

УДК 536.24

## **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА МЕТОДОМ ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ - ДОСТИЖЕНИЯ И НЕРЕШЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ**

**Т.Ш. Маграквелидзе**

*Арчил Элиашвили Институт систем управления, Тбилиси, Грузия*

Очевидно, что интенсификация теплообмена в современных энергетических установках имеет огромное практическое значение. Наряду с этим, поскольку интенсификация теплообмена неразрывно связана с воздействием на структуру потока в целом, и, в частности, на пристеночный слой, рассматриваемый вопрос вызывает также и большой теоретический интерес. Одним из наиболее эффективных методов интенсификации теплообмена, как показали многочисленные исследования, является метод искусственной шероховатости.

Ввиду большой практической значимости интенсификации теплообмена, за истекшие годы было проведено огромное количество экспериментальных и теоретических работ по изучению закономерностей гидродинамики и теплообмена при турбулентном обтекании шероховатых поверхностей.

В докладе, наряду с аналитическим обзором проведенных в мире исследований, дан более подробный анализ экспериментальных и теоретических работ, выполненных грузинскими учеными. В этих последних работах, по мнению автора, получены важные, в том числе и новые результаты, заслуживающие научный и практический интерес. В докладе заострено также внимание на проблемах гидродинамики и теплообмена при турбулентном обмывании шероховатых поверхностей, которые к настоящему времени еще не нашли удовлетворительного решения.

\* \* \*

Классические эксперименты, проведенные И.Никурадзе в Геттингенском институте гидроаэромеханики в 30-х годах прошлого столетия, практически положили начало изучению турбулентных течений в шероховатых каналах. В указанных экспериментах И.Никурадзе исследовал течение в трубах, внутренняя поверхность которых была покрыта частицами песка плотной упаковкой [1].

В указанных экспериментах И.Никурадзе установил, что при ламинарном режиме течения шероховатость не оказывает никакого влияния на гидравлическое сопротивление трубы. А при турбулентном течении были установлены три режима проявления эффекта шероховатости, определяемые величиной безразмерного комплекса  $-hu_{\tau} / \nu$ <sup>1)</sup>. В частности:

1. при  $hu_{\tau} / \nu < 5$  шероховатость не влияет на характер потока;
2. при  $5 \leq hu_{\tau} / \nu \leq 70$  шероховатость проявляется частично;
3. при  $hu_{\tau} / \nu > 70$  наступает режим полного проявления эффекта шероховатости.

<sup>1)</sup> В 2009 году исполняется 115 лет со дня рождения и 30 лет со дня смерти Ивана Никурадзе, выдающегося ученого, внесшего огромный вклад в дело изучения закономерностей турбулентного течения в гладких и шероховатых трубах. В связи с этим, думается, было бы справедливо, если в знак признания заслуг И.Никурадзе перед наукой в области гидродинамики, указанный безразмерный комплекс будет назван числом Никурадзе -  $Ni = hu_{\tau} / \nu$ .

В этих же экспериментах И.Никурадзе установил основные закономерности распределения скоростей и гидравлического сопротивления при течении в шероховатых трубах. Распределение скоростей при турбулентном течении в шероховатых трубах в режиме полного проявления эффекта песочной шероховатости, как известно, имеет вид:

$$\varphi = 2.5 \ln \frac{r_{cm}}{h} + 8.5, \quad (1)$$

а коэффициент гидравлического сопротивления определяется по формуле:

$$\xi = \left[ \frac{1.15}{\ln(7.4 r_{cm} / h)} \right]^2. \quad (2)$$

Следует отметить, что на практике часто приходится иметь дело с шероховатостью, отличающейся от песочной шероховатости. В связи с этим, с целью систематизации экспериментальных данных, введено понятие эквивалентной песочной шероховатости, под которым подразумевается такая высота элементов песочной шероховатости, при которой, при других равных условиях, значение коэффициента гидравлического сопротивления такое же, что и при фактической шероховатости.

Результаты, полученные И.Никурадзе, и на сегодняшний день не теряют важность из-за уникальности, с одной стороны, и практической ценности - с другой.

\* \* \*

Первые систематические исследования по определению интенсивности теплоотдачи в турбулентном потоке воздуха в шероховатых трубах были проведены В.Нуннером в конце 50-их годов прошлого века [2]. В этой работе В.Нуннером экспериментально было установлено, что создание на поверхности теплообмена искусственной шероховатости обуславливает существенную интенсификацию теплоотдачи в турбулентном потоке (примерно 2,6 раза).

Наряду с многочисленными экспериментальными данными, в работе [2] была предложена физическая модель процесса теплоотдачи шероховатой поверхности. Согласно этой модели, вихри, срывающиеся с вершин элементов шероховатости, вызывают дополнительную турбулизацию ядра турбулентного потока, что обуславливает рост интенсивности теплоотдачи. На основе этой модели В.Нуннером, в рамках термодинамической аналогии, была получена расчетная зависимость, которая следует из формулы Прандтля с учетом шероховатости стенки:

$$Nu = \frac{\xi_n}{8} \frac{Re Pr}{1 + 1.5 Re^{-1/8} Pr^{-1/6} (Pr \xi_n / \xi_0 - 1)} \quad (3)$$

Согласно физической модели, предложенной В.Нуннером и, соответственно, формуле (3), влияние шероховатости на интенсивность теплоотдачи должно быть значительным при  $Pr \ll 1$  (жидкие металлы). С ростом числа  $Pr$  эффект должен снижаться и становится незначительным для жидкостей с высокими числами  $Pr$ .

Сразу после опубликования работы [2] появились экспериментальные исследования, в которых были получены новые важные данные по интенсификации теплообмена, противоречащие физической модели В.Нуннера [3,4].

Ошибочность физической модели, предложенной в [2], впервые четко была обоснована в работах В.Гомелаури [5,6], в которых были высказаны совершенно противоположные соображения относительно механизма интенсификации теплоотдачи под воздействием шероховатости поверхности. Так, согласно [5,6], вихры, срывающиеся с вершин элементов шероховатости, воздействуя на вязкий подслои, вызывают уменьшение толщины и, соответственно, термического сопротивления этого слоя и, тем самым, обуславливают увеличение интенсивности теплоотдачи. Наряду с этим, как это отмечено в [5,6], вихры, распространяясь также и в сторону ядра потока, вызывают его дополнительную турбулизацию. Однако, из-за высокой степени турбулентности указанного ядра, дополнительная его турбулизация не дает значительного эффекта. Очевидно, что, согласно модели, предложенной в [5,6], влияние шероховатости на интенсивность теплоотдачи должно быть существенным для жидкостей с  $Pr > 1$ , поскольку именно в этом случае значительная часть термического сопротивления сосредоточена в пристенной области. Кроме этого, согласно экспериментальным данным В.Гомелаури, с ростом числа  $Pr$  степень интенсификации теплоотдачи под воздействием шероховатости не уменьшается, как это следует из физической модели, предложенной в [2], а наоборот -растет. Высказанные в [5,6] соображения о механизме воздействия шероховатости поверхности на интенсивность теплоотдачи полностью подтвердились многочисленными экспериментами, проведенными за последующие годы, в том числе и учениками В.Гомелаури [7-11].

Здесь особо следует отметить работу [8]. В этой работе одна серия экспериментов в прямоугольном канале была проведена в условиях, когда шероховатость была создана не на обогреваемой, а на противоположной стенке прямоугольного канала. Результаты этих экспериментов показали, что интенсификация теплоотдачи в этом случае составила всего 7%. Этот экспериментальный факт, несомненно, свидетельствует о том, что интенсификация теплоотдачи под воздействием шероховатости обусловлена, главным образом, явлениями, протекающими в пристеночном слое жидкости, а не в ядре потока.

Тем не менее, из-за того, что в опытах [2] в качестве теплоносителя использовался воздух, который по числу Прандтля ( $Pr \approx 1$ ) находится примерно в середине спектра обычных и жидкометаллических теплоносителей, экспериментальные данные В.Нуннера, можно сказать, совершенно случайно совпали с его теоретической формулой, полученной на основе, как выяснилось позже, ошибочной физической модели.

В работе [5] было установлено, что в случае двумерной искусственной шероховатости, максимальное увеличение интенсивности теплоотдачи достигается при значениях геометрического параметра шероховатости –  $s/h = 12 \div 14$ .

На основе многочисленных экспериментальных данных В.Гомелаури предложил критериальное уравнение для расчета коэффициента теплоотдачи, которая является модификацией известного критериального уравнения М.А. Михеева для гладких труб:

$$Nu = 0.021 \varepsilon_{ш} Re^{0.8} Pr^{0.43} \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0.25}, \quad (4)$$

Где  $\varepsilon_{ш} = f(s/h)$  – коэффициент, учитывающий увеличение интенсивности теплоотдачи под воздействием двумерной шероховатости. Согласно [5,6]:

$$\varepsilon_{uu} = \exp[0.85(s/h)_{opt} / (s/h)] Pr^{0.04} \quad \text{при } s/h > 13, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{uu} = \exp[0.85(s/h) / (s/h)_{opt}] Pr^{0.04} \quad \text{при } s/h < 13. \quad (6)$$

В экспериментальных работах [9,11] было зафиксировано несколько иное значение  $s/h$ , при котором достигается максимальное увеличение коэффициента теплоотдачи. В частности, согласно [9,11],  $(s/h)_{opt} = 10$ .

Заслуживает интерес вопрос о том, как высота элементов шероховатости влияет на интенсивность теплоотдачи шероховатых поверхностей. На основе многочисленных экспериментальных данных [8-13] можно заключить, что, с точки зрения интенсификации теплообмена также существуют три режима проявления эффекта шероховатости. При этом, условия проявления указанных режимов практически совпадают с вышеуказанными условиями гидродинамического проявления эффекта шероховатости. Этот факт можно считать косвенным подтверждением справедливости термогидродинамической аналогии и для шероховатых поверхностей.

Относительно высоты элементов шероховатости можно считать установленным, что в случае обычных теплоносителей ( $Pr \geq 1$ ) оптимальной является высота элементов, равная примерно десятикратной толщине вязкого подслоя, рассчитанной для гладкой поверхности.

Интересные эксперименты были проведены в работе [14], в которой было исследовано влияние т.н. неоднородной шероховатости на интенсивность теплоотдачи и гидравлическое сопротивление при движении воздуха в кольцевом канале. В этой работе на поверхности внутренней обогреваемой трубы кольцевого канала между элементами обычной двухмерной шероховатости ( $s/h=12$ ) были расположены дополнительные элементы сравнительно меньшей высоты. Согласно [14], такая шероховатость обуславливает дополнительное увеличение интенсивности теплоотдачи (12%) и заметное снижение коэффициента гидравлического сопротивления.

В последние годы ведутся интенсивные экспериментальные и теоретические работы по интенсификации теплоотдачи методом создания полусферических углублений на поверхности нагрева [15,16]. Правда, следует отметить, что первоначальные результаты о колоссальной эффективности таких поверхностей [15] дальнейшими экспериментами не подтвердились.

Практически все исследования, посвященные проблемам интенсификации теплоотдачи методом шероховатости, проводились в достаточно широком диапазоне чисел Рейнольдса. К настоящему времени можно считать установленным, что в ламинарном режиме движения шероховатость стенки не влияет на интенсивность теплоотдачи.

В переходном режиме течения зафиксировано резкое увеличение интенсивности теплоотдачи под воздействием шероховатости поверхности.

В развитом турбулентном режиме течения, при оптимальной высоте элементов шероховатости отношение  $Nu / Nu_0 = const > 1$ . Правда, существуют эксперименты, в которых зафиксирован незначительный рост, или незначительное уменьшение  $Nu/Nu_0$  с ростом числа Рейнольдса [9].

\* \* \*

Несомненно, представляет интерес определение влияния искусственной шероховатости на интенсивность теплоотдачи при перемешивании жидкости в большом объеме. Эта проблема впервые была экспериментально исследована автором данного доклада совместно со своими коллегами. Результаты этих исследований представлены в работах [17,18].

Эксперименты проводились в цилиндрическом сосуде с внутренним диаметром  $D=200\text{мм}$  и высотой  $300\text{мм}$ . Экспериментальным участком являлась кольцеобразная труба ( $d=10\text{мм}$ ) из нержавеющей стали. Средний диаметр кольца составлял  $140\text{мм}$ . Теплоотдающая кольцеобразная труба размещалась в сосуде коаксиально с вертикально расположенным валом мешалки на расстоянии  $50\text{мм}$  от дна сосуда. В качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода. В экспериментах использовались лопастные мешалки разного диаметра и разным количеством лопастей. Эксперименты проводились в условиях размещения мешалки как на одном уровне ( $\Delta h=0$ ), так и на разных уровнях с теплоотдающей трубой ( $\Delta h \neq 0$ ). На теплоотдающей трубе укреплялись элементы шероховатости, которыми являлись проволоочные кольца или шайбы. Высота элементов шероховатости, а также шаг между элементами вдоль верхней образующей кольцеобразной трубы менялись. В частности, в экспериментах  $h=0,25, 0,5, 1,15, 1,4\text{мм}$ ;  $s/h=3.5, 7.1, 7.5, 8, 10, 20, 40$ .

В этих экспериментах было установлено, что создание на поверхности нагрева двухмерной шероховатости обуславливает существенное увеличение интенсивности конвективной теплоотдачи. При этом, эффект шероховатости больше при размещении мешалки и теплоотдающей кольцевой трубы на разных уровнях от дна сосуда. Наряду с этим, следует отметить, что в рассматриваемом случае эффект интенсификации меньше, чем в случае турбулентного движения в каналах. В работах [17,18] этому факту было дано соответствующее объяснение. В этих работах также было установлено, что оптимальное значение геометрического параметра двухмерной шероховатости находится в пределах  $5 \leq s/h \leq 10$  (рис.1).

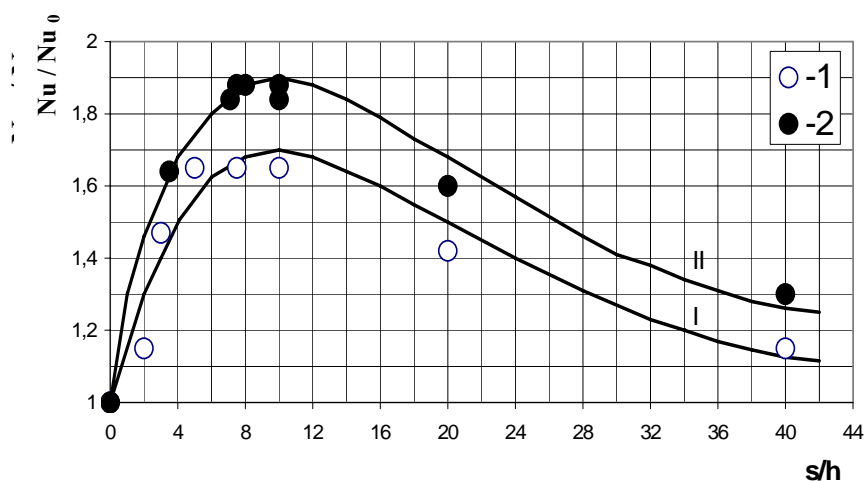


Рис.1. Зависимость интенсивности теплоотдачи от геометрического параметра  $s/h$ .

$Re_{\text{ц}}=2 \cdot 10^5$ ,  $Pr=3$ ,  $d_m=120\text{мм}$ ,  $b=10\text{ мм}$ ,  $Z=2$ .

1. Экспериментальные данные,  $\Delta h=0$ ; 2. Экспериментальные данные,  $\Delta h=30\text{мм}$ .

I - по формуле (2),  $\Delta h=0$ ; II - по формуле (2),  $\Delta h=30\text{ мм}$ .

На основе проведенных исследований в [17,18] получено критериальное уравнение:

$$Nu = 0.82 Re_{\mu}^{0.62} Pr^{0.33} \left(\frac{D}{d_M}\right)^{0.35} \left(\frac{D}{H}\right)^{0.25} \left(\frac{25b}{H}\right)^{0.35} \left(1 + \frac{|\Delta h|}{b}\right)^{-0.12} \left(\frac{Z}{2}\right)^{0.35} (\mu/\mu_c)^{0.14} \varepsilon_{ш}, \quad (7)$$

где в случае гладкой поверхности  $\varepsilon_{ш}=1$ , а для поверхности с двухмерной шероховатостью при полном проявлении эффекта шероховатости

$$\varepsilon_{ш} = Pr^{0.05} \left(\frac{D}{d_M}\right)^{-0.15} \left(1 + \frac{|\Delta h|}{b}\right)^{0.1} \left(\frac{Z}{2}\right)^{-0.1} (1 + 0.2(s/h) \exp(-0.1(s/h))) . \quad (8)$$

Как это видно из рис.1, критериальное уравнение удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

\* \* \*

Эксперименты по определению влияния искусственной шероховатости на процесс кипения в потоке недогретой воды в кольцевом канале, были проведены на экспериментальной установке, подробно описанной в работе [19]. Часть результатов были опубликованы в работах [19,20]. Экспериментальная установка представляла собой замкнутый циркуляционный контур. Основным элементом экспериментальной установки являлся кольцевой канал, длиной 200мм. Кольцевой канал был изготовлен из нержавеющей стали. Внутренний диаметр наружной трубы составлял 13,9мм, а наружный диаметр внутренней трубы был равен 11,06мм. В экспериментах обогревался внутренняя труба путем пропускания через нее переменного тока низкого напряжения. Длина обогреваемого участка составляла 100мм.

Искусственная шероховатость на поверхности экспериментальной трубы создавалась путем намотки на трубу проволоки. Высота элементов шероховатости была равна 0,2мм. Опыты были проведены при значениях геометрического параметра -  $s/h$  равных 7,5; 13 и 20. В экспериментах в качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода. Скорость теплоносителя -  $u$  в опытах был 2,6; 3,36; 4,2; 4,85; 5,4; 6,4 м/с. Давление теплоносителя менялось в интервале  $(1,4-1,9)10^5$  Па.

На рис.2 в координатах  $q, \Delta t=t_{ст}-t_{н}$  представлены результаты исследования по определению влияния шероховатости на процесс пузырькового кипения. Эти результаты получены при недогреве воды около  $30^{\circ}C$  и при разных скоростях теплоносителя. Как это видно из указанного рисунка, искусственная шероховатость оказывает существенное влияние на интенсивность теплоотдачи в начальной стадии пузырькового кипения. При развитом пузырьковом кипении влияние шероховатости, также как и скорости потока, на интенсивность теплоотдачи практически отсутствует (сплошная линия на рис.2 соответствует развитому пузырьковому кипению в большом объеме).

Следует отметить, что аналогичная картина была получена в экспериментах по определению влияния искусственной шероховатости на интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме в условиях перемешивания [21].

В экспериментах [19,20] были получены довольно неожиданные результаты по критическим тепловым потокам для поверхности с двухмерной шероховатостью. Так,

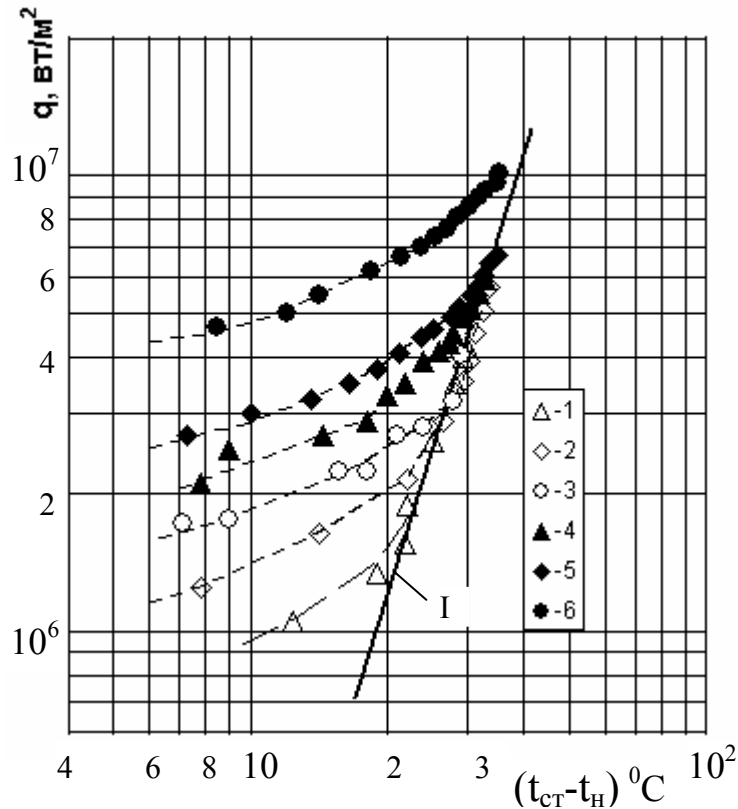


Рис.2. Зависимость теплового потока от температурного напора.

Гладкая поверхность:

1.  $u=2.6$  м/с,  $(t_n-t_{ж})=32,3^0$  C; 2.  $u=4.2$  м/с,  $(t_n-t_{ж})=32^0$  C; 3.  $u=6.4$  м/с,  $(t_n-t_{ж})=32^0$  C;

Шероховатая поверхность,  $s/h=13$ :

4.  $u=2.6$  м/с,  $(t_n-t_{ж})=32^0$  C; 5.  $u=4.2$  м/с,  $(t_n-t_{ж})=28,75^0$  C; 6.  $u=6.4$  м/с,  $(t_n-t_{ж})=33^0$  C;

I – по формуле  $q=45.3 (t_{ct}-t_n)^{3,33} P^{0.15}$ .

при недогревах равных примерно  $(20-25)^0$ C критические тепловые потоки для гладкой-  $q_{кр,0}$  и шероховатой поверхностей -  $q_{кр}$  равны друг другу. При меньших значениях температуры недогрева  $q_{кр,0} > q_{кр}$ . При недогревах превосходящих  $(20-25)^0$ C  $q_{кр} > q_{кр,0}$ , при чем указанная разница растет с ростом недогрева и при недогреве равном  $50^0$ C, критический тепловой паток для шероховатой поверхности ( $s/h=13$ ) примерно в два раза превосходит критический тепловой паток для гладкой поверхности. Визуальный осмотр экспериментальной трубы подвергнувшей кризису кипения, показал, что кризис возникал за элементами шероховатости вниз по потоку, в так называемой застойной зоне, где условия близки к условиям в большом объеме [20].

В работе [20] была предложена физическая модель возникновения кризиса пузырькового кипения на шероховатой поверхности. На основе этой модели была получена формула для расчета критического теплового патока:

$$q_{кр} = 0,1\sqrt{\rho_{жс}} \sqrt[4]{g\sigma(\rho_{жс} - \rho_n)} + 0,013\rho_{жс} u c_p (t_n - t_{жс}) . \quad (9)$$

В формуле (9) первая слагаемая правой части представляет собой известную формулу С.С.Кутателадзе (с коэффициентом 0,1 вместо 0,14), справедливую для кризиса кипения насыщенной жидкости в большом объеме [22]. Сопоставление формулы (9) с экспериментальными данными [20] дало удовлетворительное совпадение.

\* \* \*

Заслуживают интерес исследования, посвященные проблемам образования отложений на шероховатых поверхностях. В работах [23-26] изучались сравнительные характеристики гладких и шероховатых труб в условиях образования отложений. В работе [23] были исследованы одна гладкая и три шероховатые трубы. Шероховатость была создана в виде спиральных вырезов с разным шагом вырезки. В этих опытах на поверхности нагрева осаждался углекислый кальций из раствора  $\text{NaHCO}_3$  и  $\text{CaCl}_2$ , содержащего 300 частей на миллион твердого вещества в виде суспензии и 3000 частей на миллион твердого вещества в растворенном виде. Скорость теплоносителя изменялась в пределах от 0,5 м/с до 3 м/с, температура теплоносителя была равна  $57^\circ\text{C}$ . Согласно данным [23], в результате образования отложений, интенсивность теплоотдачи для шероховатых труб снижается более существенно, чем для гладкой трубы. Однако, несмотря на это, коэффициент теплоотдачи шероховатых труб после образования отложений, все же превышает коэффициент теплоотдачи гладкой трубы на 40-50%. Асимптотические значения коэффициента теплоотдачи как для гладкой, так и для шероховатых труб достигаются через несколько часов. Согласно результатам [23], после достижения асимптотических условий, дополнительное образование отложений не оказывали влияния на величину коэффициента теплоотдачи. В работе [23] не обнаружено влияние шага спиральной вырезки на процесс образования отложений. Следует отметить, что, поскольку, в опытах [23] шаг спиральной вырезки изменялся в узком диапазоне, его влияние на интенсивность образования отложений было трудно обнаружить.

В работе [24] приведены результаты сравнительного исследования интенсивности образования отложений в трубах с кольцевыми турбулизаторами и в гладких трубах кожухотрубчатых теплообменных аппаратов. В экспериментах [24] в качестве рабочей жидкости применялся искусственно приготовленный раствор с высокими значениями жесткости (до 24 мг-экв/л) и щелочности (до 14 мг-экв/л). Скорость жидкости в опытах  $u=1.3$  м/с. Эксперименты проводились при постоянной температуре стенки, равной  $t_{\text{ст}}=70^\circ\text{C}$ . Интенсивность образования отложений исследовалась в гладкой латунной трубе диаметром  $d=16/14$  мм и в такой же трубе с кольцевыми турбулизаторами (элементами шероховатости). Параметры шероховатости были следующие  $h/d=0.039$ ,  $s/d=0.53$  и  $s/h=11$ . В экспериментах [24] было обнаружено, что в результате образования отложений, интенсивность теплоотдачи как для гладкой, так и для шероховатой труб снижается и через несколько часов работы установки достигает асимптотического значения. Эти результаты качественно согласуются с данными [23]. Однако, при этом, по данным [24], в отличие от результатов [23], коэффициент теплоотдачи как для гладкой, так и для шероховатой труб, в результате образования отложений снижаются примерно в одинаковой степени.

В работе [25] был проведен теоретический анализ процесса образования отложений на шероховатых поверхностях. Однако, по-видимому, малочисленный экспериментальный материал, зачастую носящий противоречивый характер, не достаточен для проведения полноценного теоретического анализа.

Многочисленные эксперименты, посвященные проблемам влияния искусственной шероховатости на процесс образования отложений на теплоотдающей поверхности, были проведены в работе [26]. Указанные эксперименты проводились на установке представляющий собой замкнутый циркуляционный контур. Опытным участком



установки служил вертикально расположенный кольцевой канал, состоящий из наружной трубы с внутренним диаметром 14мм и внутренней обогреваемой трубы с наружным диаметром 10мм. Общая длина кольцевого канала составляла 0,4м. (Одна серия экспериментов была проведена с коротким кольцевым каналом общей длиной 0,2м.). Нижняя необогреваемая часть кольцевого канала длиной 0,2м служила участком гидродинамической стабилизации. В качестве теплоносителя использовалась сетевая вода жесткостью 3,6 мг-экв/л. Вода в кольцевом канале двигалась снизу вверх. При постоянных значениях теплового потока, температуры, расхода и давления воды на входе кольцевого канала, измерения проводились через каждые 15мин. При каждом заданном режиме эксперимент проводился в течение 24-28 ч.

Интенсивность образования отложений определялась по снижению во времени коэффициента теплоотдачи. В опытах по измеренным значениям плотности теплового потока и разности температур стенки и жидкости определялись как средний, так и локальные коэффициенты теплоотдачи. Эксперименты были проведены при разных значениях плотности теплового потока, скорости и температуры теплоносителя как с гладкой, так и с шероховатыми поверхностями. Шероховатость создавалась путем намотки на опытную трубу проволоки. Высота элементов шероховатости была равна 0.1, 0.2 и 0.3мм; а отношение шага между элементами шероховатости –  $s$  к их высоте –  $h$  было 5, 12.5 и 25. Одна серия экспериментов была проведена с трубой с лунками. Диаметр лунок составлял 1мм, а глубина – 0,5мм шаг между лунками составлял 1мм. Еще одна серия экспериментов была проведена с трубой с комбинированной шероховатостью, которая была получена в результате намотки проволоки на трубу с лунками. Часть результатов этих исследований представлены на рис.3.

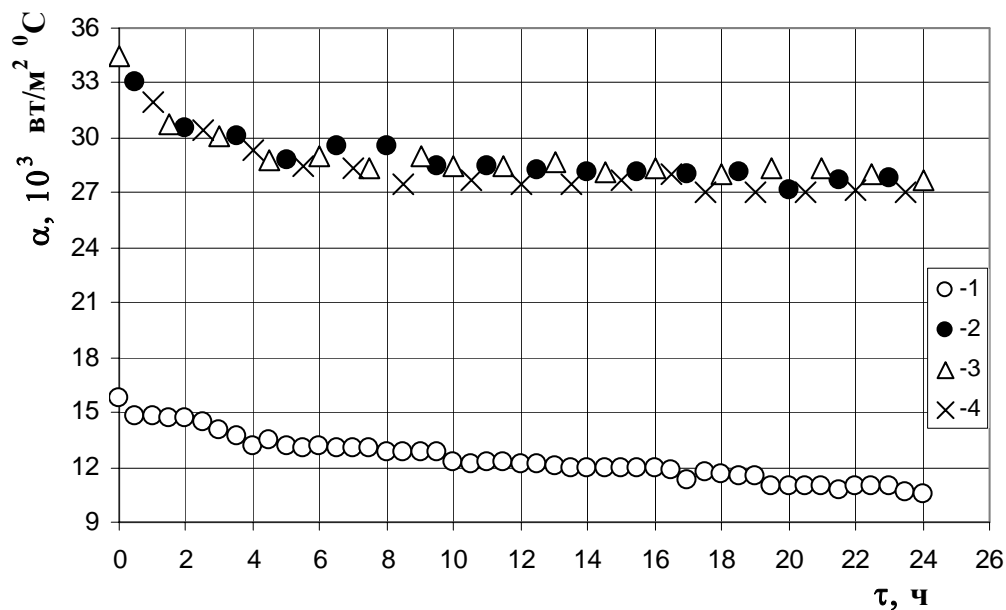


Рис.3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени работы установки  
 $u=1.75\text{ м/с}$ ;  $t_{\text{ж}}=70^\circ\text{C}$ .

1. Гладкая поверхность; Шероховатые поверхности,  $s/h=12.5$ ;
2.  $h=0.1\text{ мм}$ ; 3.  $h=0.2\text{ мм}$ ; 4.  $h=0.3\text{ мм}$ .

В результате проведенных экспериментов было установлено, что создание на поверхности нагрева двумерной шероховатости обуславливает существенное

снижение интенсивности образования отложений. В отличие от результатов, полученных в работах [23,24], согласно данным [26], приведенным на рис.3, снижение интенсивности теплоотдачи в результате образования отложений, для гладкой поверхности носит более резкий характер, чем для шероховатой поверхности с оптимальным геометрическим параметром. При этом, высота элементов шероховатости практически не оказывает влияния на процесс образования отложений.

Среды исследованных поверхностей с двухмерной шероховатостью оптимальной оказалась поверхность с геометрическим параметром шероховатости –  $(s/h)_{\text{опт}}=12,5$ . Поверхность с лунками, также как и поверхность с комбинированной шероховатостью оказались менее эффективными [26].

\* \* \*

С практической точки зрения большое значение имеет решение вопроса о выгоды применения метода искусственной шероховатости. Этот вопрос рассматривался в работах [2,8,9]. Можно считать установленным, что при соответствующем подборе геометрических параметров шероховатости, применение указанного метода практически выгодно во всех случаях для обычных теплоносителей. Наилучший эффект достигается при значениях числа Рейнольдса соответствующих переходу от ламинарного режима течения к турбулентному.

Следует отметить, что метод искусственной шероховатости успешно был реализован на Тбилиском исследовательском ядерном реакторе. В результате реализации указанного метода мощность реактора была увеличена примерно в 2,5 раза [27].

\* \* \*

Теоретические исследования, посвященные определению интенсивности теплоотдачи шероховатых поверхностей, проведены в работах [2,7,9,10,11,13,27].

В работе [13] была предложена четырехслойная модель процесса теплоотдачи шероховатых поверхностей. На основе этой модели В.Мигай, используя принципы термогидродинамической аналогии, получил расчетную зависимость для коэффициента теплоотдачи шероховатых поверхностей. В этой работе В.Мигай совершенно справедливо принял, что термогидродинамическая аналогия в случае шероховатых поверхностей справедлива не для полного коэффициента гидравлического сопротивления, а лишь для его части - коэффициента трения. В работе [13] была предложена формула для выделения коэффициента трения от полного коэффициента гидравлического сопротивления:

$$\xi = \frac{\xi_n(\text{Re}=5000)}{(\text{Re}/5000)^{0.25}} \quad (10)$$

Следует отметить, что согласно формуле (10), сопротивление формы элементов шероховатости независимо от их геометрии проявляется при  $\text{Re}=5000$ , что не подтверждается экспериментальными данными.

В работе [28] автором была предложена четырехслойная модель процесса теплоотдачи шероховатых поверхностей, на основе которой была получена следующая формула для расчета коэффициента теплоотдачи.

$$Nu = \frac{0.1\sqrt{k}\left(1 + \frac{1.75}{Pr+8}\right) Pr Re \sqrt{\xi/2}}{\eta_1 Pr + \eta_1 \ln(1+5 Pr) + \frac{0.5\eta_h Pr}{1+0.165\eta_h Pr} - 2.5\sqrt{k} \ln\left(\frac{h}{r_{ct}} + \frac{\eta_2}{\eta_u}\right)}, \quad (11)$$

Где  $\eta_1 = 5[\xi_0 / \xi]^m$ ,  $\eta_2 = 30[\xi_0 / \xi]^m$ ,  $\eta_h = \frac{h}{r_{cm}} \frac{Re}{4} \sqrt{\xi/2}$ ,  $\eta_u = \frac{Re}{4} \sqrt{\xi/2}$

Для расчета  $\xi_0$  можно использовать формулы для гладких труб, в том числе и формулу, предложенную автором [29]:

$$\xi_0 = (\log Re)^{-2.48}. \quad (12)$$

В отличие от работы [13] в нашем случае предложен следующий метод выделения коэффициента трения от полного гидравлического сопротивления шероховатых труб. При частичном проявлении режима шероховатости, т.е. при  $Re < Re^*$ ,  $\xi = \xi_{п}$ .  $\xi_{п}$  определяется по экспериментальным данным.

При полном проявлении режима шероховатости т.е. при  $Re > Re^*$

$$\xi = \xi_{п} \left[ \frac{\log Re^*}{\log Re} \right]^{2.48}, \quad (13)$$

где  $\xi_{п}$  рассчитывается по формуле Никурадзе (2). Согласно И.Никурадзе

$$Re^* = 340 \frac{r_{cm}}{h} \ln(7.4 r_{cm} / h). \quad (14)$$

На рис.4 представлено сопоставление формулы (11) с экспериментальными данными работы [7] ( $m=2/3$ ).

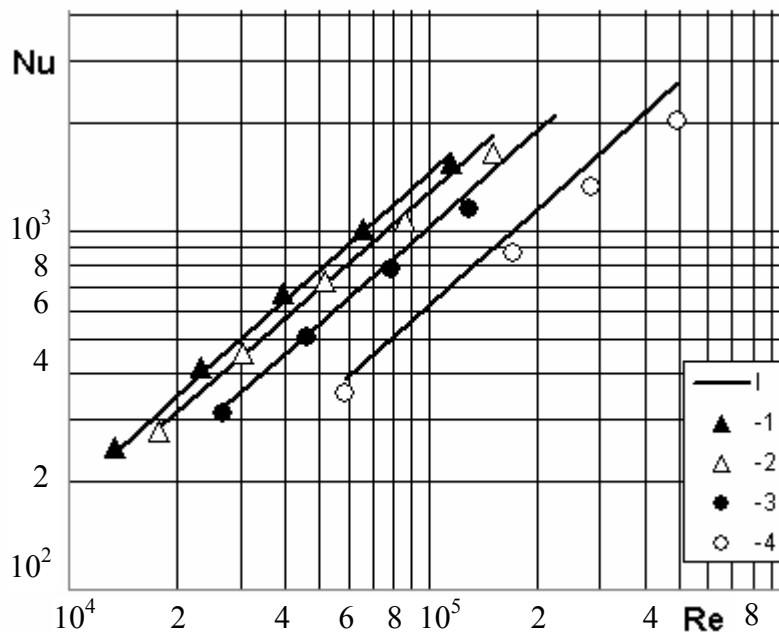


Рис.4. Зависимость интенсивности теплоотдачи от числа Re  
I – По формуле (11); Экспериментальные данные работы [7] ( $h/r_0=0.0976$ ).:  
1.  $Pr=5.94$ , 2.  $Pr=4.38$ , 3.  $Pr=2.73$ , 4.  $Pr=1.2$ .

Как это видно из указанного рисунка, совпадение формулы (11) с опытными данными [7] вполне удовлетворительное.

В дальнейшем физическая модель, предложенная в [28], с некоторыми изменениями была распространена и для случая жидкометаллических теплоносителей [30]. В работе [30] теоретически было показано, что применение метода шероховатости может оказаться эффективным и в случае расплавленных металлов.

В заключение следует отметить, что наряду с достигнутыми успехами все еще остаются проблемы, не нашедшие к настоящему времени удовлетворительного решения. В частности:

Ни одна из предложенных моделей не может объяснить экспериментальный результат [10], согласно которому, начиная с некоторого значения высоты элементов шероховатости, с ростом  $h$  степень интенсификации снижается.

Существующие экспериментальные данные недостаточны для объяснения особенностей процесса образования отложений на шероховатых поверхностях.

Практически на начальной стадии изучения находится проблема интенсификации теплообмена при перемешивании жидкости в большом объеме.

Очевидно, что для решения указанных проблем, наряду с другими проблемами, не нашедшими отражение в данном докладе, проведение дальнейших экспериментальных и теоретических исследований является необходимым.

### Основные обозначения

$a$  - коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $b$  - высота лопастей мешалки,  $\text{м}$ ;  $c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении,  $\text{Дж}/\text{кг } ^\circ\text{C}$ ;  $d$ ,  $d_m$  - диаметр трубы и мешалки соответственно,  $\text{м}$ ;  $\varphi = u/u_\tau$  - безразмерная скорость;  $g$  - ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $h$  - высота элементов шероховатости,  $\text{м}$ ;  $H$  - уровень жидкости в сосуде,  $\text{м}$ ;  $\eta = yu_\tau / \nu = (y/r_0)(\text{Re}/4)\sqrt{\xi/2}$  - безразмерное расстояние от стенки;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/\text{м } ^\circ\text{C}$ ;  $k = f/f_0$  - увеличение площади поверхности вследствие шероховатости;  $n$  - число оборотов мешалки,  $1/\text{с}$ ;  $Nu = \alpha d / \lambda$  - критерий Нусельта;  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\text{Pr} = \nu / a$  - критерий Прандтля;  $q$  - плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $\text{Re} = \bar{u} d / \nu$  - критерий Рейнольдса.  $\text{Re}_y = n d^2 / \nu$  - центробежный критерий Рейнольдса.  $r_{\text{ст}}$  - радиус трубы;  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$  - плотность жидкости и пара соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $s$  - шаг между элементами шероховатости,  $\text{м}$ ;  $t_{\text{ст}}$ ,  $t_{\text{ж}}$ ,  $t_{\text{н}}$  - температура стенки, жидкости и насыщения соответственно,  $^\circ\text{C}$ ;  $\tau$  - касательное напряжение,  $\text{н}/\text{м}^2$ ;  $y$  - расстояние от стенки,  $\text{м}$ ;  $\bar{u}$  - средняя скорость потока,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $u_\tau = \sqrt{\tau_{\text{ст}} / \rho}$  - динамическая скорость,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\xi$ ,  $\xi_{\text{п}}$  - коэффициент трения и полного гидравлического сопротивления соответственно;  $Z$  - число лопастей мешалки; Индекс -0 относится к гладкой поверхности.

### Литература

- [1] Nikuradze J. Stromungsgesetze in rouhen Rohren. VDI Forschungsheft, N361, 1933, s.16-53.
- [2] Nunner W. Wärmeübergang und druckabfall in rouhen rohren. VDI Forschungsheft, 1956, 455s.

- [3] Smith J.W. Epstein N. Effect of Wall Roughness on Convective heat transfer in commercial pipes. A.I.Ch.E. Journal, 1957, June, pp. 242-248.
- [4] Фединский О.С. Интенсификация теплообмена при течении воды в кольцевом канале. В кн. Вопросы теплообмена Изд-во АН СССР, 1959, с.53-66.
- [5] Гомелаури В.И. Влияние искусственной шероховатости на конвективный теплообмен. Труды Института физики АН ГССР, т.IX, 1963, с.111-145.
- [6] 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.
- [7] Dipprey D.F. and Sabersky R.H. Heat and momentum Transfer in Smooth and Rough Tubes at Various Pr Numbers. Int. J. Heat and Mass Transfer, v.6, N5, 1963, pp.329-353.
- [8] Гомелаури В.И., Канделаки Р.Д., Кипшидзе М.Е. Интенсификация конвективного теплообмена под воздействием искусственной шероховатости. В кн. Вопросы конвективного теплообмена и чистоты водяного пара. Изд-во АН ГССР, 1970, с.98-131.
- [9] Калинин Е.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение. 1972, 219с.
- [10] Шланчяускас А.А., Дрижюс М.Р. Расчет теплообмена шероховатых поверхностей. В кн. Теплообмен -V. Минск, 1976, т.1, ч.1, с.67-76.
- [11] Webb R.L., Eckert E.R., Goldstein R.J. Heat Transfer and friction in tubes with repeatedrib roughness. Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol.14, 4, 1971, pp.601-617.
- [12] Гомелаури В.И., Маграквелидзе Т.Ш., Микашавидзе А.Н., Джамарджашвили В.А. Чучулашвили Т.А. Экспериментальное исследование интенсификации теплоотдачи гелия методом двухразмерной шероховатости. Сообщения АН ГССР, 1974, том 79, №1, с.137-140.
- [13] Мигай В. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия, 1980, 144с.
- [14] Джамарджашвили В.А. Усовершенствованный метод интенсификации теплоотдачи и его экспериментальное обоснование. Сообщения АН ГССР, 1989, т.133, с.369-372.
- [15] Кикнадзе Г.И., Олейников В.Г. – Самоорганизация смерчеобразных вихревых структур в потоках газов и жидкостей и интенсификация тепло- и массообмена. Препринт 227-906 Новосибирск, Институт Теплофизики СО АН СССР, 1990, 45с.
- [16] Леонтьев А.И., Олимпиев В.В., Дилевская Е.Б., Исаев С.А. Существо механизма интенсификации теплообмена на поверхности со сферическими выемками. Известия РАН. Энергетика, 2002, №2, с. 117-133.
- [17] Magrakvelidze T.Sh., Bantsadze N.O., Lekveishvili N.N. Influence of Artificial Roughness on Heat Transfer to Turbulent Mixed Liquid in a Pool. Bull of the Georgian AS, 1996, N3, pp.397-400.
- [18] Маграквелидзе Т.Ш., Банцадзе Н.О., Леквеишвили Н.Н. Интенсификация теплоотдачи в аппарате с мешалкой. Труды 5-го Минского международного форума по тепло- и массообмену, Минск, 2004г. <http://www.itmo.by/forum/mif5/doc.html>
- [19] 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.
- [20] Гомелаури В.И., Маграквелидзе Т.Ш. О механизме воздействия двухразмерной искусственной шероховатости на кризис кипения в потоке недогретой воды. Теплоэнергетика, 1978, №2, с.5-7.
- [21] Маграквелидзе Т.Ш., Ломидзе Х.Н., Банцадзе Н.О. Теплоотдача гладкой и шероховатой кольцеобразных труб при кипении в большом объеме в условиях перемешивания кипящей жидкости. Институт систем управления им. А.И.Елиашвилл Сборник трудов. 2007, Тбилиси, с. 122-125.
- [22] Кутателадзе С.С. – Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат. 1979, 415с.

- [23] Уоткинсон А., Мартинец О. – Образование отложений в трубах теплообменника со спиральными вырезами. Теплопередача, 1975 №3, с.181-183.
- [24] Дрейцер Г.А. Гомон В.И., Аронов И.З. – Сравнительные исследования величины отложений в трубах с кольцевыми турбулизаторами и в гладких трубах кожухотрубчатых теплообменников. Промышленная теплотехника, 1983, №2, с.36-42.
- [25] Дрейцер Г.А. – Модель процесса солеотложения при обтекании охлаждающей водой труб с кольцевыми турбулизаторами. Тепломассообмена, №6, с.53-57.
- [26] Гомелаури В.И., Маграквелидзе Т.Ш., Леквишвили Н.Н. Воздействие двухмерной искусственной шероховатости на процесс образования отложений на теплоотдающих поверхностях. Теплоэнергетика, 1992, №8, с.39-42.
- [27] Абрамидзе Ш.П., Гомелаури В.И., Канделаки Р.Д., Кикнадзе Г.И. Исследование теплообмена в активной зоне ядерного реактора типа ИРТ с искусственной шероховатостью на оболочках тепловыделяющих элементов. В кн. Вопросы конвективного теплообмена и чистоты водяного пара. Изд. АН ГССР, 1970, с.132-149.
- [28] Маграквелидзе Т.Ш. Влияние искусственной шероховатости на процессы конвективной теплоотдачи, пузырькового кипения и образования отложений. Автореферат докторской диссертации. Тбилиси, 1999, 54 с.
- [29] Маграквелидзе Т.Ш. О некоторых вопросах турбулентного движения в гладкой трубе. Институт систем управления им. А.Елиашвили, Сб. трудов. 2007, Тб., с.119-121.
- [30] Маграквелидзе Т.Ш. Теплоотдача при турбулентном течении расплавленных металлов в шероховатых и гладких трубах. Тезисы докладов и сообщений 5-го Минского международного форума по тепло - и массообмену, Минск, 24-28 мая 2004г. т 1, ст.101-102. Труды форума: <http://www.itmo.by/forum/mif5/doc.html>