

ЦЕПЛАФІЗІКА, ЦЕПЛАЭНЕРГЕТЫКА, ЦЕПЛАМАСААБМЕН

УДК 536.24

Л. Л. ВАСИЛЬЕВ, А. С. ЖУРАВЛЕВ, А. В. ОВСЯННИК,
М. Н. НОВИКОВ, Л. Л. ВАСИЛЬЕВ (мл.)

ТЕПЛООТДАЧА ПРИ КИПЕНИИ СЖИЖЕННОГО ПРОПАНА В КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ

Введение. Нанесение на теплообменную поверхность капиллярно-пористого покрытия позволяет в несколько раз повысить интенсивность теплоотдачи при кипении жидкости. По этой причине изучение теплообмена при фазовом переходе на пористых поверхностях не теряет актуальности на протяжении многих лет. В Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси исследовались испарение и кипение различных жидкостей на поверхностях с капиллярным покрытием. В настоящее время в лаборатории пористых сред осуществляется экспериментальное изучение теплообмена при кипении пропана — перспективного, однако малоисследованного теплоносителя.

Интерес к процессам теплообмена при кипении углеводородов связан с потребностями химической промышленности, холодильной, электронной и других отраслей техники. Согласно Монреальскому протоколу, подписанному в 1993 г. и ратифицированному 150 странами, предусматривается замена озоноразрушающих фреонов альтернативными рабочими веществами, в качестве которых рассматриваются углеводороды (однокомпонентные либо смеси в различных соотношениях). Кипение пропана и других углеводородных жидкостей в межтрубном пространстве теплообменников-испарителей используется для получения холода в установках сжижения природного газа. Пропан является диэлектрической жидкостью, что позволяет использовать этот углеводород в теплообменниках погружного типа для охлаждения силовых тиристоров, диодов, микросхем и других компонентов электронного оборудования.

Для разработки испарительных теплообменных аппаратов необходимо располагать зависимостями характеристик теплообмена в разных внешних условиях от свойств рабочих жидкостей, параметров пористой структуры, подведенной тепловой нагрузки и т. д. Создание надежной универсальной аналитической модели теплообмена при кипении в пористом теле едва ли возможно в связи с влиянием на него большого количества факторов. В связи с этим возрастает роль экспериментального изучения данного процесса.

Эксперимент. Исследования выполнялись на стенде [1, 2], в состав которого входят герметичная рабочая камера, помещенная в теплоизолированный терморегулируемый бокс, нагреватель рабочего участка со стабилизированным источником питания, системы вакуумирования и заправки камеры исследуемым теплоносителем, поддержания требуемого температурного режима, измерительный комплекс.

Эксперименты выполнены в диапазоне температур насыщения $T_n = -10 \div 40$ °С, что соответствует давлениям насыщения $p_n = 3,45\text{—}13,8$ бар ($p^* = p/p_{кр} = 0,081\text{—}0,323$; критическое давление пропана $p_{кр} = 42,64$ бар), условия насыщения поддерживались регулированием расхода охлаждающей жидкости через конденсатор. Во избежание теплообмена между рабочей камерой и окружающей средой температура внутри терморегулируемого бокса поддерживалась равной T_n . Кипение осуществлялось на поверхностях труб (наружный диаметр 20 мм, длина рабочего участка 100 мм) из нержавеющей стали 1X18H10T со стальным покрытием, нанесенным методом электродугового напыления, медных труб с покрытием из спеченного порошка того же материала и в пористых структурах из керамики на базе оксида алюминия Al_2O_3 , изготовленных методом гидротермального синтеза.

Уровень исследуемой жидкости над верхней образующей образца составлял примерно 70 мм. Температура измерялась в установившемся режиме теплообмена медь-константановыми термопарами, измерительная система выполняла циклический опрос термопар. Управление про-

цессом измерения и обработка первичных данных осуществлялись с помощью персональной ЭВМ по специальной программе. Для проверки достоверности измерений была проведена серия экспериментов на полированных образцах без покрытия (шероховатость поверхности $R_z = 4,3$ мкм), результаты сопоставлены с опубликованными данными других авторов [3]. Удовлетворительная корреляция свидетельствует о надежности выбранной методики исследования.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Эксперименты по кипению на поверхностях со спеченным и напыленным покрытием проведены при тепловых нагрузках $q = 0,1-100$ кВт/м². Параметры пористых покрытий, спеченных из медного порошка, приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Параметры пористых покрытий, спеченных из медного порошка

№ образца	Толщина покрытия, δ , мм	Диаметр частиц, d_1 , мкм	Средний размер частиц, $\langle d_1 \rangle$, мкм	Средний гидравлический размер пор, \bar{d}_0 , мкм	Капиллярная проницаемость $k \cdot 10^{11}$, м ²
1	0,2	40—63	51,5	18,37	0,48
2	0,3				
3	0,4				
4	0,5				
5	0,3	63—100	81,5	24,48	0,802
6	0,4				
7	0,4				
8	0,5				
		100—160	130	35,4	1,553
		160—200	180	48,8	2,758

В исследованном диапазоне плотностей теплового потока наблюдались три режима теплообмена: свободная конвекция, неразвитое кипение (переходный режим) и развитое кипение, что нашло отражение в характере кривых кипения (изменение показателя степени n в зависимости $\alpha = f(q)^n$ при смене режимов и соответственно излом кривых (рис. 1). Границы существования указанных режимов определяются характеристиками поверхности теплообмена и условиями проведения эксперимента (давление насыщения, направление изменения теплового потока). При увеличении и снижении тепловой нагрузки имел место гистерезис кривой кипения: с изменением теплового потока в сторону уменьшения область режима кипения распространялась на более низкие значения q . Вид гистерезисной петли зависел от параметров пористого покрытия (толщина слоя, пористость) и величины давления насыщения. На гладкой полированной трубе при возрастании тепловой нагрузки режим свободной конвекции распространялся на широкую область плотностей тепловых потоков и температурных напоров (до $q = 4-5$ кВт/м² и $\Delta T = 6$ К), в то время как при снижении тепловой нагрузки отдельные паровые пузыри наблюдались при $q < 0,3$ кВт/м². Проведенные эксперименты показали, что применение металлических пористых покрытий позволяет значительно повысить интенсивность теплообмена при кипении пропана на горизонтальных трубах с пористым покрытием по сравнению с гладкими образцами.

Для моделирования процессов, происходящих в испарителе контурной тепловой трубы, выполнены экспериментальные исследования образцов с каналами для выхода пара (рис. 2). Пористая структура, заключенная между наружной ($\varnothing 40$ мм) и внутренней ($\varnothing 16$ мм) трубчатыми оболочками, изготавливалась из керамики на базе оксида алюминия Al_2O_3 методом гидротермального синтеза [4], в процессе которого формируется бипористый материал, состоящий из соединенных между собой частиц алюминия, покрытых слоем $\gamma-Al_2O_3$. Формирование структуры материала при такой технологии осуществляется за счет образования раствора трехвалентных ионов алюминия, окруженных гидратными оболочками, с одновременной гетерогенной реакцией взаимодействия металла с водой и водными растворами и последующей кристаллизации гидроксидов. В результате образуется макропористая структура за счет формирования фазовых (кристаллизационных) контактов между частицами Al_2O_3 с образованием механически прочного пористого тела (блока). Материал обладает высоким электрическим сопротивлением, его теплопроводность лишь на 12—15% ниже, чем у алюминия. Такое сочетание свойств позволяет считать эту керамику перспективным материалом для погружных охладителей элементов электроники. Данная пористая структура может применяться в прямом контакте с компонентом электроники для интенсификации теплообмена при кипении пропана и других жидких углеводородов. Характеристики исследованных образцов представлены в табл. 2.

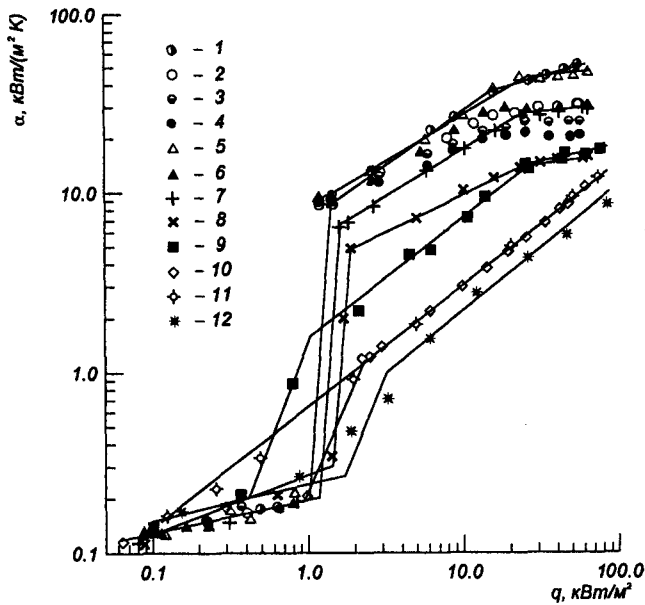


Рис. 1. Интенсивность теплообмена при кипении пропана при $T_n = 20\text{ }^\circ\text{C}$: 1 — образец № 1, 2 — № 2, 3 — № 3, 4 — № 4, 5 — № 5, 6 — № 6, 7 — № 7, 8 — № 8, 9 — образец из нержавеющей стали с напыленным покрытием ($\epsilon = 13\%$, $\delta = 0,3\text{ мм}$), 10 — медная труба без покрытия, 11 — медная труба без покрытия [3], 12 — полированная труба из нержавеющей стали

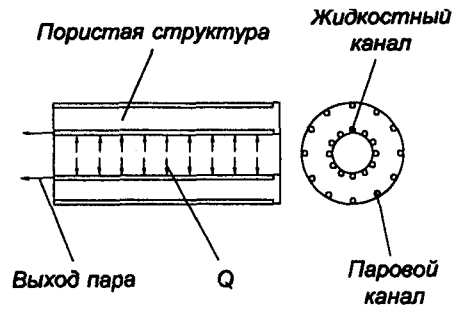


Рис. 2. Пористый испаритель теплообменника с паровыми каналами

Каналы для транспорта жидкой фазы в образце № 22 выполнены соосно с паровыми каналами и расположены равномерно по периферии образца, вблизи внешней оболочки. В исследованных образцах размер крупных пор был не менее 0,15–0,25 мм, пористость примерно 50%. Образец помещался в объем пропана, подвод жидкости в зону парообразования осуществлялся капиллярными силами. Тепловой поток подводился от нагревателя, расположенного внутри коаксиального цилиндра. Таким образом испаритель функционировал в режиме перевернутого мениска

(жидкость испарялась из нагретой за счет теплопроводности пористой структуры в паровой канал). С помощью медь-константановых термопар измерялась температура пара в канале пористого тела в точках, имеющих разные координаты по глубине и длине структуры, а также на внутренней и наружной поверхностях образца.

При низких тепловых нагрузках тепло отводилось конвекцией, затем наблюдался выход из каналов отдельных редких пузырьков пара. По мере увеличения плотности теплового потока частота образования пузырей возрастала, далее они группировались в цепочки. При достижении некоторой величины q , различной для каждого из образцов, пропускная способность каналов оказывалась недостаточной для эффективного отвода всего образующегося пара, в результате коэффициенты теплоотдачи, достигнув максимума, начинали снижаться. При смене направления изменения теплового потока наблюдался гистерезис кривой кипения.

На рис. 3 представлены результаты исследования образцов из керамического материала Al_2O_3 с паровыми каналами при разных температурах и соответственно давлениях насыщения. В начале кипения влияние давления было существенным, однако с повышением тепловой нагрузки устанавливалась автомодельность процесса относительно давления, кривые кипения практически сливаются. Из экспериментальных данных видно, что за счет снижения гидравлического сопротивления выходящему пару путем увеличения количества паровых каналов и их проходного сечения можно повысить отводимые тепловые потоки. Для оптимизации такой структуры необходимы дальнейшие исследования, однако полученные результаты позволяют сделать вывод, что пористые структуры, выполненные из металлокерамического материала Al_2O_3 методом гидротермального синтеза, могут рассматриваться как альтернатива другим видам пористых структур.

Обобщение экспериментальных данных. Создание универсальной математической модели для расчетного определения интенсивности теплообмена при кипении различных жидкостей

Т а б л и ц а 2. Характеристики образцов из металлокерамики

№ образца	Размер частиц, мм		Паровые каналы		Каналы для транспорта жидкой фазы	
	Al_2O_3	Al	Количество	Диаметр, мм	Количество	Диаметр, мм
21	0,63 + 1	~ 0,07	4	2	Нет	—
22	0,63 + 1	~ 0,07	8	3	8	3

на поверхностях с пористым покрытием затруднено в связи со сложностью и многофакторностью процессов парообразования в пористых покрытиях, вероятностным либо даже случайным характером свойств капиллярных структур. В опубликованных по данной проблеме работах для вычисления коэффициентов теплоотдачи предлагаются, как правило, эмпирические соотношения, удовлетворительно коррелирующие лишь с экспериментальными данными авторов.

Для решения задачи применительно к различным условиям процессов (род кипящей жидкости, параметры пористой структуры, тепловая нагрузка, давление насыщения), протекающих на однотипных поверхностях (в данном случае на поверхностях со спеченным покрытием), целесообразно воспользоваться обобщенной системой координат, т. е. обобщить результаты экспериментов с помощью критериев подобия.

Механизмы кипения на гладкой и пористой поверхностях различны, в связи с этим кривые, характеризующие интенсивность теплообмена в зависимости от плотности теплового потока, имеют разный наклон, отличается также их положение в системе координат. Однако влияние на теплообмен теплофизических свойств жидкости, являющихся функцией ее температуры (давления), аналогично для обоих типов поверхности, следовательно, интенсивность теплообмена при наличии пористого покрытия можно попытаться обобщить с помощью зависимости вида

$$Nu_{пор} = B Nu_{гл} \{A[\varepsilon, \delta, f(d_p)]\}^m, \quad (1)$$

где коэффициент $A[\varepsilon, \delta, f(d_p)]$ учитывает характеристики пористого покрытия.

В. И. Толубинским [5] выведено критериальное уравнение, с достаточной точностью ($\pm 25\%$) обобщающее опытные данные по теплообмену при пузырьковом кипении разных жидкостей на гладкой поверхности:

$$Nu = CK m_1 Pr^{m_2},$$

где коэффициент K — специфический для теплообмена кипения критерий подобия, учитывающий интенсивность парообразования.

На основании экспериментальных данных В. И. Толубинским получены конкретные значения коэффициента C и показателей степени m_1 и m_2 :

$$Nu = 75K^{0,7} Pr^{-0,2}, \quad (2)$$

или

$$\frac{\alpha}{\lambda_{ж}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}} = 75 \left(\frac{q}{r\rho_{п}w''} \right)^{0,7} \left(\frac{a_{ж}}{v_{ж}} \right)^{0,2},$$

Т а б л и ц а 3. Параметры исследованных пористых покрытий и условия эксперимента

№ п.п.	Диаметр частиц $d_ч$, мкм	Толщина покрытия δ , мм	Температура насыщения $T_{н}$, °C	№ п.п.	Диаметр частиц $d_ч$, мкм	Толщина покрытия δ , мм	Температура насыщения $T_{н}$, °C
1	40—63	0,2	20	21	63—100	0,4	10
2			30	22			0
3			10				
4			0				
5	40—63	0,3	30	23	63—100	0,5	30
6			20	24			20
7			10	25			10
8			0	26			0
9	40—63	0,4	20	27	63—100	0,6	20
10			10	28			10
11			0				
12	40—63	0,5	30	29	100—160	0,4	30
13			20	30			20
14			10	31			10
15			0	32			0
16	63—100	0,3	30	33	100—160	0,5	30
17			20	34			20
18			10	35			10
19			0	36			0
20	63—100	0,4	20	37	160200	0,5	20

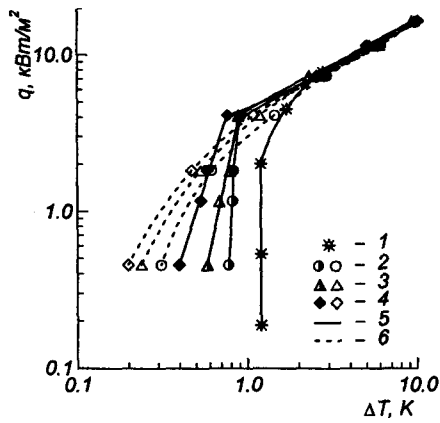


Рис. 3. Результаты исследования образцов из металлокерамического пористого материала Al_2O_3 с паровыми каналами: 1 — образец № 21, $T_n = 30$ °С, 2, 3, 4 — № 22, $T_n = 0, 16$ и 30 °С соответственно, 5 — при увеличении теплового потока, 6 — при уменьшении теплового потока

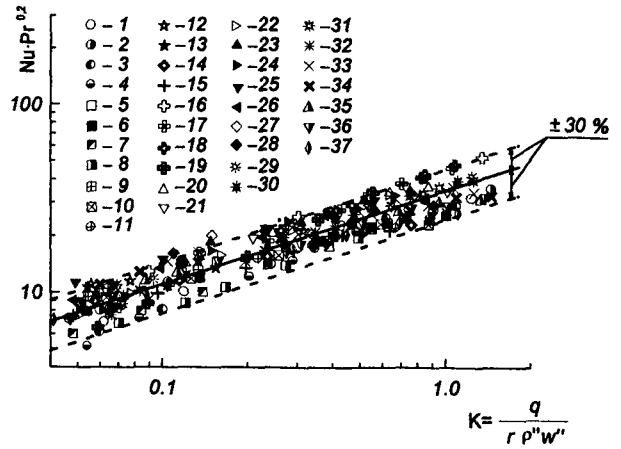


Рис. 4. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при кипении пропана на поверхности со спеченной пористой структурой с помощью зависимости (4), обозначения — в табл. 3

где a — коэффициент температуропроводности, m^2/c ; w'' — средняя скорость роста паровых пузырей, m/c ; ν — кинематический коэффициент вязкости, m^2/c .

При обобщении использованы внутренние характеристики процесса, однозначно определяющие интенсивность кипения.

Интенсивность теплоотдачи при кипении на пористой поверхности определяется толщиной и пористостью покрытия, размером пор и распределением пор по размерам. Влияние параметров пористого покрытия на интенсивность теплоотдачи можно свести к зависимости коэффициентов теплообмена от среднего гидравлического размера пор \bar{d}_0 :

$$\bar{d}_0 = \frac{4\sigma \cos \Theta}{p_k},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, H/m ; Θ — угол смачивания, град; p_k — капиллярное давление (определяется по методике, аналогичной использованной в [6, 7]).

Геометрические характеристики пористого покрытия в зависимости (1) могут быть учтены с помощью безразмерного коэффициента

$$K_{\text{пор}} = \frac{\delta}{\bar{d}_0}.$$

Тогда из уравнения (1) с учетом (2) получаем

$$Nu_{\text{пор}} = BK_{\text{пор}}^m K^{0,7} Pr^{-0,2} \quad (3)$$

или в развернутом виде

$$\frac{\alpha \bar{d}_0}{\lambda_{\text{ж}}} = 35 \left(\frac{\delta}{1,51 \bar{d}_0^{1,23}} \right)^{-0,5} \left(\frac{q}{r \rho_{\text{п}} w''} \right)^{0,5} \left(\frac{a_{\text{ж}}}{\nu_{\text{ж}}} \right)^{0,2} \quad (4)$$

Значения коэффициента $B = 35$ и показателя степени $m = -0,5$ определены экспериментально.

Обобщающая кривая экспериментальных данных по теплообмену при кипении пропана на поверхностях с пористым покрытием в соответствии с соотношением (4) представлена на рис. 4. При вычислении критериев подобия Nu , Pr и коэффициента $K_{\text{пор}}$ значения величин, характеризующих теплофизические свойства пропана при температурах насыщения, соответствующих условиям эксперимента, взяты из справочников [8, 9].

Видно, что опытные данные удовлетворительно обобщаются в широком интервале параметров пористого слоя, давлений ($p_n = 0,48-1,08$ МПа) и тепловых нагрузок ($q = 10^3-6,4 \cdot 10^4$ Вт/м²), соотношение (4) позволяет вычислять коэффициенты теплоотдачи α с погрешностью $\pm 30\%$. Предложенная зависимость может быть использована в инженерных расчетах характеристик испарительных теплообменников.

Заключение. Полученные теплообменные характеристики при кипении сжиженного пропана на поверхностях с пористым покрытием позволяют сделать вывод о перспективности применения этого углеводорода в качестве рабочего вещества. Применение напыленных пористых покрытий как элементов интенсификации теплообмена при кипении пропана позволяет значительно интенсифицировать теплообмен в широком диапазоне тепловых нагрузок и обеспечивает возможность существенного уменьшения габаритов и массы теплообменного оборудования, снижения уровня энергопотребления. Достоинствами этого вида покрытия являются его высокие механические свойства (прочность, хорошая связь с подложкой), технологичность, позволяющая стабильно воспроизводить характеристики пористой структуры. Покрытия из спеченного порошка менее технологичны, однако обладают высокими теплообменными характеристиками. При кипении пропана на трубах из нержавеющей стали с напыленным пористым покрытием интенсивность теплообмена в 2,5—3,5 раза (в зависимости от условий эксперимента) превышала аналогичные характеристики, полученные на гладком образце. Капиллярные покрытия из спеченного медного порошка, наносимые на поверхность из того же материала, позволяет увеличить коэффициенты теплоотдачи в 5—8 раз по сравнению с гладким образцом.

Пористые структуры, выполненные из металлокерамического материала Al_2O_3 методом гидротермального синтеза, могут рассматриваться как альтернатива другим видам пористых покрытий.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании испарительных теплообменных элементов в холодильной технике, химических производствах, установках по регазификации пропана и сжижению природных газов, устройствах погружного типа для охлаждения электронных элементов.

Summary

Heat transfer process at propane pool boiling on single horizontal tubes with porous coating and in metal ceramic structures of heat exchanger evaporators with channels for vapour evacuation was investigated. Porous coatings were applied by electric arc spraying (stainless steel) or sintering of metal powder particles (copper), structures of evaporator with steam exhaust channels were produced by hydrothermal synthesis technology of aluminium oxide ceramic.

Experiments were carried out at the heat flux ranges from 10^2 to 10^5 W/m². The influence of porous coating parameters on heat transfer intensity was studied. The results of research show that an application of metal porous sprayed or sintered copper powder covering allows one to increase significantly the heat transfer intensity for propane boiling as compared with a smooth surface.

Ceramic oxide aluminium Al_2O_3 porous structures made by hydrothermal synthesis method can be considered as an alternative to another kinds of wicks.

The results obtained can be applied in the chemical industry, refrigerator engineering, electronics, etc.

Литература

1. Васильев Л. Л., Хроленок В. В., Журавлев А. С. // Тепло- и массоперенос-97 (Сб. науч. тр.). Мн.: АНК «ИТМО им. А. В. Лыкова» НАН Беларуси. 1997. С. 9—14.
2. Новиков М. Н. // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2000. № 2. С. 58—66.
3. Gorenflo D., Sokol P., Caplanis S. // International Journal of Refrigeration. 1990. N 13. P. 286—292.
4. Азаров С. М., Романенков В. Е., Смирнова Т. А. // Порошковая металлургия (Сб. науч. тр.) Мн., 1988. Вып. 12. С. 62—65.
5. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. Киев, 1980.
6. Cosgrove J. H., Ferrel J. K., Carnesale A. // International Journal of Nuclear Energy. 1967. Vol. 21, N 7. P. 547—558.
7. Tien C. L., Sun K. H. // International Journal of Heat and Mass transfer. 1971. Vol. 14, N 11. P. 1853—1855.
8. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972
9. Справочник по теплообменникам / Перевод с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др. М., 1987. Т. 2.