с осью мешалки.

Эксперименты проводились как для гладкой, так и для шероховатой поверхностей, в условиях атмосферного давления, при температуре кипения дистиллированной воды. Давление в сосуде контролировалось мановакуумметром -14. Для поддержания атмосферного давления в крышке сосуда было отверстие, сообщающая сосуд с окружающей средой. Шероховатость создавалась надеванием колец на опытную трубу -5. Высота элементов шероховатости  $h=0.67\text{мм}$ , а отношение среднего шага (вдоль верхней образующей кольцеобразной трубы) между элементами шероховатости к их высоте -  $s/h=7.5$ .

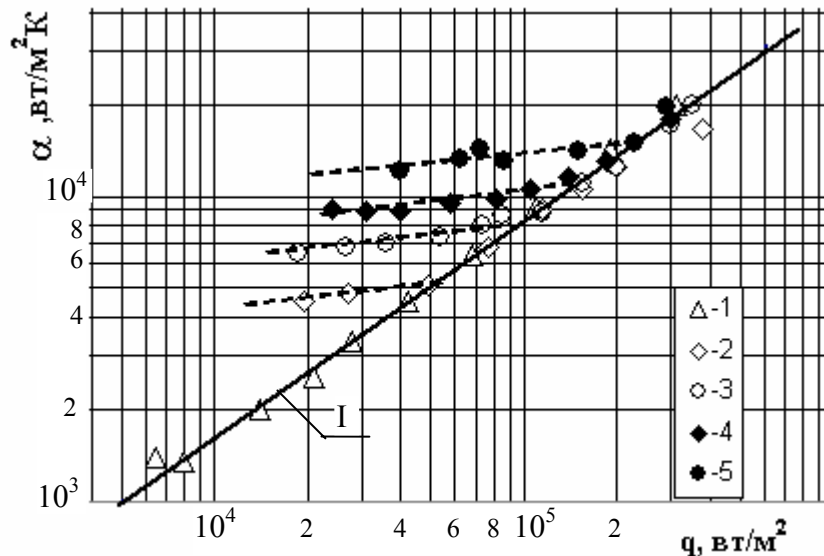


Рис.2 Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока ( $\Delta H=0$ )  
 Гладкая поверхность: 1-  $n=0$ ; 2-  $n=6,17$  об/с; 3-  $n=9,7$  об/с;  
 Шероховатая поверхность ( $h=0,67\text{мм}; s/h=7,5$ ): 4-  $n=6,17$  об/с; 5-  $n=9,7$  об/с;  
 I- по формуле (2).

Коэффициент теплоотдачи определялся по формуле:

$$\alpha = \frac{q}{t_{ст} - t_n}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт/м}^2\text{К}$ ,  $q$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт/м}^2$ ,  $t_{ст}$  – температура внешней поверхности опытной трубы и  $t_n$  – температура насыщения воды.

Часть результатов проведенных экспериментов представлены на рисунках 2 и 3. в этих экспериментах использовалась двухлопастная мешалка диаметром 100мм и высотой лопастей 10мм. На рис.2 в координатах  $(\alpha, q)$  представлены экспериментальные данные как для гладкой, так и для шероховатой поверхностей. Указанные результаты получены при размещении мешалки и теплоотдающей кольцеобразной трубы на одинаковом уровне от дна цилиндрического сосуда. На указанном рисунке, наряду с экспериментальными данными, полученными при разных значениях числа оборотов мешалки ( $n=6,17$  об/с;  $n=9,7$  об/с) приведены также данные, соответствующие развитому пузырьковому кипению в условиях отсутствия перемешивания ( $n=0$ ). Сплошная линия - I соответствует общеизвестной формуле:

$$\alpha = C q^{0.7} \text{ вт/м}^2\text{К}, \quad (2)$$

при значении  $C=2.89$ , что на 9% ниже общепринятого значения. Можно считать, что указанная разница находится в пределах точности экспериментов.

Как это видно из указанного рисунка, на начальной стадии кипения с увеличением числа оборотов мешалки интенсивность теплоотдачи как для гладкой, так и для шероховатой поверхностей растет, что является естественным. При этом, на начальной стадии пузырькового кипения, при постоянном значении числа оборотов мешалки, наблюдается заметное увеличение коэффициента теплоотдачи шероховатой поверхности по сравнению с коэффициентом теплоотдачи гладкой поверхности. Согласно приведенным на рис.2 экспериментальным данным, при развитом пузырьковом кипении влияние шероховатости, также как и влияние перемешивания, на интенсивность теплоотдачи практически отсутствует.

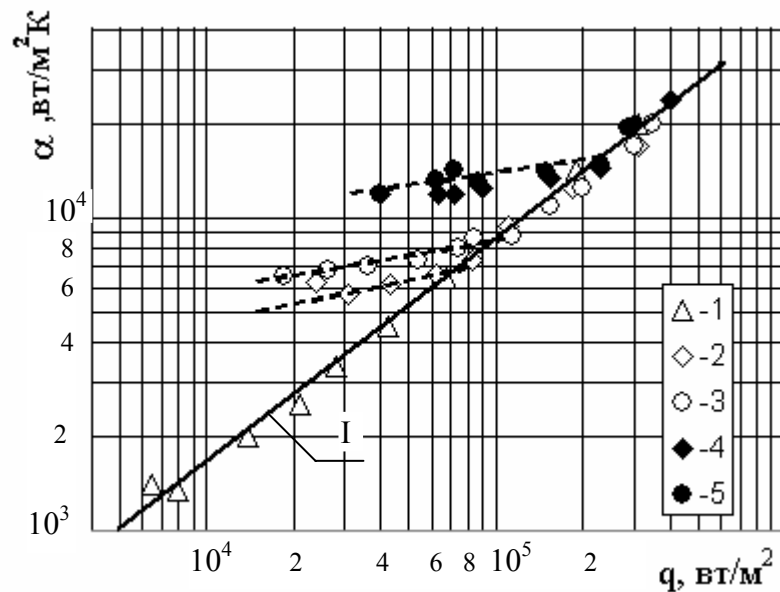


Рис.3 Зависимость коэффициента теплоотдачи от теплового потока  
 Гладкая поверхность: 1-  $n=0$ ; 2-  $n=9,7$  об/с,  $\Delta H=30$ мм; 3-  $n=9,7$  об/с,  $\Delta H=0$ ;  
 Шероховатая поверхность( $h=0,67$ мм; $s/h=7.5$ ): 4-  $n=9,7$  об/с,  $\Delta H=30$ мм;  
 5-  $n=9,7$  об/с,  $\Delta H=0$ ; I- по формуле (2).

На рис.3 вместе с экспериментальными данными, приведенными на рис.2 (за исключением данных, соответствующих случаю  $n=6.17$  об/с) приведены результаты, полученные в условиях размещения мешалки в сосуде на 30мм выше экспериментальной трубы. Как это видно из рис.3, при  $\Delta H=30$ мм, коэффициент теплоотдачи гладкой трубы заметно снижается по сравнению с коэффициентом теплоотдачи при  $\Delta H=0$ , тогда как интенсивность теплоотдачи шероховатой трубы, остается практически неизменной. В связи с этим, можно заключить, что при размещении мешалки на уровне теплоотдающей трубы ( $\Delta H=0$ ) эффект интенсификации теплоотдачи в начальной стадии пузырькового кипения ниже, чем в случае  $\Delta H \neq 0$ .

Указанный результат, несомненно, заслуживает интерес. Следует отметить, что при перемешивании движение в сосуде носит весьма сложный характер. Однако можно допустить, что от теплоотдающей трубы одна часть тепла отбирается тангенциальным компонентом потока, а остальная часть – нормальными к поверхности трубы (радиальным и аксиальным) компонентами. При таком допущении для гладкой поверхности можно написать:

$$\alpha_{\text{гл}} = C_1 \alpha_{\text{т.гл}} + C_2 \alpha_{\text{н.гл}}. \quad (3)$$

Значения коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$  в общем случае зависит от типа мешалки и расположения мешалки и теплоотдающей трубы. В случае лопастных мешалок как известно, превалирует тангенциальный компонент потока, а нормальные компоненты как радиальная, так и аксиальная имеют сравнительно низкую интенсивность. При этом, интенсивность тангенциального компонента практически не зависит от места положения мешалки в сосуде, тогда, как два других компонента в значительной степени меняются по высоте сосуда в зависимости от расположения в нем мешалки.

Поскольку в нашем случае элементы шероховатости были расположены поперечно к тангенциальному компоненту потока, для шероховатой поверхности можно написать:

$$\alpha_{\text{ш}} = C_1 \varepsilon_{\text{ш}} \alpha_{\text{т.гл}} + C_2 \alpha_{\text{н.гл}}. \quad (4)$$

В (3) и (4)  $\alpha_{\text{гл}}$ ,  $\alpha_{\text{ш}}$  - коэффициенты теплоотдачи гладкой и шероховатой поверхностей соответственно;  $\alpha_{\text{т.гл}}$ ,  $\alpha_{\text{н.гл}}$  - тангенциальный и нормальный коэффициенты теплоотдачи гладкой поверхности соответственно;  $\varepsilon_{\text{ш}}$  - коэффициент учитывающий увеличение интенсивности теплоотдачи вследствие шероховатости.

Очевидно, что, согласно (4), под воздействием шероховатости интенсифицируется только часть суммарного коэффициента теплоотдачи. В связи с этим, в рассматриваемом случае степень интенсификации теплоотдачи будет меньше, чем в случае одномерного турбулентного потока в трубе. При  $\Delta H=0$  теплоотдающая труба находится под сильным воздействием тангенциального и радиального компонентов потока (интенсивность аксиального компонента во всех случаях ниже двух других компонентов). В случае  $\Delta H \neq 0$ , при неизменной интенсивности тангенциального компонента в пределах теплоотдающей трубы заметно снижается интенсивность радиального компонента. В связи с этим, заметно снижается суммарный коэффициент теплоотдачи гладкой поверхности. Наряду с этим, поскольку в формуле (4) превалирует тангенциальный компонент, снижение суммарного коэффициента теплоотдачи шероховатой поверхности при  $\Delta H \neq 0$ , должно быть менее заметным.

### Литература

- [1] Nunner W. Wärmeübergang und druckabfall in rauen röhren. VDI Forschungsheft, 1956, 455s.
- [2] Gomelauri V. Influence of two-dimensional artificial roughness on convective heat transfer. Int. J. of Heat and Mass Transfer, v.7, N6, 1964, pp. 653-663.
- [3] Калинин Е.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение. 1972, 219с.
- [4] Гомелаури В.И., Маграквелидзе Т.Ш. Экспериментальное исследование влияния двухразмерной шероховатости на критические тепловые нагрузки и теплообмен при кипении в потоке недогретой воды. Теплоэнергетика, 1976, №6, с.4-8.
- [5] Magrakvelidze T.Sh., Bantsadze N.O., Lekveishvili N.N. Influence of Artificial Roughness on Heat Transfer to Turbulent Mixed Liquid in a Pool. Bulletin of the Georgian Academy of Sciences, 1996, N3, pp.397-400.
- [6] Маграквелидзе Т.Ш., Банцадзе Н.О., Леквеишвили Н.Н. Интенсификация теплоотдачи в аппарате с мешалкой. Тезисы докладов и сообщений ММФ5, Минск, 2004г. т2, ст.429-430. Труды форума: <http://www.itmo.by/forum/Mif5/doc.html>