

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА НА РАЗВИТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ КИПЕНИИ

А. В. ОВСЯННИК

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Влияние теплоотдающей поверхности на интенсивность теплообмена при кипении и на степень ее перегрева было обнаружено очень давно, но первые систематические исследования влияния поверхности на теплоотдачу при пузырьковом кипении были проведены Якобом и Фритцем [2]. Корти и Фоуст [3] исследовали теплоотдачу при кипении жидкостей на теплоотдающих поверхностях при различном их состоянии.

Митрович [1] определяет теплоотдающую поверхность при кипении жидкостей как идеальную при условии, что изменение плотности теплового потока не приводит к изменению перегрева поверхности, другими словами необходимым и достаточным условием существования идеальной поверхности при кипении является $\vartheta = \text{const}$ при $q = \text{var}$. Выполнение этого условия требует изменения термического сопротивления теплоотдаче R при пузырьковом кипении в соответствии с выражением

$$\vartheta = \frac{1}{\alpha} q = Rq = \text{const}, \quad (1)$$

которое означает, что любое увеличение плотности теплового потока приводит к соответствующему уменьшению термического сопротивления теплоотдаче, сохраняя разность температур неизменной.

Процесс теплоотдачи при пузырьковом кипении обусловлен испарением на существующей границе раздела «пар – жидкость», если молекулы, покидающие жидкую фазу, испытывают резкое увеличение энергии (энергии активизации) непосредственно от поверхности нагрева. Это означает, что тепловой поток теплоотдающей поверхности полностью расходуется на парообразование непосредственно на поверхности. Для этого необходимо, чтобы частота роста пузырьков пара обеспечивалась без дополнительного увеличения температуры стенки. Одним из факторов, обеспечивающих это условие, является постоянное наличие границы раздела «пар – жидкость» на поверхности нагрева. Другим фактором может быть идея использования соответствующей структуры поверхности, взаимодействующей с жидкостью и способствующей образованию и росту пузырьков пара. Учитывая это, можно сделать вывод о том, что поверхность, являющаяся эффективной при пузырьковом кипении, должна быть способной формировать пузырьки пара при времени ожидания, равном или близком к нулю [1]. Это означает, что паровой зародыш должен оставаться в центре парообразования при отделении пузырька пара. Условие существования этого зародыша будет являться критерием роста пузырьков.

Автор [1] отмечает, что для того, чтобы обеспечить постоянную разность температур при кипении на теплоотдающей поверхности, критический радиус парового пузырька должен быть фиксированным, т. е. все центры парообразования должны иметь один и тот же радиус. Таким образом, исключается возможность существования центров парообразования других размеров и теплоотдающая поверхность должна иметь моноразмерную структуру. Следовательно, перегрев стенки, соответствующий этой структуре, будет одинаковым для всей поверхности.

Таким образом, для того чтобы это утверждение было справедливым, необходимы два условия:

1. Образование пузырька происходит при времени ожидания равном или близком к нулю, что означает наличие жизнеспособного парового зародыша в центре парообразования после отделения пузырька пара. Это может быть реализовано в структуре, сформированной соответствующим образом.

2. Расстояние между центрами парообразования должно быть задано определенным образом для того, чтобы к каждому центру парообразования обеспечивался подвод теплоты, необходимой для роста парового пузырька.

На рис. 1 представлены характеристики кипения, полученные при кипении R11 при атмосферном давлении [1].

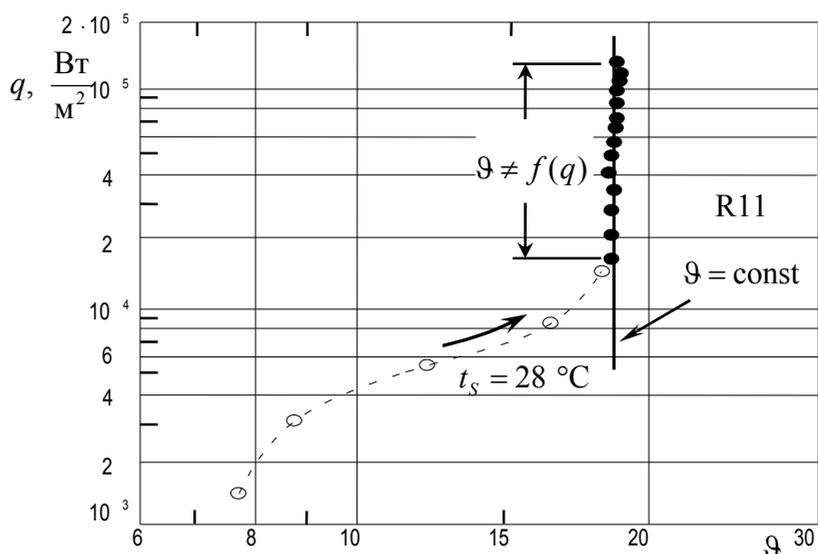


Рис. 1. Кривая кипения R11 на идеальной поверхности [1]

Постоянство перегрева стенки отмечалось только при относительно большом тепловом потоке. Эта характеристика кипения отмечалась только при горизонтальном расположении поверхности нагрева.

Необходимо отметить статью Митровича и Хартмана, в которой идет речь о пузырьковом кипении в большом объеме R141b. В исследованиях были использованы горизонтальные трубки, снабженные новой микроструктурой, выполненной методом электронапыления с использованием гальванического метода (рис. 2). Высота шипообразных элементов диаметром от 1 до 25 $\mu\text{м}$ была в диапазоне от 10 до 100 $\mu\text{м}$, в то время как плотность шипов изменялась от $1 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ до $1 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$. Оба образца (трубки) выполнены из меди в связи с ее высокой теплопроводностью и преимуществ с точки зрения процесса электронапыления (внешний диаметр 18 мм, нагреваемая длина 180 мм).

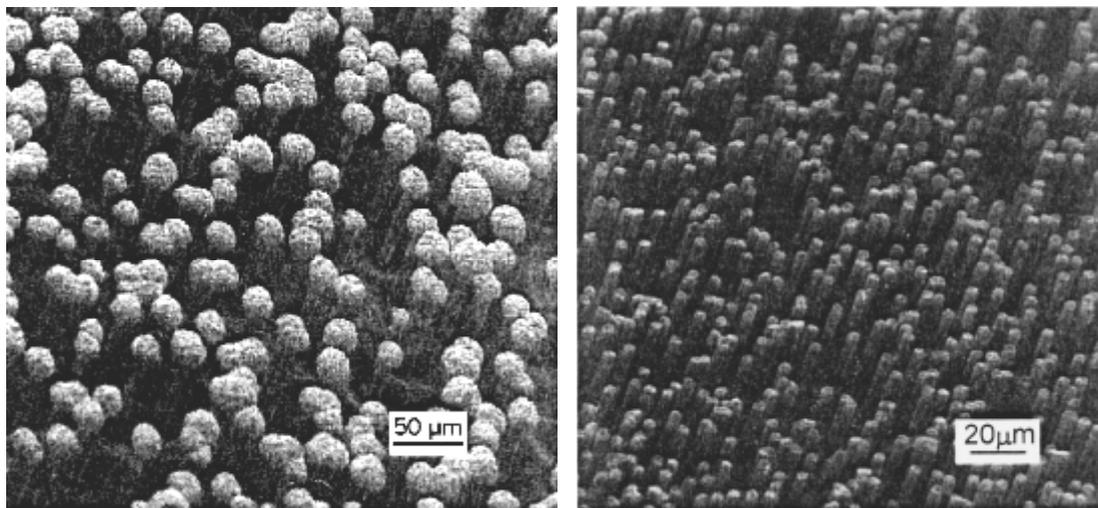


Рис. 2. Экспериментальные образцы с идеальной микроструктурой поверхности [1]

Было отмечено незначительное уменьшение ΔT при увеличивающемся q , которое не получило объяснения в [1], но может быть объяснено эффектом «взрывного» вскипания, проявляющегося в том, что при увеличении плотности теплового потока вступают в работу активные центры парообразования примерно одинакового размера, в результате чего на них образуются паровые пузыри примерно одинакового отрывного диаметра. При достижении определенной плотности теплового потока (при которой происходит отрыв паровых пузырей) от теплоотдающей поверхности отрывается большое количество паровых пузырей одинакового размера, отводя от поверхности большое количество теплоты и уменьшая перегрев стенки.

Постановка задачи и ее решение

Постоянство перегрева стенки при разных тепловых потоках определяется соответствующим изменением плотности пузырьков пара на поверхности нагрева. Так как активация других пузырьков в структуре в равной мере возможна в любом месте поверхности, новые пузырьки формируются при том же перегреве поверхности. Темп активации новых пузырьков пара должен быть пропорциональным изменению плотности теплового потока, чтобы исключить дополнительный перегрев стенки. Это обеспечивает независимость перегрева стенки от теплового потока. В соответствии с этим замедление роста линии раздела (уменьшение количества активных центров парообразования), связанное с увеличением плотности пузырьков и их ростом, уменьшает термическое сопротивление, таким образом обуславливая постоянный перегрев стенки.

Шипы действуют не только как элементы, формирующие линию раздела. Они также предотвращают формирование (за счет действия капиллярных сил) сухой точки под пузырьком, улучшая теплоотдачу. Когда пузырек отделяется от поверхности нагрева, предполагается, что образование шейки и отрыв пузырька происходит во внешней части капиллярной структуры. Пар, остающийся в капилляре, образованном соседними шипами, является ядром для следующего пузырька, что в значительной степени уменьшает как время ожидания, так и энергетический барьер при формировании пузырька по сравнению с плоской поверхностью [1].

Рассматривая оптимальное расстояние между активными центрами парообразования, структура с шипами имеет некоторый саморегулирующийся потенциал. По сравнению с искусственными полостями, которые образуются на поверхности нагрева, структура с шипами дает возможность формирования пузырьков в любом месте поверхности, имеющей значительный перегрев. Из этой модели становится очевидным, что форма и плотность расположения шипов в значительной степени влияют на теплоотдачу. Обычно предполагается, что для чистых жидкостей при оптимальных условиях плотность пузырьков пара должна увеличиваться с давлением. Таким образом,

можно изготавливать по заказу структуру поверхности в зависимости от параметров системы, которая работает в соответствии с уравнением (1).

Эти элементы связаны друг с другом через жидкость, что не всегда обеспечивается при использовании полостей, сформированных на поверхности нагрева. Иными словами, эффективная поверхность должна быть выполнена не с полостями, а с шипами одинаковой формы, равномерно распределенными по поверхности. Элементы микроструктуры могут иметь любую форму. Поперечное сечение элементов должно быть одинаковым, но нет каких-либо обязательных рекомендаций по поводу их формы [1].

Существенным выводом из анализа рассмотренных идей и представлений является то, что на поверхности кипения должны использоваться не впадины, а идентичные выступы.

Однако технология изготовления и стоимость таких поверхностей чрезвычайно высокие, поэтому альтернативой таким идеальным поверхностям может рассматриваться капиллярно-пористая высокотеплопроводная поверхность при условиях (рис. 3):

1. Спеченную высокотеплопроводную капиллярно-пористую структуру необходимо рассматривать как поверхность, образованную шипами, состоящими из частиц одинакового размера.

2. Темп активации новых пузырьков пара должен быть пропорциональным изменению плотности теплового потока, чтобы исключить дополнительный перегрев стенки.

3. Подводимая к теплоотдающей поверхности теплота расходуется на образование новых активных центров, а не на интенсификацию теплоотдачи за счет уже существующих. Причем интенсивность образования новых центров парообразования должна быть пропорциональна изменению тепловой нагрузки.

4. Независимость изменения температуры от плотности теплового потока должна иметь место при небольших значениях q , так как в противном случае интенсивное образование новых центров парообразования при увеличении q приведет к значительному увеличению количества паровой фазы и в конечном итоге – к запариванию поверхности теплообмена и к резкому падению интенсивности теплоотдачи.

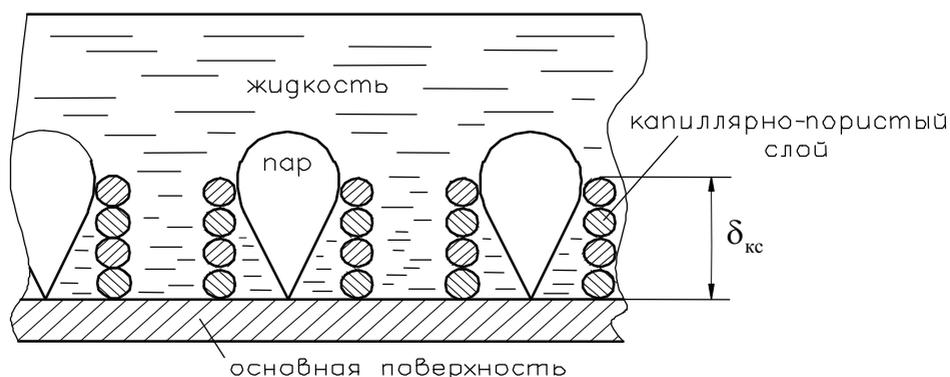


Рис. 3. Схема идеализированной капиллярно-пористой поверхности

Теплотехническую эффективность теплоотдающей поверхности можно оценивать по коэффициенту β_1 , равному отношению изменения перегрева стенки $\Delta\vartheta$ к изменению плотности теплового потока Δq , т. е.

$$\beta_1 = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta q}. \quad (2)$$

Коэффициент $\beta_1 = 0$ для идеальной поверхности, когда $\Delta\vartheta = 0$ и $\beta_1 \rightarrow \infty$ для крайне неэффективной поверхности, когда $\Delta q \rightarrow 0$ при $\Delta\vartheta$, принимающей достаточно большое значение.

В дифференциальной форме теплотехнический коэффициент эффективности теплоотдающей поверхности может быть записан:

$$\beta_1 = \frac{d\vartheta}{dq}.$$

Из уравнения Томсона для пузырька в жидкости с однородной температурой величина перегрева, прилегающего к поверхности слоя жидкости, будет

$$\vartheta = \frac{\sigma T_\infty}{r \rho_n R_*}. \quad (3)$$

Для идеальной поверхности $\Delta\vartheta = 0$ или $d\left(\frac{\sigma T_\infty}{r \rho_n R_*}\right) = 0$. Из этого выражения следует, что для идеальной поверхности при $T_\infty = T_H$

$$\frac{\sigma T_H}{r \rho_n R_*} = \text{const}, \quad (4)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; r – теплота парообразования, Дж/кг; ρ_n – плотность пара, кг/м³; R_* – отрывной радиус парового пузырька, м.

По степени отклонения выражения (4) от постоянного значения можно судить о степени теплотехнического совершенства теплоотдающей поверхности.

Экспериментальные исследования показывают [4]–[6], что высокотеплопроводная капиллярно-пористая поверхность, спеченная из частиц примерно одинакового размера, близка к идеальной поверхности при развитом пузырьковом кипении, что можно видеть на рис. 4 (образцы 1–9).

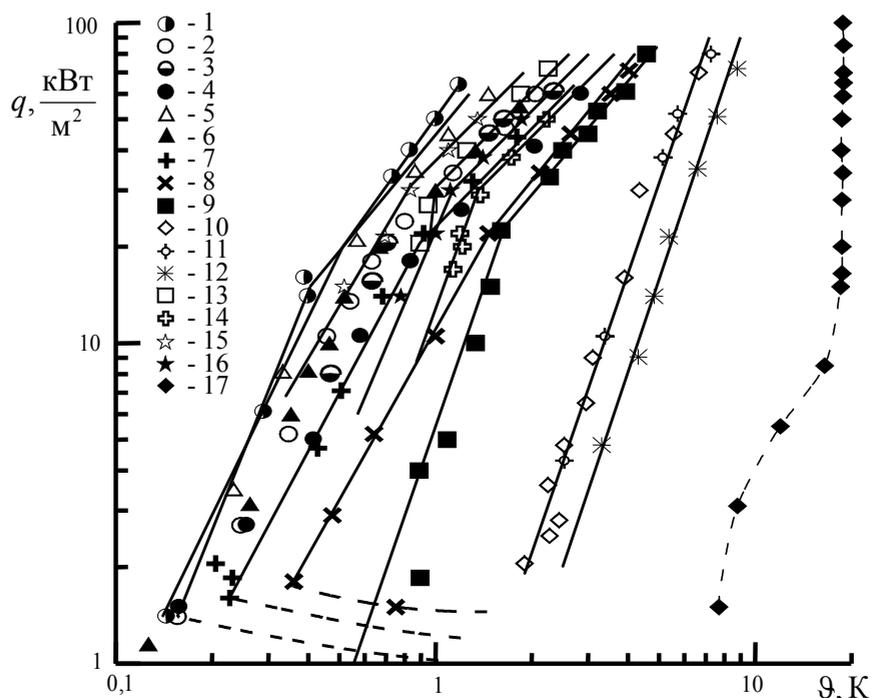


Рис. 4. Зависимость плотности теплового потока от перегрева теплоотдающей поверхности для различных типов и геометрических характеристик поверхности

Теплотехнический коэффициент эффективности различных поверхностей β_1 приведен в табл. 1.

Характеристики анализируемых образцов

Номер образца	Толщина покрытия $\delta_{\text{КС}}$, мм	Диаметр частиц $d_{\text{ч}}$, мкм	Средний размер частиц $\langle d_{\text{ч}} \rangle$, мкм	Средний гидравлический размер пор, \bar{d}_0 , мкм	Коэффициент эффективности поверхности β_1	Температурный напор начала развитого кипения	Температурный напор начала запаривания
1	0,2	40–63	51,5	18,37	0,018	0,16	0,42
2	0,3				0,030	0,16	0,60
3	0,4				0,032	0,20	0,80
4	0,5				0,043	0,20	0,90
5	0,3	63–100	81,5	24,48	0,009	0,16	0,33
6	0,4				0,030	0,16	0,67
7	0,5				0,039	0,23	1,0
8	0,6				0,052	0,36	1,60
9	0,8				0,063	0,70	1,75
10	0,4	100–160	130	35,4	0,063	2,0	–
11	0,5				0,063	2,0	–
12	Медная трубка с покрытием Turbo – В [7]	Пропилен			0,093	2,7	–

Окончание табл. 1

Номер образца	Толщина покрытия $\delta_{\text{КС}}$, мм	Диаметр частиц $d_{\text{ч}}$, мкм	Средний размер частиц $\langle d_{\text{ч}} \rangle$, мкм	Средний гидравлический размер пор, \bar{d}_0 , мкм	Коэффициент эффективности поверхности β_1	Температурный напор начала развитого кипения	Температурный напор начала запаривания
13	То же [7]	Пропан			0,017	0,48	1,0
14	Медная трубка с покрытием Thermoexcel–E [7]	Пропилен			0,034	0,61	1,40
15	То же [7]	Пропан			0,023	0,2	0,75
16	0,3–1,0 [8]	100–250	R12, R22	30,2–69,4	0,036	0,28	1,25
17	Идеальная поверхность [1] с толщиной структуры 0,01–0,10 мм	Фреон R11			0,0	7,8	–

Однако оценка эффективности поверхности будет не полной, если не оценить ее энергетическую эффективность, которая характеризуется величиной перегрева поверхности при развитом пузырьковом кипении. Энергетическую эффективность теплоотдающей поверхности можно оценить коэффициентом β_2 , равным отношению

температурного напора начала развитого кипения к соответствующему коэффициенту теплоотдачи.

Общий коэффициент эффективности поверхности β , учитывающий теплотехническую и энергетическую эффективности будет

$$\beta = \beta_1 \times \beta_2 = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta q} \times \frac{q}{\alpha} = \frac{(\Delta\vartheta) \cdot q^2}{(\Delta q) \cdot q} \quad (5)$$

Из рис. 5 видно, что наиболее эффективной при кипении будет капиллярно-пористая поверхность с толщиной слоя 0,2–0,4 мм, спеченная из частиц со средним размером 51,5 мкм и 81,5 мкм соответственно.

При организации процесса кипения на теплоотдающей поверхности большое значение имеет величина перегрева поверхности, при которой начинается развитое пузырьковое кипение и величина перегрева поверхности, при которой начинается ее «запаривание». Чем больше разность между этими двумя величинами, тем больше диапазон плотности теплового потока, в котором теплоотдающая поверхность будет работать с наибольшей интенсивностью и наоборот. Большое влияние на перегрев поверхности при кипении имеют ее геометрические параметры и, в частности, толщина капиллярно-пористого слоя. На рис. 6 приведена зависимость перегрева начала кипения и начала «запаривания» от толщины капиллярно-пористого слоя, которые показывают их линейную зависимость от $\delta_{\text{кк}}$. Из рис. 6 видно, что с увеличением размера частиц степень влияния толщины слоя на величину перегрева начала кипения и «запаривания» увеличивается (зависимость более «крутая»). Увеличение перегрева поверхности, при котором начинается развитый режим кипения, приводит к снижению энергетической эффективности поверхности, а увеличение перегрева начала «запаривания» приводит к расширению диапазона плотности теплового потока, в котором поверхность работает с наибольшей интенсивностью. Поэтому при выборе поверхности необходимо учитывать эти обстоятельства.

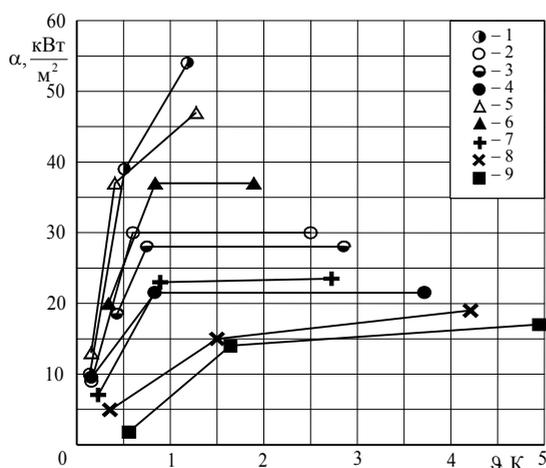


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи капиллярно-пористой поверхности от ее перегрева при кипении на ней пропана

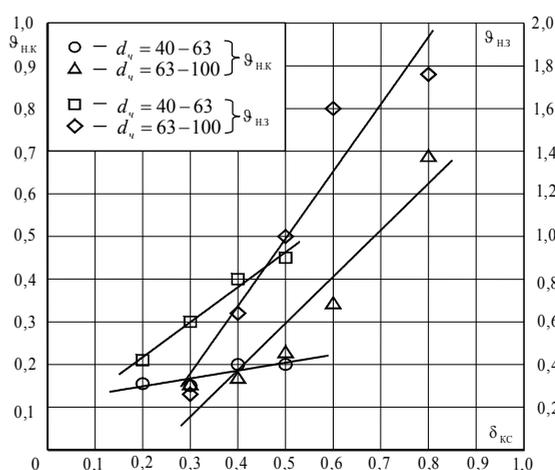


Рис. 6. Зависимость перегрева начала кипения ϑ_{HK} и начала «запаривания» ϑ_{HZ} от толщины капиллярно пористого слоя при кипении пропана

Значения коэффициентов β_1 , β_2 и общего коэффициента эффективности поверхности β приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения коэффициентов β_1, β_2 и β
для капиллярно-пористой поверхности при кипении на ней пропана**

Номер образца	Толщина покрытия $\delta_{\text{КС}}$, мм	Диаметр частиц d_p , мкм	Средний размер частиц $\langle d_p \rangle$, мкм	Средний гидравлический размер пор d_0 , мкм	Теплотехнический коэффициент эффективности поверхности β_1	Энергетический коэффициент эффективности поверхности β_2	Общий коэффициент эффективности поверхности β
1	0,2	40–63	51,5	18,37	0,018	0,016	0,00029
2	0,3				0,030	0,016	0,00048
3	0,4				0,032	0,011	0,00035
4	0,5				0,043	0,020	0,00086
5	0,3	63–100	81,5	24,48	0,009	0,013	0,00012
6	0,4				0,030	0,008	0,00024
7	0,5				0,039	0,033	0,00130
8	0,6				0,052	0,072	0,00374
9	0,8				0,063	0,230	0,01450

Выводы

В результате экспериментальных исследований и анализа процесса кипения жидкостей на капиллярно-пористых и неизотермических оребренных теплоотдающих поверхностях установлено, что поверхностью, наиболее близкой к идеальной, является капиллярно-пористая с толщиной слоя 0,2–0,4 мм, спеченная из частиц со средним размером 51,5 мкм и 81,5 мкм соответственно.

Впервые предложены коэффициенты, определяющие теплотехническую и энергетическую эффективности теплоотдающей поверхности, позволяющие оценить степень интенсивности теплообмена при развитом пузырьковом кипении.

Литература

1. Mitrovic J. How to create an efficient surface for nucleate boiling // International Journal of Thermal Sciences. 2006. № 45. P. 1–15.
2. Jakob M., Fritz W. Versuche uber den Verdampfungsvorgang, Forschungsarbeiten auf den Gebiet des Ingenieurwesens. 1931. № 2. P. 435–447.
3. Corty C., Foust A.S. Surface variables in nucleate boiling // Chem. Engrg. Progress Sym. 1955. Ser. 51 (17). P. 1–12.
4. Теплоотдача при кипении сжиженного пропана в капиллярно-пористых структурах / Л. Л. Васильев [и др.] // Вести НАН Беларуси. – 2002. – № 4. – С. 114–119.
5. Васильев, Л. Л. Обобщение экспериментальных данных по теплообмену при кипении пропана на медных спеченных капиллярно-пористых покрытиях / Л. Л. Васильев, А. В. Овсянник, М. Н. Новиков // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2001. – № 2. – С. 3–13.
6. Экспериментальное исследование влияния характеристик капиллярно-пористого покрытия на теплообмен при кипении пропана / Л. Л. Васильев [и др.] // Тр. XIII Шк.-семинара молодых ученых и специалистов. – Санкт-Петербург, 2001. – Т. 1. – С. 341–344.
7. Dongsoo Jung, Heungseok Lee, Dongsoo Bae, Jongchul Ha. Nucleate boiling heat transfer coefficients of flammable refrigerants on various enhanced tubes // International Journal of Refrigerators. 2005. № 28. P. 451–455.

8. Balakrishnan A.R. Boiling heat transfer over porous surfaces // Advances in sorption based thermal devices // Belarus – Indian Scientific Seminar. Minsk. November 2–3. 2004. P. 78–91.

Получено 08.01.2007 г.