

## ТЕПЛОБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА В КАНАЛАХ ПРОТИВОТОЧНЫХ МИКРОТЕПЛОБМЕННИКОВ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### АННОТАЦИЯ

В работе<sup>1</sup> изложены результаты экспериментального исследования процессов теплообмена и гидродинамики в каналах микротеплообменников, предназначенных для охлаждения и термостатирования специальных электронных устройств. Полученные в результате обработки опытных данных уравнения позволяют выполнять тепловой и гидравлический расчеты теплообменников с целью определения их габаритных размеров на основе заданных параметров охлаждаемого устройства. Также представлены данные по конструкциям и результатам испытаний микротеплообменников планарного типа.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В различных областях техники используются миниатюрные устройства на основе фотосопротивлений, входящие в состав различных оптических приборов и систем. Эти устройства имеют малые габаритные размеры ( $d = 9 - 10$  мм и  $h = 30 - 50$  мм) и малые мощности тепловыделений –  $0,5 - 1,5$  Вт. Для обеспечения нормального функционирования необходимо их охлаждение с последующим термостатированием при  $T = 4-80$  К в зависимости от типа фотосопротивления и условий их эксплуатации.

С этой целью была создана серия микрокриогенных систем разных типов [1], для которых разработаны микротеплообменники различных конструкций. Микротеплообменники-охладители представляют собой миниатюрные теплообменные аппараты витого типа с противоточным движением хладагента (азота при охлаждении до  $70 - 80$  К). Прямой поток движется по капиллярным трубкам, обратный – в межтрубном пространстве. Наружный диаметр никелевых трубок  $0,31 - 0,45$  мм с толщиной стенок  $0,05$  мм, в некоторых случаях диаметр трубок достигает  $0,55 - 0,75$  мм. В качестве оребрения трубок используется медная проволока диаметром  $0,1-0,25$  мм, которая крепится к трубкам путем припайки или диффузионной сварки. Первый способ предпочтителен.

По организации теплопередающей поверхности различают три типа теплообменников, рис. 1:

I — теплообменники, у которых труба в один или несколько рядов навивается на сердечник (аналог теплообменник Хемпсона);

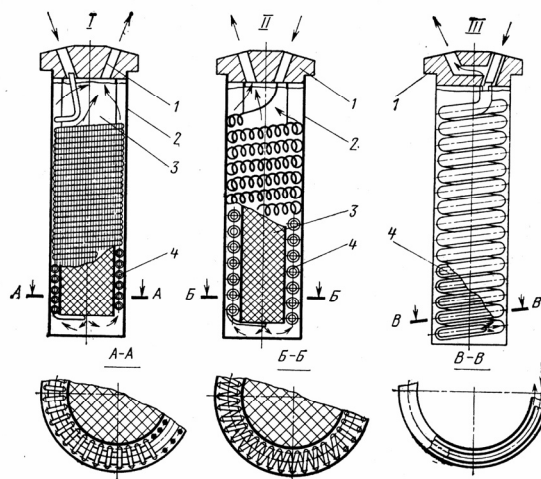


Рис. 1. Схемы основных типов микротеплообменников: 1 — штуцер; 2 — обечайка; 3 — сердечник; 4 — трубки

II — теплообменники, у которых перед навивкой на сердечник трубке придается форма спирали (теплообменник Паркинсона);

III — теплообменник типа «труба в трубе» (теплообменник Линде).

По ряду причин [1] в настоящее время преимущественно используются теплообменники I типа.

### 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОБМЕНА И ГИДРАВЛИКИ В КАНАЛАХ МИКРОТЕПЛОБМЕННИКОВ

Для выполнения теплового и гидравлического расчетов микротеплообменников необходимо определить коэффициенты теплоотдачи прямого и обратного потоков, т.е. решить две задачи: 1-я задача — определение коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления при течении газа (хладагента) в капиллярных трубках; 2-я задача — расчет теплоотдачи при обтекании оребренных капиллярных трубок, навитых на сердечник.

#### 2.1. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления в капиллярных трубках

Обобщая данные по режимам течения газа и геометрическим характеристикам в капиллярных трубках микросистем, можно указать следующие условия:  $Re = 1 \cdot 10^3 \div 15 \cdot 10^4$ ;  $Pr = 0,6 - 3$ ;  $d_{тр} = 0,2 - 3$  мм;  $L_{тр}/d_{тр} = 300 - 3000$ ;  $d_{тр}/R_{зм} = 0,01 - 0,1$ . Приведенный диапазон чисел  $Re$  свидетельствует о том, что в трубках различных микротеплообменников имеют

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-08-01259а

место три гидродинамических режима: ламинарный, турбулентный и переходный. Статистический анализ данных указывает на то, что в большинстве случаев наблюдается развитый турбулентный режим.

Вопросы теплообмена и гидравлического сопротивления при вынужденном течении газа в цилиндрических трубах больших диаметров ( $d_{тр} = 6-50$  мм) рассматривались многими авторами, работы которых общеизвестны. Данных для капиллярных трубок очень мало и они малоизвестны. Эти исследования подробно интерпретируются в работе [2]. Авторы работы [2] провели специальное исследование течения воздуха в капиллярных каналах. Исследования выполнены на цилиндрических каналах с диаметрами 0,39; 0,51; 0,70; 1,4 и 2,0 мм при постоянной относительной длине, равной 150 диаметрам канала.

Экспериментальное исследование показало, что во всех исследованных случаях диаметр канала не влияет на протяженность областей различных режимов течения жидкости. Нижнее критическое значение числа  $Re$  составляет 2150 – 2400, т.е. подтверждает аналогичные данные для цилиндрических труб большого диаметра.

Для коэффициента теплоотдачи в области ламинарного режима ( $Re < 2300$ ) критериальная зависимость приобретает вид  $Nu = 0,025 \cdot Re^{0,2}$ , а в области переходного режима —  $Nu = 2 \cdot 10^{-5} \cdot Re^{1,6}$ . Для области развитого турбулентного режима при тчении в капиллярах получено хорошее совпадение опытных точек с известным критериальным уравнением  $Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8}$ .

Результаты исследования [2] убедительно свидетельствуют о том, что они могут быть приняты за основу при расчете теплообмена и гидравлического сопротивления в трубках микротеплообменников. Однако должны быть введены поправки за счет изогнутости трубок, т.к. коэффициент теплоотдачи и гидравлическое сопротивление в изогнутых трубах значительно выше, чем в прямых [3].

## 2.2. Исследование процессов теплообмена и гидравлического сопротивления в межтрубном пространстве микротеплообменников (в условиях обратного потока)

Подробный и достаточно полный анализ всех исследований приведен в работе [1].

Задача для канала обратного потока может быть сформулирована таким образом: расчет теплоотдачи и гидравлического сопротивления при поперечном обтекании газом развитой поверхности из оребренных трубок малого диаметра в каналах сложных форм, общий вид сечения которых показан в [1,4]. Основные условия этой задачи:  $Re = 1 \cdot 10^2 — 1 \cdot 10^4$ ;  $Pr = 0.6 — 3$ ;  $d_{тр} = 0.3 — 1.0$  мм; трубки капиллярные; ребра имеют круглый профиль; характер оребрения — спиральный; отношение высоты ребра и его шага к диаметру трубки 0.2 — 0.6 и 0.4 — 0.8 соответственно.

В настоящее время известны разнообразные трубчатые теплообменные аппараты с каналами

сложной формы. Однако среди них практически невозможно найти аналогов микротеплообменникам. Это объясняется рядом их особенностей: во-первых, круглый профиль ребра (ребро выполняется из проволоки), спиральный характер его навивки и обусловленные этим иные соотношения высоты ребра, его шага и диаметра трубки; во-вторых, очень плотная навивка рядов трубок и большое число витков трубки по высоте аппарата. Все это создает специфические условия для формирования потока, в связи с чем картина его течения относительно поверхности по сравнению с промышленной аппаратурой совершенно иная. Движение газа относительно трубок поперечное. Конфигурация канала в сильной степени определяется диаметром трубки, высотой и шагом ребра.

Далее изложены результаты исследований однорядных микротеплообменников, отличающихся геометрическими характеристиками теплопередающей поверхности. Наружный диаметр всех теплообменников 9.29 мм,  $d_{тр} = 0,45$  мм;  $d_p = 0,1-0,4$ ;  $t_p = 0,2 — 1,0$  мм. Эксперименты проведены на образцах реальных размеров в условиях низких температур и высоких давлений, т.е. в обычном рабочем режиме микротеплообменников. Подробно методика эксперимента приведена в [1, 4].

Для выявления зависимости коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления от шага оребрения испытаны микротеплообменники, абсолютное значение шага ребра у которых менялось от 0,2 до 1 мм через каждые 0,2 мм. Экспериментальные данные по теплоотдаче и сопротивлению для каждого из исследованных теплообменников обобщаются степенными функциями вида  $Nu = A Re^n$  и  $Eu = B Re^m$ . Путем сравнения коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления при  $Re = idem$  и построения вспомогательных графиков определены степени влияния шага ребра на теплоотдачу и сопротивление. Влияние диаметра ребра на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление исследовано на микротеплообменниках с диаметрами ребер 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4 мм. Коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления увеличиваются соответственно пропорционально

$$\left(\frac{d_p}{d_{тр}}\right)^{2,4} \text{ и } \left(\frac{d_p}{d_{тр}}\right)^{0,3}.$$

Для установления обобщающих расчетных формул экспериментальные данные, относящиеся ко всем исследованным микротеплообменникам, у которых менялись геометрические характеристики оребрения (высота и шаг), представлены в виде единых зависимостей (рис.2). Критериальные уравнения для расчета теплоотдачи и гидравлического сопротивления имеют вид:

$$Nu = 0,063 Re^{0,9} \left(\frac{t_p}{d_{тр}}\right)^{-1,3} \left(\frac{d_p}{d_{тр}}\right)^{2,4};$$

$$Eu = 12,2 Re^{-0,4} \left( \frac{t_p}{d_{TP}} \right)^{-0,6} \left( \frac{d_p}{d_{TP}} \right)^{0,3}$$

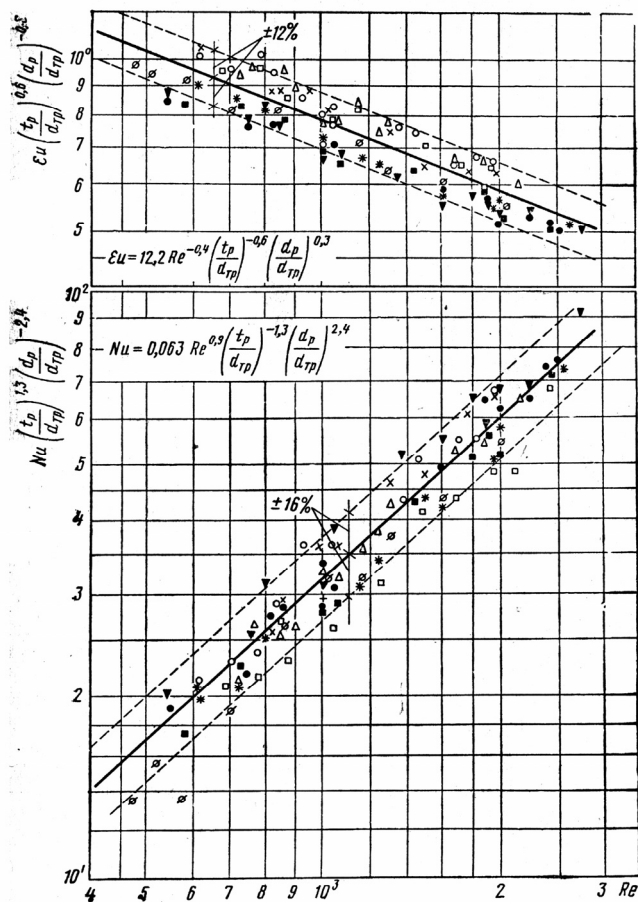


Рис. 2. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению в витых однорядных микротеплообменниках

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТЕПЛООБМЕННИКОВ ПЛАНАРНОГО ТИПА

В связи с дальнейшим развитием полупроводниковой техники и совершенствованием охлаждаемых приборов последовало уменьшение мощности их тепловыделений, что привело к значительному снижению тепловых нагрузок микротеплообменников.

Поэтому область применения охладителей из капиллярных трубок начинает сужаться. Возникла потребность в применении микротеплообменников с каналами щелевой формы, имеющих меньшие размеры. Эти теплообменники получили название планарных (от англ. Plan – схема, план). Микроканалы получают путем применения методов нанотехнологии, в частности, способом фотолитографии в сочетании с электрохимическим травлением и диффузионной сваркой в вакууме [5]. Оригинальность и уникальность такого метода заключается в том, что можно получать микроканалы различных форм и размеров на плоских пластинах, собирая их в необходимом количестве в виде теплообменни-

ков-охладителей, сохраняя при этом высокую эффективность. Дальнейшее их совершенствование невозможно без глубокого фундаментального исследования происходящих в них процессов теплообмена и гидродинамики.

Первые конструкции планарных теплообменников и результаты их испытаний представлены в работе [6]. В МГТУ им. Н.Э. Баумана также были изготовлены и испытаны металлические планарные теплообменники (ПМТ) [7]. Цель испытаний — проверка работоспособности, т.е. испытание на прочность и герметичность, проверка проходимости каналов и дроссельного устройства, определение расхода рабочего газа, минимальной температуры и времени ее достижения. При этом варьировались конструкции образцов, давление рабочего газа, тепловая изоляция, условия работы и параметры рабочих режимов с различными газами. Более подробные данные можно найти в работе [7].

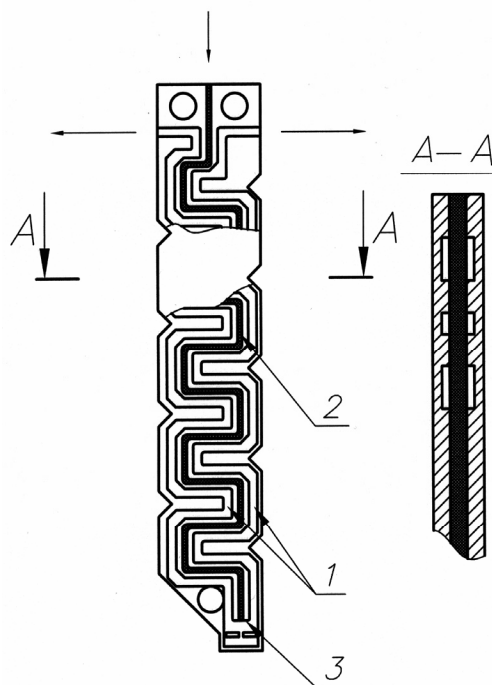


Рис. 3. Конструкция планарного микротеплообменника: 1 – каналы обратного потока низкого давления; 2 – канал прямого потока высокого давления; 3 – дроссельный канал

Испытания проведены на конструкции с зигзагообразными каналами (рис. 3). Основная пластина микротеплообменника имеет центральный канал 2 для прямого «теплого» потока газа высокого давления и два боковых более широких канала 1 для обратного потока «холодного» газа низкого давления. Сечение центрального канала имеет размеры 0.65x0.13 мм, бокового канала — 2.25x0.13 мм. Материал пластин — антикоррозийная сталь 12X18H10T. Были изготовлены и испытаны ПМТ двух вариантов на разных режимах функционирования.

На рис. 4 приведены графики достижения температуры охлаждения.

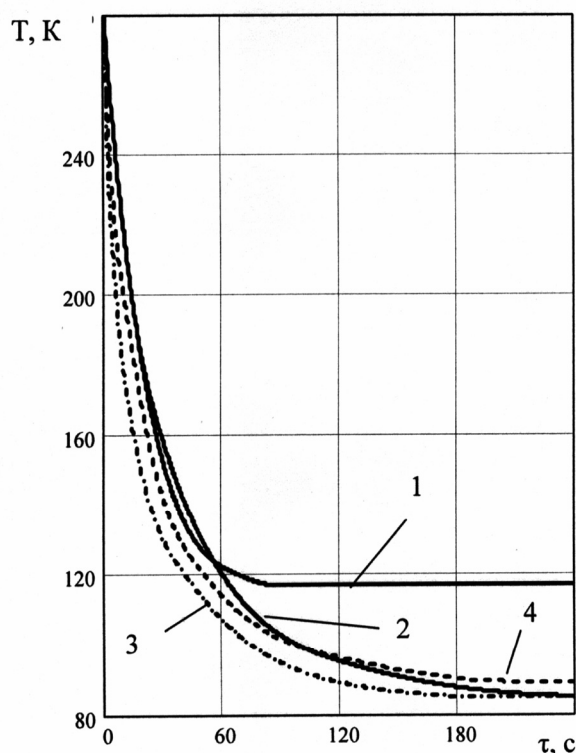


Рис. 4. Понижение температуры в микротеплообменнике: 1 – трехслойная конструкция; 2 – 4 – двухслойная конструкция

Анализ результатов, полученных при испытаниях на чистом азоте, позволил сравнить варианты конструкции микротеплообменников планарного типа [7].

Приведенные экспериментальные данные показали, что характеристики планарных микротеплообменников могут быть существенно изменены путем замены конструкции и размеров их каналов.

Поэтому далее для получения расчетных зависимостей необходимо выполнить экспериментальное исследование режимов течения газа в микроканалах сложных форм с целью поиска оптимальных соотношений геометрических характеристик каналов, позволяющих обеспечивать заданные параметры.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования процессов теплообмена и гидравлики в каналах витых микротеплообменников из капиллярных трубок получены следующие данные:

- показана правомерность использования известных уравнений для труб больших диаметров для расчета теплообмена и гидравлики в капиллярных каналах;
- получены данные для расчета теплообмена и гидравлики в условиях течения обратных потоков в микротеплообменниках, обобщенные в виде критерийных уравнений;
- результаты использованы для расчета теплообмена и гидравлики при разработке микротеплообменников различных дроссельных систем, которые были применены для практических целей;
- разработаны и испытаны микротеплообменники планарного типа. Показана их работоспособность и возможность обеспечения заданных температурных режимов.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $R_{зм}$  – радиус закругления змеевика, мм;
- $L_{тр}$  – длина трубки микротеплообменника, мм;
- $T$  – температура охлаждения, К;
- $Nu$  – число Нуссельта;
- $Re$  – число Рейнольдса;
- $Pr$  – число Прандтля;
- $d_{тр}$  – диаметр трубки, мм;
- $d_p$  – диаметр (высота) ребра, мм;
- $t_p$  – шаг оребрения, мм;
- $d_c$  – диаметр сердечника, мм;
- $\tau$  – время, с.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дилевская Е.В. Криогенные микротеплообменники. М.: Машиностроение, 1978. 165 с.
2. Дыбан Е.П., Швец И.Т. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления и теплообмена при течении воздуха в капиллярных каналах // Известия АН СССР. Отд.технических наук. 1956. № 2. С. 75—82.
3. Кошелев И.И., Эскин Н.Б., Абрютина Н.В. О гидравлическом сопротивлении изогнутых труб малого диаметра из нержавеющей стали при изотермическом течении жидкости // Известия вузов. Энергетика. 1967. № 2. С. 64—69.
4. Дилевская Е.В., Каськов С.И., Гараева Э.Р. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления в каналах криогенных микротеплообменников // Труды школы молодых ученых «Тепломассообмен в энергетических установках», Калуга. М.: Издательство МЭИ, 2005. С. 416—419.
5. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию (пер. с японск.). М.: БИНОМ, 2005. 134 с.
6. Литтл В.А. Микроминиатюрные рефрижераторы Ж. Приборы для научных исследований (пер. с англ.), 1984. № 5. С. 3—25.
7. Шевич Ю.А., Даниленко Т.К., Могорычный В.И. Экспериментальное исследование микрорефрижераторов планарного типа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Серия Машиностроение. 2000. С. 119—122.