

Авторефер.  
Л 33

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ им. М.В. ДОМОНOSов

На правах рукописи

ЛЕ ВАН ЧАНГ

ДЛУ 536.24.02  
Переучет 1984

ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ В КАНАЛЬНЫХ  
КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУРАХ

Специальность 01.04.14 - теплофизика

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1983

Работа выполнена на кафедре теплохладотехники  
Одесского технологического института пищевой промышленности  
им. М.В. Ломоносова

- Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор Чайковский В.Ф.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Семена М.Г.;  
кандидат технических наук,  
доцент Бараненко В.И.
- Ведущее предприятие - ВНПО "Пищепромавтоматика"

Защита состоится "3" декабря 1983 года в 10<sup>00</sup> часов  
на заседании специализированного совета К 068.35.04 в Одесском  
технологическом институте пищевой промышленности имени М.В. Ломо-  
носова по адресу: 270039, г.Одесса, ул. Свердлова, 112.

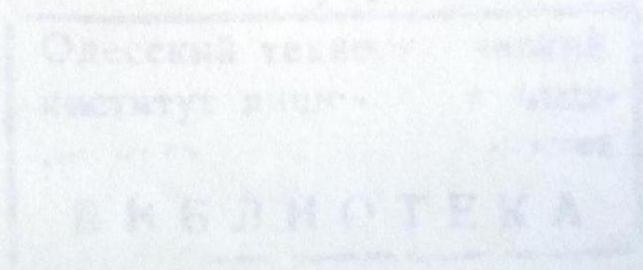
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского  
технологического института пищевой промышленности имени  
М.В. Ломоносова.

3 декабря 1983 года

V OPHY61

Элькин Г.И.

42



ОНАХТ 26.06.12  
Теплообмен при кипен



v014461

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Эффективным способом интенсификации теплообмена в современной теплонагруженной аппаратуре является использование на поверхности нагрева капиллярнопористых покрытий. Пористые структуры интенсифицируют процесс теплообмена в широком диапазоне тепловых потоков, особенно при пониженных давлениях, способствуют передаче высоких тепловых потоков в термодинамически выгодных условиях. Особое место среди пористых структур занимают каналные капиллярные структуры, выполненные в виде организованного ряда капиллярных каналов прямоугольного, треугольного либо трапецеидального профиля. Процессы парообразования в открытых капиллярных каналах характеризуются определяющим вкладом поверхностных сил и имеют свои закономерности, которые полностью не изучены. Поэтому нет общепринятых методов по выбору рациональных параметров такой теплообменной поверхности в зависимости от режимов работы испарителя и актуальна постановка систематических экспериментальных исследований в этом направлении.

Цель работы: установить взаимосвязь между интенсивностью теплоотдачи при парообразовании в каналных капиллярных структурах, уровнем теплового потока, формой и размерами канавок, теплофизическими свойствами металла поверхности нагрева и теплоносителя.

Научную новизну представляют следующие результаты:

- впервые полученные систематические экспериментальные данные по теплообмену при парообразовании в каналных капиллярных структурах в широком диапазоне режимных, теплофизических и геометрических параметров характерных для низкотемпературных тепловых труб и тонкопленочных испарителей;

- результаты визуальных исследований структуры рабочего по-

тока, позволившие экспериментально констатировать существование двух режимов парообразования в канавках (испарительного и кипящего), выявить различный механизм теплопереноса в этих режимах, установить их границы и разработать на основе анализа этих режимов модели теплообмена;

- экспериментальные данные по влиянию давления на величину предельного теплового потока;

- экспериментальное подтверждение моделей теплообмена и соотношения для расчета характеристик теплообмена при испарении и при кипении в канавках.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- механизм процесса теплообмена при парообразовании в канальных капиллярных структурах в области малых тепловых потоков подобен механизму теплопереноса при испарении в капиллярнопористых структурах (например, сеточных), а в области высоких тепловых потоков - механизму пузырькового кипения в свободном объеме. Проявление и сосуществование этих режимов определяется условиями тепловой устойчивости.

Практическое значение полученных в диссертационной работе результатов состоит в том, что отработана методика экспериментальных исследований процессов парообразования в канальных капиллярных структурах, установлена степень влияния режимных, геометрических и теплофизических параметров на интенсивность теплообмена, рекомендованы зависимости для расчета теплообмена при проектировании низкотемпературных тепловых труб и тонкопленочных испарителей с канальной капиллярной поверхностью нагрева.

Апробация работы. Основное содержание работы докладывалось на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-препода-

вательского состава и научных сотрудников ОТИПШ им. М.В. Ломоносова, Одесса, 1981-1983 гг.; на IV Всесоюзной конференции "Разработка, изготовление и исследование тепловых труб", Киев, 1982 г.; на III Всесоюзной научно-технической конференции по холодильному машиностроению, Одесса, 1982 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликована одна работа, одна находится в печати.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов и приложения. Работа изложена на 98 страницах машинописного текста, рисунков 40, таблиц 7, приложение на 13 страницах.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основе критического обзора научно-технической литературы показано, что в мировой практике имеются многочисленные примеры успешного применения тепловых труб с канальными капиллярными структурами, обобщиваются эффективность и перспективность испарителей с канавками. Однако, анализ показывает несогласованность известных результатов по процессам теплообмена при парообразовании в канавках. Исследования теплообмена в капиллярных канавках либо не подтверждены экспериментально, либо носят частный характер. Ход зависимости  $q = f(\Delta T)$  различных авторов часто не совпадает ни количественно, ни качественно. Непосредственные публикации конкретных экспериментальных данных по теплообмену в канавках крайне ограничены. На основе проведенного анализа сформулированы задачи экспериментальных исследований.

Во второй главе приведено описание экспериментальной установки и методики обработки опытных данных.

Экспериментальная установка основана на принципе концентрирования энергии с помощью теплового клина (рис. I). Исследования проводились на рабочих участках I размером 30x30 мм, которые уста-

навливались на торце участка тепловой стабилизации 2 концентратора 3, паровая камера 4 (диаметр 102 мм, высота 80 мм) снабжена иллюминаторами 5, штуцерами для подключения трубопровода 6 из конденсатора 7, имеет гермовводы термопар и нагревателей. Камера 4 отделена герметичной диафрагмой 8 (толщиной 0,2 мм) от стакана 9, в котором размещены системы основного I0 и экранирующего II обогревов. К конденсатору 7 подключен вакуумнасос. Предусмотрены системы термостатирования теплоносителя, паровой камеры и охлаждающей конденсатор 7 воды. Измерения температур производилось медь-константановыми термопарами I2 в комплекте с цифровым вольтметром Щ 68002 и цифропечатающим устройством Щ 68000К. Подпитка рабочих поверхностей теплоносителем осуществлялась с помощью фитиля. Величина теплового потока определялась по градиенту температур по оси участка стабилизации.

Приведены тепловые расчеты основных узлов стенда. Выполнена оценка погрешностей измерений. По результатам измерений рассчитывался коэффициент теплоотдачи процесса парообразования и эквивалентный коэффициент теплопроводности смоченной капиллярной канавки:

$$\lambda_{\text{э}} = \frac{q}{T_{\text{с}} - T_{\text{н}}} \cdot h \quad (\text{I})$$

В третьей главе анализируются результаты экспериментальных исследований теплообмена при парообразовании в канавках. Технические характеристики исследованных поверхностей приведены в табл. I.

Параметры канавок определялись с помощью отсчетного микроскопа МПБ-2 с погрешностью не более 10%. Условия проведения эксперимента приведены в табл. 2.

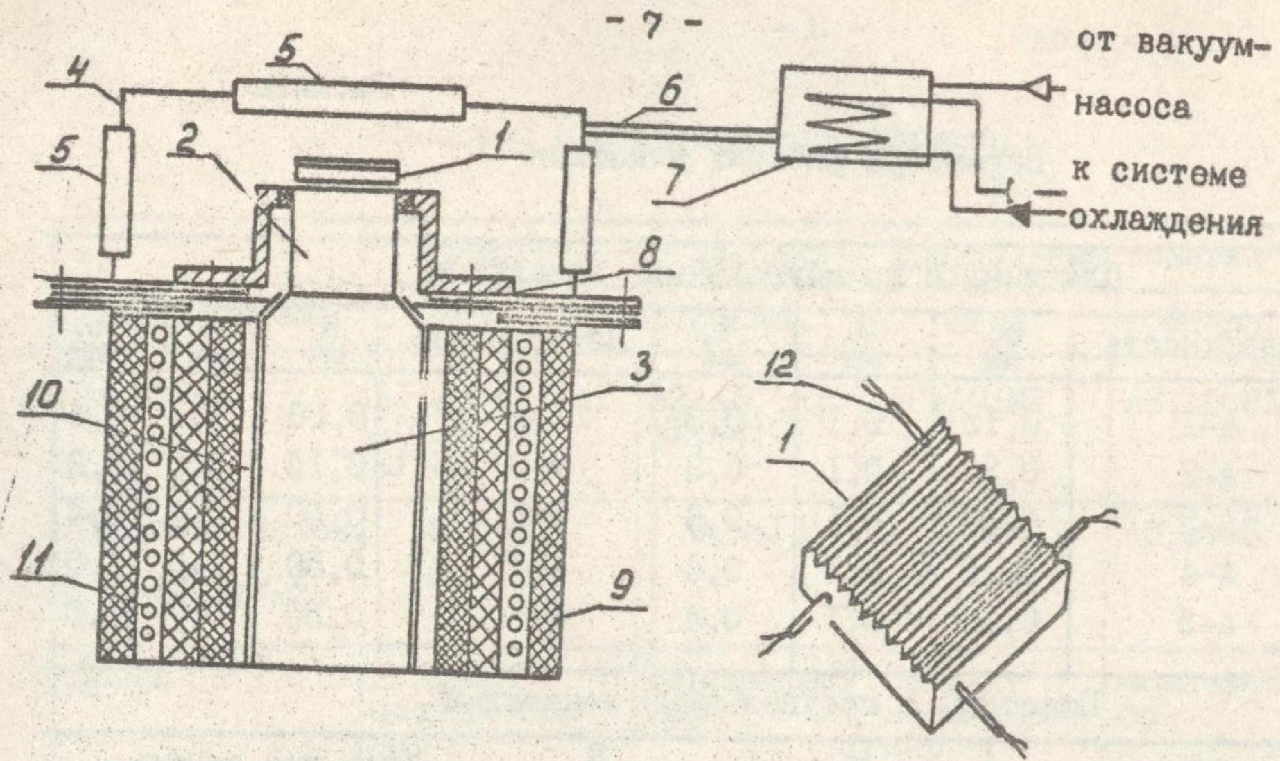


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

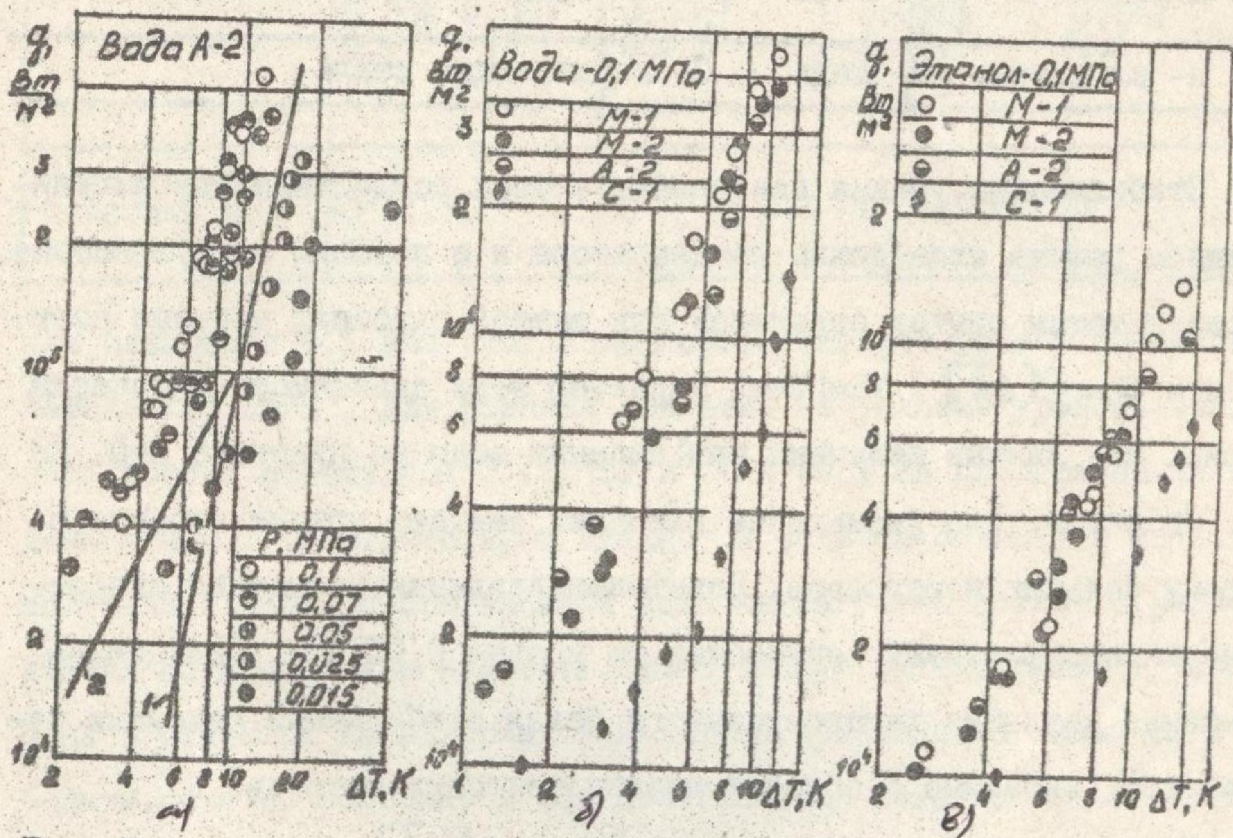


Рис. 2. Влияние давления (а) и теплофизических свойств поверхности нагрева (б, в) на интенсивность теплообмена при кипении в канавках.

Таблица I

Параметры рабочих участков

Пластины с прямоугольными канавками							
Поверхность	h, мм	S, мм	b, мм	Поверхность	h, мм	S, мм	b, мм
A-1	0,15	0,1	0,3	A-6	0,50	0,1	0,4
A-2	0,30	0,1	0,3	A-7	0,15	0,1	0,2
A-3	0,50	0,1	0,3	M-1	0,50	0,2	0,4
A-4	0,15	0,1	0,4	M-2	0,50	0,6	1,0
A-5	0,30	0,1	0,4	C-1	0,50	0,7	1,0

Пластины с треугольными канавками			
Поверхность	h, мм	S, мм	Угол при вершине
A-8	0,5	0,45	48° 30'
A-9	0,5	0,58	60°
M-3	0,8	0,65	44° 12'

h- алюминий, M- медь, C- нержавеющая сталь

Стабилизация уровня давления в опытах осуществлялась регулированием режима охлаждения конденсатора и с помощью вакуум-насоса. По результатам опытов строились для каждой пластины частные зависимости  $q = f(\Delta T)$ . Типичный характер этих зависимостей показан на рис. 2а. Данные получены при кипении воды на пластине А-5. Из рис. 2а видно, что уменьшение давления смещает кривые кипения в сторону больших перегревов. Повышение давления насыщения существенно интенсифицирует теплообмен до уровня 0,05 мПа. Дальнейшее повышение давления характеризуется более стабильными режимами теплообмена, особенно в области низких тепловых потоков.

На всех пластинах кривые кипения  $q = f(\Delta T)$  имели характерный излом, более ярко выраженный в опытах с водой и плавный, охватывающий целую область, при кипении этанола. На рис. 2а для давле-

Таблица 2

Условия проведения эксперимента

Теплоноситель	Прямоугольные канавки		Треугольные канавки	
	Вода	Этанол	Вода	Этанол
Пластины	A1; A2; A3; A4; A5; A6; A7; M1; M2; C1	A2; A5; A6; M1; M2; C1	A8; A9; M3	A8; A9; M3
Тепловой поток, $q \cdot 10^{-4}$ Вт/м <sup>2</sup>	8,0±68	0,6±15	1,5±40	0,6±15
Среда	Воздух, насыщенный пар	Насыщенный пар	Воздух, насыщенный пар	Насыщенный пар
Уровень жидкости, мм	+500...0... - 30	0...-30	+500...0... - 30	0...-30
Давление, мПа	0,015; 0,025; 0,05; 0,07; 0,1	0,025; 0,05; 0,1	0,015; 0,025; 0,05; 0,07; 0,1	0,025; 0,05; 0,1
Ориентация пластины к горизонту	0° ... 90°	0°	0° ... 90°	0

ния насыщения 0,1 мПа этот излом соответствует уровню теплового потока  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. Для этанола для этих же условий уровень теплового потока составляет  $3 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. На рис. 2а для сравнения проведены линия 1 (соответствует кипению в большом объеме) и линия 2 - полученная в ОТИХП при кипении воды на латунных сетках с размером ячейки 80 мкм. Можно отметить существенную интенсификацию теплообмена в открытых капиллярных каналах по сравнению с кипением в свободном объеме, особенно в области тепловых потоков до  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

Характерно, что даже на канавках большей ширины, чем ячейки сетки (на пластине А-5  $\delta = 100$  мкм), интенсивность теплообмена выше (рис. 2а). Однако, характер и закономерности процессов парообразования в канавках и на сетках, вероятно, подобны, поскольку углы наклона кривых кипения  $q = f(\Delta T)$  одинаковы, а точки изгиба по уровням тепловых потоков совпадают.

Опыты, проведенные при кипении воды на пластинах А-1, А-2, А-3, у которых одинаковые ширина канавки и шаг между канавками и разные глубины канавок, показали, что практического влияния на интенсивность теплообмена глубина канавки не оказывает. По данным, полученным при кипении воды на пластинах А-1, А-4, А-7, имеющих одинаковую ширину и глубину канавок и разный шаг между прямоугольными канавками, анализировалось влияние шага либо пористости. Оказалось, что с увеличением пористости ( $\epsilon = s/b$ ) процесс теплообмена интенсифицируется.

Для треугольных канавок пористость одинакова ( $\epsilon = 0,5$ ). Угол при вершине канавок практического влияния на интенсивность теплообмена при парообразовании не оказывал.

Опыты показывают, что коэффициент теплопроводности скелета, ребра канавки оказывает весьма существенное влияние на теплообмен при парообразовании на профилированных поверхностях. Как видно из рис. 2б для медных и алюминиевых поверхностей теплообмена, имеющих канавки с подобными геометрическими параметрами, кривые кипения расположены рядом. Для поверхности из нержавеющей стали, имеющей значительно меньший коэффициент теплопроводности, кривая кипения существенно смещена в сторону больших перегревов. Причем, влияние теплопроводности металла значительно при кипении и воды, и этанола.

Существенное влияние на интенсивность теплообмена оказывают теплофизические свойства теплоносителя. Это иллюстрируется графиками на рис. 3. На рис. 3а использованы данные при кипении воды и этанола на алюминиевой пластине с прямоугольными канавками А-2, на рис. 3б - на алюминиевой пластине с треугольным профилем канавки А-9 и на рис. 3в - на медной пластине с прямоугольными канавками М-1. На этих же графиках отмечены точки, полученные при кипении на соответствующих пластинах в воздушной среде. Угол наклона для кривых кипения в воздушной среде меньше, а интенсификация теплообмена тем значительней, чем меньше тепловой поток. Очевидно, наличие газа в недегазированном теплоносителе способствует появлению центров парообразования, парогазовые пузыри турбулизируют поток жидкости в канавке, да и влияние окружающей воздушной среды возрастает с уменьшением уровня теплового потока. Вероятно, на уровне тепловых потоков  $q = 10^6 \text{ Вт/м}^2$  следует ожидать практического "вырождения" интенсифицирующего действия недегазированного теплоносителя.

Расчет по уравнению (1) значений эффективной теплопроводности залитой канавчатой структуры для всех пластин в зависимости от уровня теплового потока показал, что различие в  $\lambda_{\text{э}}$  для воды до 6 раз, для этанола в 2,5 раза. Глубина канавки не оказывает практического влияния на величину коэффициента теплоотдачи, но является одним из определяющих факторов для значений  $\lambda_{\text{э}}$ .

Исследования теплообмена при кипении в воздушной среде показали, что ориентация поверхности и недогрев теплоносителя на величину  $(60-45)^\circ\text{C}$  практически не влияет на интенсивность теплообмена.

Наблюдения за режимами и закономерностями процессов парообразования показали, что при давлении 0,1 мПа процесс кипения в

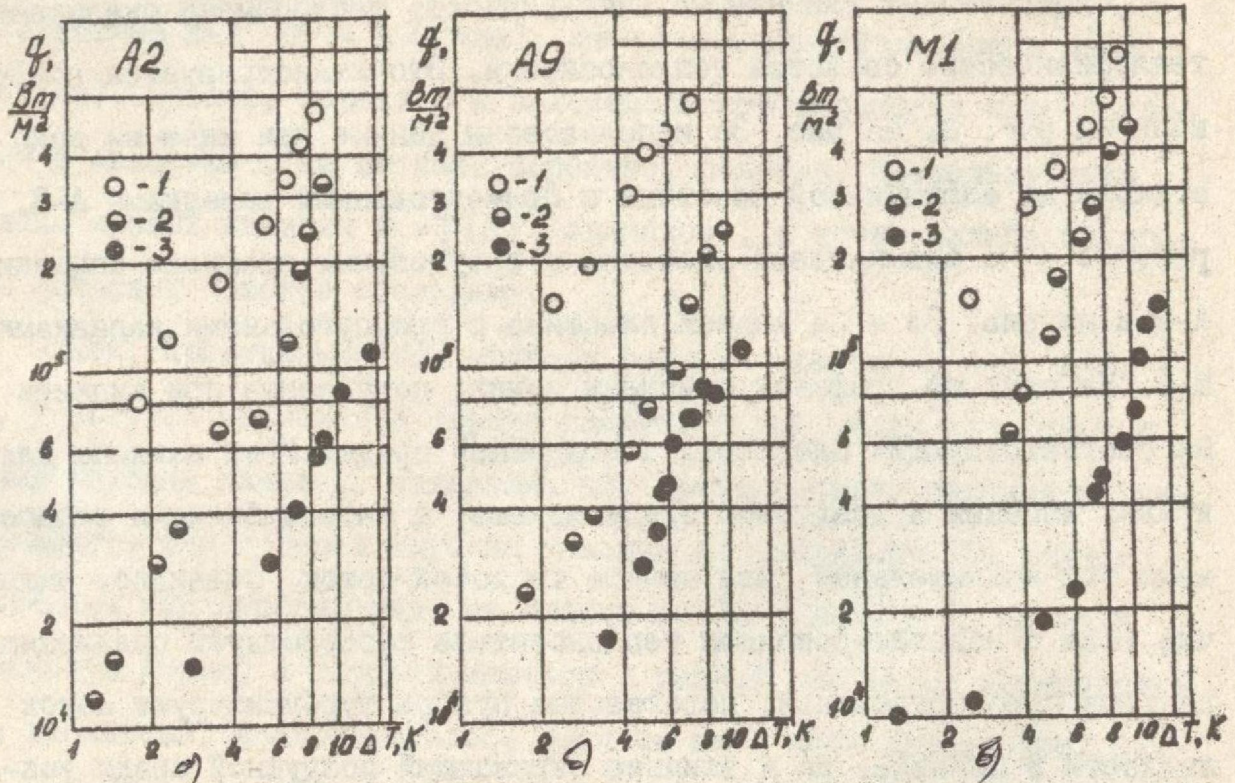


Рис. 3 Влияние теплофизических свойств теплоносителя на интенсивность теплообмена. 1 - вода в воздушной среде; 2 - вода в паровой камере; 3 - этанол в паровой камере.

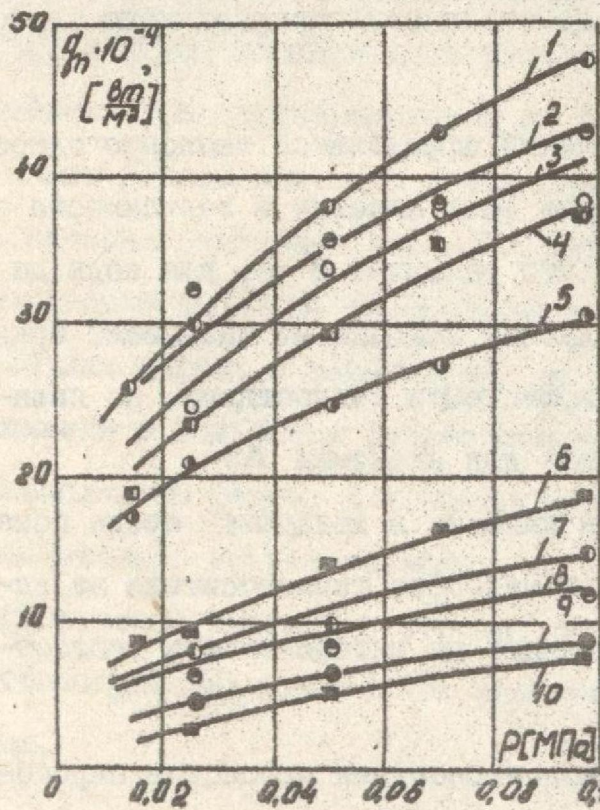


Рис. 4. Зависимость  $q_n = f(\Delta T)$   
 1, 7 - А5; 2, 8 - А2; 3 - А1; 4, 9 - М2;  
 5 - А4; 6, 10 - С1; 1, 2, 3, 4, 5, 6 - вода  
 7, 8, 9, 10 - этанол.

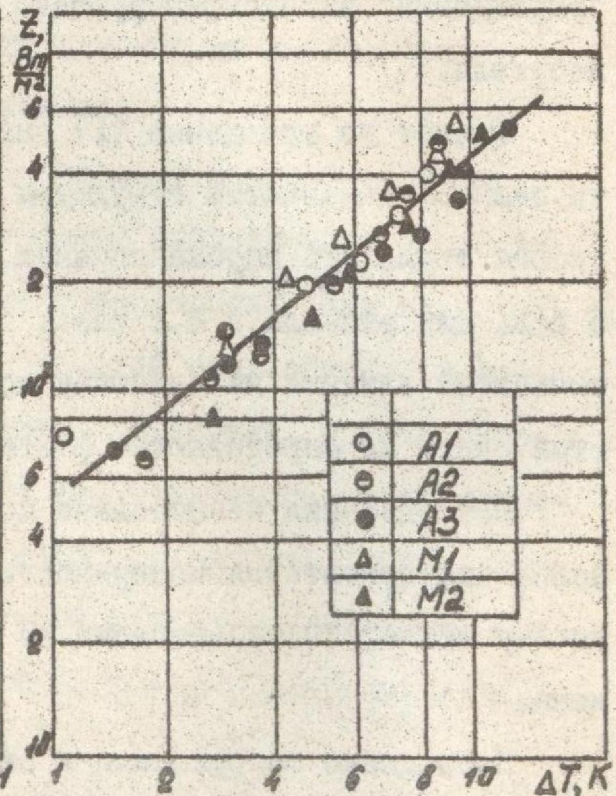


Рис. 5 Обобщение данных по кипению в воздушной среде.

паровой камере отличался от кипения в воздушной среде тем, что значительно уменьшилось число и активность центров парообразования, особенно в области низких тепловых потоков. Наиболее заметно это было на пластинах с широкими канавками М-2 и С-1. С увеличением теплового потока, кроме постоянно действующих нескольких центров парообразования, на этих пластинах начинают образовываться пузырьки и на широких ребрах канавок. Жидкость турбулизируется, улучшается смачиваемость всей поверхности. При тепловом потоке больше  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> при кипении воды появлялись выбросы отдельных капель воды, которые достигали высоты 0,15-0,2 м. При кипении этанола на хорошо обработанных пластинах при давлениях 0,025 мПа пузырьковое кипение не наблюдалось, но с увеличением теплового потока в некоторых канавках появлялись центры, из которых жидкость выбрасывалась в виде струй. На этой же пластине при давлении 0,1 мПа выброс жидкости наблюдался в виде отдельных капель, а не струй, а при тепловом потоке  $7 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> на пластине появлялось осушение. По осушению части канавок и по наличию разности температур по поверхности фиксировался предельный тепловой поток. Зависимость величины  $q_n$  от давления насыщения и от типа теплоносителя для разных поверхностей нагрева приведена на рис. 4.

В результате наблюдения за режимами парообразования, характером течения жидкости в канавках и на основе анализа частных зависимостей  $q_n = f(\Delta T)$  установлено существование двух режимов парообразования. Режимы кипения разграничиваются характерными изломами на соответствующих кривых кипения. Точка излома определяется величиной теплового потока  $q_n^*$ , значение которого зависит от характеристик поверхности, теплоносителя и давления насыщения. На исследуемых поверхностях для воды диапазон  $q_n^* = (7,5-10) 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>, для этанола -  $q_n^* = (2,5-3,5) 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. При тепловых по-

токах, меньших  $q^*$ , отсутствовало образование паровых пузырьков на поверхности. В исследуемом диапазоне тепловых потоков поступление жидкости в канавки носило периодический характер, а сам режим орошения может охарактеризоваться как пульсационно-испарительный. В дальнейшем он иногда просто называется испарительным.

Такой характер поступления жидкости, повидимому, связан с взаимодействием относительно коротких канавок и подпитывающих фитилей, что характерно для известных конструкций тепловых труб с артериями. Основные результаты в области потоков  $q < q^*$  и определяются закономерностями этого испарительно-пульсационного режима.

Второй (кипящий) режим сопровождается действием центров парообразования и центров выбросов жидкости. Глубина канавки не оказывает практического влияния на теплообмен при кипении. Влияет пористость, род теплоносителя, материал поверхности нагрева. Наличие газа в теплоносителе интенсифицирует теплоотдачу при кипении, особенно в области низких тепловых потоков. Величина предельного теплового потока уменьшалась с уменьшением давления насыщения. Кризис кипения, в обычном смысле этого слова, в экспериментах не наблюдался. "Запаривание" наступало при достижении гидродинамического предела капиллярной структуры. Теплоотдача при кипении в канавках отличается большей интенсивностью, чем при кипении в свободном объеме, и при кипении в сеточных структурах с размером ячеек, равным ширине канавки.

В четвертой главе на основе краткого анализа методов обобщения опытных данных по кипению определены пути построения и выбора моделей для описания изученных процессов.

При кипении в канавках в воздушной среде образование парогазовых и газовых пузырей, интенсифицирующих теплообмен, наблюдалось

во всем диапазоне тепловых потоков. Полученные результаты вполне согласуются с имеющимися представлениями по влиянию абсорбированных и адсорбированных газов на теплоотдачу в большом объеме. Анализ кривых кипения показал, что существенное влияние на теплообмен при кипении в воздушной среде на канальных капиллярных структурах оказывают тепловой поток, теплофизические свойства металла поверхности нагрева и теплоносителя, пористость структуры. Глубина канавки в меньшей степени влияет на интенсивность теплоотдачи. Полученные экспериментальные данные по теплообмену обобщены в форме:

$$\Sigma = f(\Delta T) \quad (2)$$

где  $\Sigma$  - комплекс, увеличивающий величину удельного теплового потока, соотношение коэффициентов теплопроводности жидкости и металла, пористости, соотношение глубины и ширины канавки.

На рис. 5 приведены результаты обработки опытных точек. Обработка проведена известными методами и дала следующее соотношение:

$$\Sigma = q \cdot \frac{\lambda_{ж}}{\lambda_{м}} \cdot \left(\frac{h}{s}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{s}{b}\right)^{0,2} \quad (3)$$

Пользуясь уравнением (3) и графиком (рис. 5), можно оценить интенсивность теплоотдачи при кипении жидкости в канавках в присутствии газовой среды. Уравнение (3) справедливо в диапазонах  $300 \leq \frac{\lambda_{ж}}{\lambda_{м}} \leq 650$ ;  $0,9 \leq \frac{h}{s} \leq 5$ ;  $0,3 \leq \frac{s}{b} \leq 0,6$  и при уровнях тепловых потоков от  $7 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> до  $8 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>.

Наблюдения за процессом испарения в канальных капиллярных структурах, анализ полученных кривых кипения позволили сделать вывод, что наиболее корректными принципами построения модели теплообмена являются основы, предложенные в ОТИХП для описания тепло-

обмена при испарении в сеточных капиллярных структурах. В качестве элементарной ячейки поверхности рассмотрена открытая капиллярная канавка, образованная двумя прямыми ребрами произвольного профиля. Ребро покрыто пленкой жидкости толщиной  $\delta$ . На основе совместного решения дифференциального уравнения, характеризующего теплообмен в прямом ребре при определенных граничных условиях и гидродинамических уравнениях ламинарного движения в канавках потоков жидкости и пара, получены зависимости для расчета толщины стационарного микрослоя  $\delta$  и удельного теплового потока  $q$ . Используя эти зависимости, проведена обработка опытных данных, полученных при испарении воды и этанола на рабочих поверхностях в диапазоне давлений (0,015-0,1) МПа. При этом уровни тепловых потоков не превышали  $q = 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> для воды и  $q = 3 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> для этанола.

Результаты обработки приведены на рис. 6, из которого видно, что опытные точки с точностью  $\pm 50\%$  коррелируются уравнением:

$$\Sigma = q \sqrt{\frac{\rho \Delta_0^5}{r \cdot \sigma \cdot \lambda_m^2 \cdot \lambda_{ж}^2 (1-\epsilon)^5}} = 0,034 (\Delta T - \Delta T^*)^{5/6} \quad (4)$$

где  $\Delta T^*$  - перегрев, вызванный кривизной мениска (нуклеационный перегрев);

$$\Delta T^* = \frac{4\sigma \cdot T_n}{\mu \cdot \rho_n \cdot s} \quad (5)$$

$$a \quad \Delta_0 = \left[ s \left( \frac{f_p}{u} \right) \right]^{0,2}$$

- характерный размер открытого капиллярного канала.

Для треугольной канавки:

$$\Delta_0 = s \left( \frac{\beta}{4} \right)^4 \quad (6)$$

Для прямоугольной канавки:

$$\angle_0^5 = s \left( \frac{b-s}{2} \right)^4 \quad (7)$$

Для трапецидальной канавки:

$$\angle_0^5 = s \left[ \frac{b - 0,5(s + s_0)}{2} \right]^4 \quad (8)$$

Разброс точек при обработке связан с некоторыми допущениями, сделанными при разработке модели и с разбросом самих экспериментальных данных, который определяется "старением" рабочих поверхностей.

Анализ результатов экспериментальных исследований по кипению в капиллярных каналах позволил установить, что определяющее влияние на интенсивность теплообмена при кипении оказывают род теплоносителя, уровень давления, теплофизические свойства материала поверхности нагрева и удельный тепловой поток. Некоторое влияние оказывают пористость и шероховатость поверхности. Однако, степень влияния этих факторов на теплоотдачу при кипении в канавках значительно меньше, а уровень настоящих представлений не позволяет систематизировать экспериментальный материал с учетом пористости и шероховатости.

В основе обобщающих соотношений опытов по кипению лежит модель Д.А. Лабунцова, согласно которой основное испарение, определяющее рост парового пузыря на поверхности нагрева, происходит лишь вблизи его основания, причем теплота в зоне испарения подводится от поверхности нагрева путем теплопроводности через тонкий микрослой жидкости. Существенное влияние на скорость роста парового пузыря оказывают теплофизические свойства поверхности нагрева, от которых зависит величина температурных флуктуаций, связанных с отбором тепла, аккумулированного материалом поверхности нагрева.

№. В. 14461

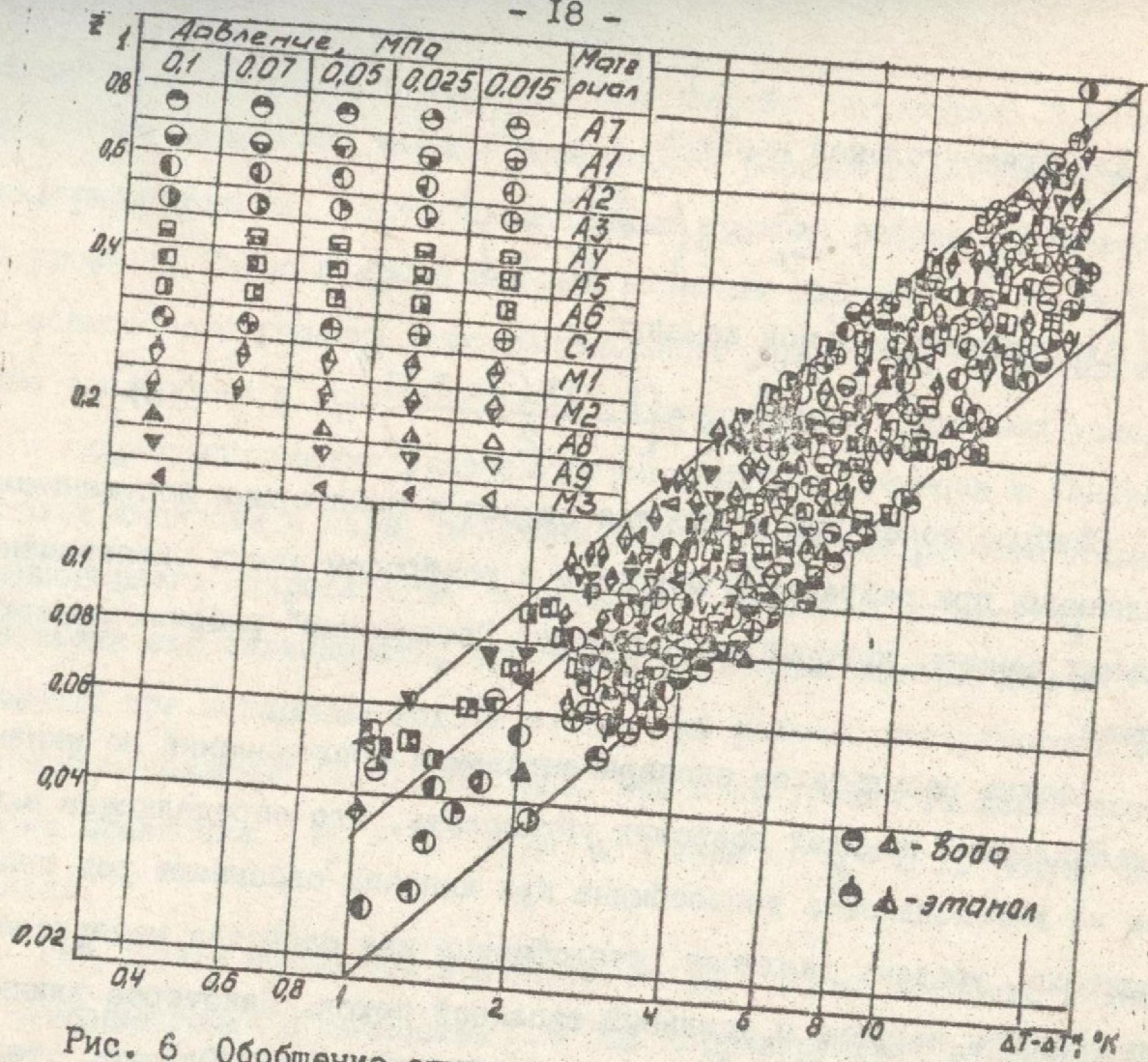


Рис. 6 Обобщение опытных данных по испарению в канавках.

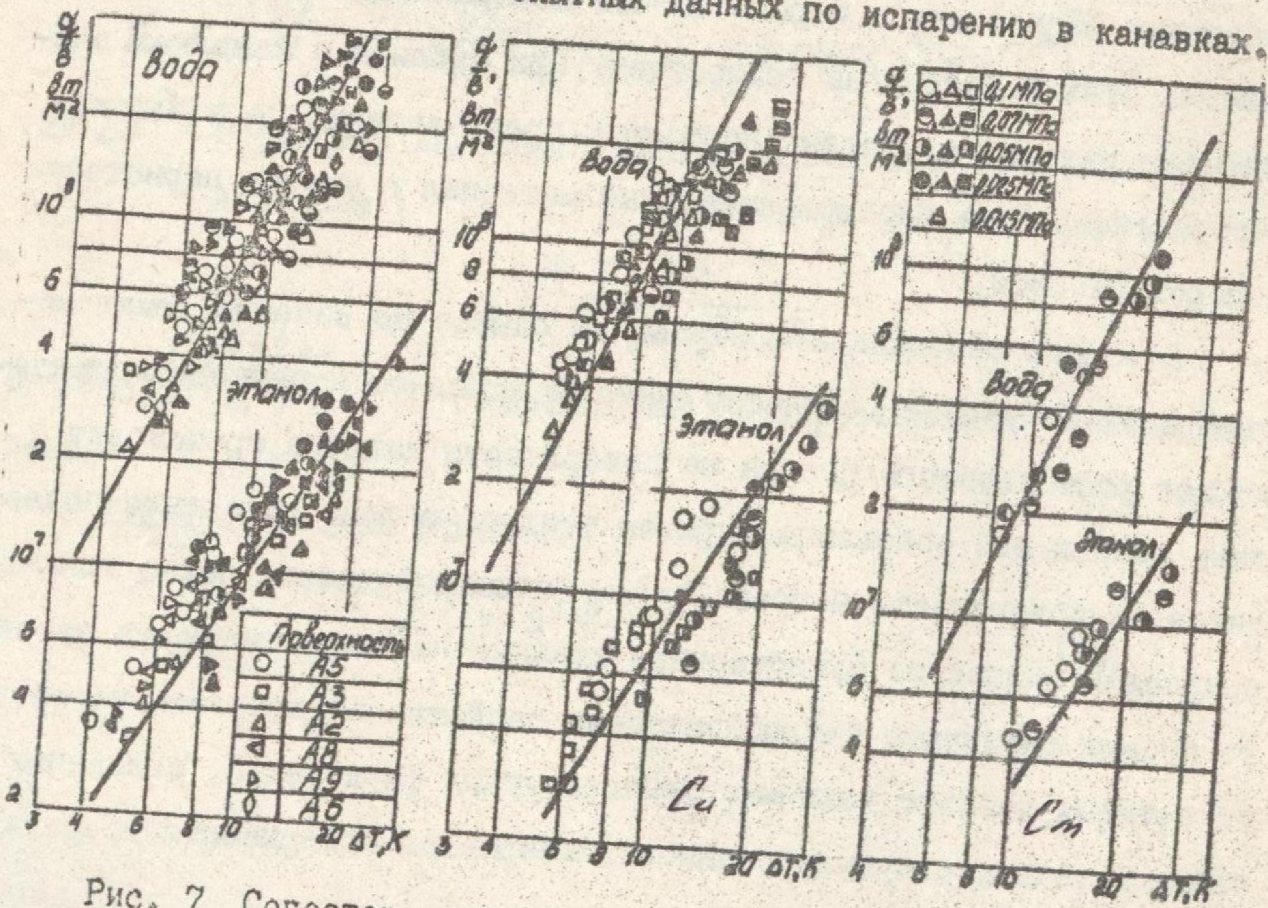


Рис. 7 Сопоставление опытных данных по кипению в канавках с расчетом по (9).

Уменьшение коэффициента теплопроводности (а точнее комплекса  $\sqrt{\lambda \rho r}$ ) материала приводит к снижению скорости роста паровых пузырей при кипении. В результате снижается интенсивность перемешивания жидкости в канавке, изменяется эффективная толщина подслоя. Скорость роста парового пузыря и плотность центров парообразования являются сложными функциями теплофизических свойств материала теплоотдающей стенки, физических свойств жидкости и температурного напора.

Прямые измерения плотности центров парообразования при кипении в канавках неизвестны. Поэтому для класса исследованных поверхностей (полученных механическим методом) проведено обобщение экспериментальных данных при кипении в канавках в следующей форме:

$$q = B \cdot C_3 \frac{\lambda_{ж} \Delta T^2}{\sigma T_n} \left( \frac{\lambda \Delta T}{D_{ж}} + 5 z \rho_n \right) \quad (9)$$

В уравнении (9)  $B$  учитывает изменение свойств жидкости и пара с изменением давления:

$$B = \left( \frac{\rho_n}{\rho_{ж} - \rho_n} \right)^{0,8} \quad (10)$$

Константа  $C_3$  учитывает теплофизические свойства материала поверхности нагрева и теплоносителя. Значения для  $C_3$  приведены в таблице 3.

На рис. 7 проведено сопоставление экспериментальных данных с расчетами по уравнению (9). На этих рисунках кривые кипения представлены в виде  $q/B = f(\Delta T)$ . Можно отметить удовлетворительное обобщение опытных точек. Повышение точности соотношения (9) возможно после получения более представительного материала, который позволит систематизировать экспериментальные данные по микроструктуре поверхности канавок.

В приложении представлены таблицы с опубликованными в науч-

Таблица 3

Материал поверхности нагрева	Коэффициент $C_3$	
	Вода	Этанол
Медь	4,41	1,54
Алюминий	3,34	2,42
Сталь	0,67	0,7

но-технической литературе экспериментальными данными по процессам парообразования в канавках, полученными советскими и зарубежными исследователями, и некоторые результаты опытов автора по кипению воды и этанола в паровой камере и в воздушной среде.

### ВЫВОДЫ

1. При тепловых потоках до  $10^5$  Вт/м<sup>2</sup> для воды и  $3 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> для этанола в канальных капиллярных структурах происходит испарение пленки жидкости, при больших тепловых потоках имеет место пузырьковое кипение.
2. В испарительно-пульсационном режиме механизм теплопереноса в канавках и в капиллярнопористых структурах (сетках) подобен, однако отсутствие контактного термического сопротивления между капиллярной структурой и поверхностью нагрева приводит к интенсификации теплообмена в канавках. При одинаковом температурном напоре в канальных капиллярных структурах передается удельный тепловой поток в среднем в 2 раза больший, чем в капиллярнопористой структуре с размерами ячеек сеток, равными ширине канавки. Глубина канавок не оказывает практического влияния на интенсивность теплообмена. Влияют пористость, род теплоносителя, давление, материал

поверхности нагрева.

3. Подтверждена возможность применения к построению модели испарения в капиллярных каналах общих принципов модели ОТИХП для теплообмена в капиллярносеточных структурах. Теплообмен при испарении пленки жидкости в канавках удовлетворительно описывается соотношением (4).

4. В режиме кипения механизм теплообмена в канавках подобен пузырьковому кипению в свободном объеме. С увеличением плотности теплового потока интенсифицирующее действие капиллярных каналов снижается. Процесс кипения в канавках сопровождается действием центров парообразования и центров выбросов жидкой фазы, причем, могут иметь место отдельные крупномасштабные центры парообразования, а выбросы жидкости осуществляться в виде мелких либо крупных капель и даже в виде отдельных струй. Определяющим для структуры рабочего потока являются род жидкости, давление, характер обработки поверхности и масштабы каналов.

5. Подтверждена возможность использования для кипения в канавках принципов модели Д.А. Лабунцова. Теплообмен при кипении пленки жидкости в канавках удовлетворительно описывается соотношением (9).

6. Существенное влияние на теплообмен оказывает присутствие газа. Наличие абсорбированного и адсорбированного воздуха может до 3 раз увеличить интенсивность теплоотдачи, по сравнению с паровой средой.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

I. Исследование пленочных испарителей с профилированной поверхностью теплообмена /О.Г. Бурдо, Ж.Э. Сирнова, О.Б. Биньковский, Ле Ван Чанг. - Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической

кой конференции по холодильному машиностроению. М.: ЦИТИ  
Химнефтемаш, 1982, с. 85-86.

### Условные обозначения

$b$  - шаг между канавками;  $B, C$  - коэффициенты;  $c$  - удельная  
теплоемкость;  $d$  - диаметр;  $F$  - площадь поверхности;  $g$  - ускоре-  
ние свободного падения;  $h$  - глубина канавки;  $L$  - длина канавок;  
 $p$  - давление;  $\dot{q}$  - удельный тепловой поток;  $s$  - ширина канавки;  
 $r$  - скрытая теплота парообразования;  $T; t$  - температура;  $\epsilon$  -  
пористость;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $\nu$  - коэффициент  
кинематической вязкости;  $\rho$  - плотность;  $\sigma$  - коэффициент поверх-  
ностного натяжения;  $\delta$  - толщина.  $u$  - периметр

Индексы: ж - жидкость, м - металл, н - насыщение, о - осно-  
вание, п - предельный, с - стенка, э - эквивалентный.

И. Г. Гай