

УДК  
621.1  
К 682

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

---

П.В. Королев

ИСПЫТАНИЕ  
ПЛАСТИНЧАТО-РЕБРИСТОГО  
ТЕПЛООБМЕННИКА

*Лабораторная работа № 3*

Методическое пособие  
по курсу  
«Оборудование криогенных систем»

для студентов, обучающихся по направлению  
«Техническая физика»

Москва



2007

УДК  
621.1  
К 682

Утверждено учебным управлением МЭИ  
в качестве методического пособия для студентов

Подготовлено на кафедре низких температур

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.П. Плетнев

Королев П.В.

К 682 Испытание пластинчато-ребристого теплообменника. Лабораторная работа № 3 : методическое пособие / П.В. Королев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 16 с.

Лабораторная работа посвящена экспериментальному исследованию тепловых и гидравлических характеристик пластинчато-ребристого теплообменника. Описание работы содержит принципиальную схему стенда, методику проведения экспериментов и обработки опытных данных, рекомендации по содержанию и форме отчета, а также перечень вопросов для собеседования и подготовки к защите.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности «Техника и физика низких температур» Института теплоэнергетики и технической физики (ИТТФ) МЭИ (ГУ) и слушателей ФПКПС.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является приобретение навыков экспериментального исследования тепловых и гидравлических характеристик пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов.

Ознакомление с принципами работы пластинчато-ребристых теплообменников в случае, когда температуры теплоносителей превышают температуру окружающей среды, способствует формированию навыков, необходимых при проектировании и управлении эксплуатацией таких аппаратов в области низких температур. Пластинчато-ребристые теплообменники широко применяются в криогенной технике, поскольку отличаются от других типов теплообменных аппаратов высокими значениями эффективности, компактностью и малой массой. Указанные достоинства таких теплообменников, обеспечиваются применением двухстороннего оребрения поверхности теплообмена и использованием легких алюминиевых сплавов для их изготовления.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ СОБЕСЕДОВАНИЯ ПЕРЕД ВЫПОЛНЕНИЕМ РАБОТЫ

1. В каких областях криогенной техники применяются пластинчато-ребристые теплообменные аппараты?
2. Каковы преимущества и недостатки пластинчато-ребристых теплообменников по сравнению с другими типами теплообменных аппаратов (прямотрубными, витыми, матричными)?
3. Какие типы ребер используются в пластинчато-ребристых теплообменниках?
4. В каких случаях целесообразно использовать оребренные поверхности?
5. Чем определяется эффективность оребрения поверхности?

## МЕТОД ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

В целях получения рабочих характеристик пластинчато-ребристого теплообменника используется стационарный метод продувки теплообменника потоками горячего и холодного воздуха. При этом осуществляются измерения расходов, температур и гидравлических потерь в теплообменнике по тракту горячего воздуха, что дает возможность рассчитать коэффициенты теплопередачи и гидравлических сопротивлений при различных числах Рейнольдса.

## ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Принципиальная схема лабораторного стенда изображена на рис. 1.

Объектом исследования служит пластинчато-ребристый теплообменник 1, к которому подведены линии горячего 2 и холодного 3 воздуха. Теплообменник обрамлен жалюзийными ребрами, устройство которых показано на рис. 2. В линию 2 атмосферный воздух нагнетается компрессором 4, который включается тумблером  $K_4$ . Для измерения расхода горячего воздуха используется трубка Вентури 5, соединенная с U-образным водяным дифференциальным манометром 6. Нагревание воздуха осуществляется нагревателем 7, включаемым в сеть переменного тока тумблером  $K_3$ . Мощность нагревателя (а, следовательно, и температура горячего воздуха) изменяется при помощи автотрансформатора 8. Для контроля мощности нагревателя служат амперметр 9 и вольтметр 10. Температуры горячего воздуха на входе ( $T_1$ ) и выходе ( $T_2$ ) теплообменного аппарата измеряются термопарами, соединенными через переключатель ПМТ-20 (позиция 11) с цифровым вольтметром АВМ-4306 (не показан на рисунке). Кроме того, каждая термопара непосредственно соединена с аналого-цифровым преобразователем ADAM-4018+, подключенным к ЭВМ (на рисунке не показано). Это позволяет производить запись показаний термопар в файл с желаемым интервалом времени. Перепад давления на теплообменнике по тракту горячего воздуха измеряется спиртовым микроманометром 12.

Холодный воздух нагнетается в теплообменник вентилятором 13. Вентилятор подключается к сети переменного тока через лабораторный автотрансформатор 14 и выпрямитель 15, включается тумблером  $K_2$ . Скорость вращения вентилятора, а, следовательно, расход холодного воздуха изменяются с помощью автотрансформатора 14. Контроль электрической нагрузки вентилятора осуществляется по показаниям амперметра 16 и вольтметра 17. Для измерения скорости холодного воздуха в выходном патрубке служит трубка Прандтля, соединенная со спиртовым микроманометром 18. Температуры холодного воздуха на входе ( $T_3$ ) и выходе ( $T_4$ ) теплообменника измеряются термопарами, соединенными через переключатель ПМТ-20 с цифровым вольтметром АВМ-4306 и непосредственно с аналого-цифровым преобразователем ADAM-4018+. На стенде установлены термопары  $K$ -типа (хромель-алиюминий). Аналого-цифровой преобразователь производит пересчет значений термо-ЭДС в значения температуры по имеющимся зависимостям. В файл записываются непосредственно значения температур.

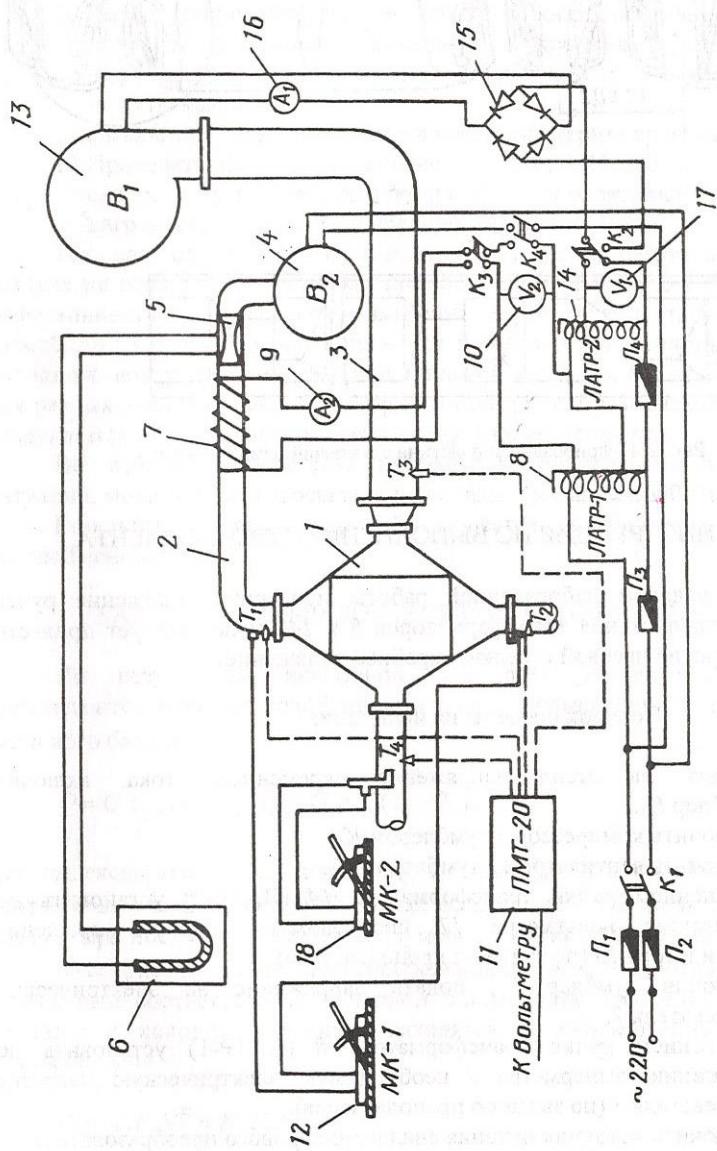


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного стенда

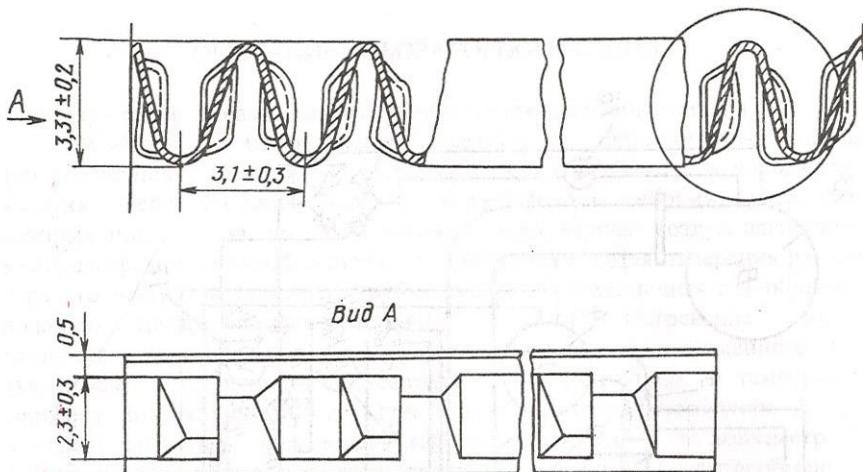


Рис. 2. Гофрированная пластина с жалюзийными ребрами

### ИНСТРУКЦИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЭКСПЕРИМЕНТА

Перед началом лабораторной работы проверить положение ручек регулировки напряжения трансформаторов 8 и 14 (ручки следует привести вращением против часовой стрелки в крайнее положение).

Порядок проведения испытаний:

1. Подать на стенд напряжение переменного тока, включив тумблер  $K_1$ .
2. Включить компрессор 4 тумблером  $K_4$ .
3. Включить вентилятор 13 тумблером  $K_2$ .
4. Вращением ручки трансформатора 14 (ЛАТР-2) установить по показанию вольтметра 17 необходимую скорость вращения вентилятора 13 (по заданию преподавателя).
5. Включив тумблер  $K_3$ , подать напряжение на электрический нагреватель 7.
6. Вращением ручки трансформатора 8 (ЛАТР-1) установить по показанию амперметра 9 необходимую электрическую нагрузку нагревателя 7 (по заданию преподавателя).
7. Включить источник питания аналого-цифрового преобразователя.
8. Запустить на ЭВМ программу записи показаний термопар в файл.

9. Следить за показаниями термопар ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$ ) с помощью цифрового вольтметра, ожидая установления стационарного режима.
10. После установления стационарного режима (постоянные значения термо-ЭДС) записать показания микроманометров 12, 18 и дифференциального манометра 6. Провести по 3 замера через 1-2 минуты каждый.
11. Выключить программу записи показаний термопар в файл.
12. Проделать действия, указанные в пп. 4, 6, 9–11, для других значений скорости вращения вентилятора 13 и/или электрической мощности нагревателя (по заданию преподавателя).

Так как одновременное изменение тепловой нагрузки и расхода воздуха не позволяет выявить влияние отдельного режимного параметра на эффективность теплопередачи, измерения рекомендуется проводить двумя способами. В первом случае снимаются показания для различных расходов холодного воздуха при постоянной тепловой нагрузке. Во втором случае – для разных значений тепловой нагрузки при постоянном расходе холодного воздуха. Величина расхода горячего воздуха не регулируется.

Во избежание перегрева нагревателя, приводящего к аварийной ситуации, мощность на нагревателе не должна превышать 650 Вт.

Результаты всех измерений заносятся в протокол испытания теплообменника.

#### УКАЗАНИЯ ПО ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

По результатам испытаний для всех исследуемых режимов определяются значения коэффициента теплоиспользования  $\eta_t$  из уравнения теплового баланса

$$Q = G_r c_{p,r} (T_1 - T_2) \eta_t = G_x c_{p,x} (T_4 - T_3), \quad (1)$$

где индексы «г» и «х» относятся к горячему и холодному контурам соответственно;  $G$  – массовый расход воздуха;  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Нумерация термопар приведена на рис. 1.

Экспериментальные значения коэффициентов теплоотдачи  $K_r$  и  $K_x$ , отнесенные соответственно к полной поверхности оребрения со стороны горячего и холодного потоков, находятся с использованием уравнения теплопередачи

$$Q = K_r F_r \Delta \bar{T} = K_x F_x \Delta \bar{T}. \quad (2)$$

где  $F$  – полная поверхность оребрения. Входящая в уравнение (2) величина среднего температурного напора  $\Delta\bar{T}$  между потоками определяется по формуле

$$\Delta\bar{T} = \Delta T_n \cdot \varepsilon_{\Delta T}, \quad (3)$$

где  $\Delta T_n = \frac{\Delta T_b - \Delta T_m}{\ln(\Delta T_b / \Delta T_m)}$  – среднелогарифмическое значение температурного напора,  $\Delta T_b$ ,  $\Delta T_m$  – соответственно большее и меньшее значение разности температур на концах теплообменника,  $\varepsilon_{\Delta T}$  – безразмерный коэффициент, зависящий от схемы движения теплоносителей и безразмерных параметров  $R$  и  $P$ :

$$R = \frac{T_1 - T_2}{T_4 - T_3}; \quad P = \frac{T_4 - T_3}{T_1 - T_3}. \quad (4)$$

Графическая зависимость для определения коэффициента  $\varepsilon_{\Delta T}$  приведена на рис. 3.

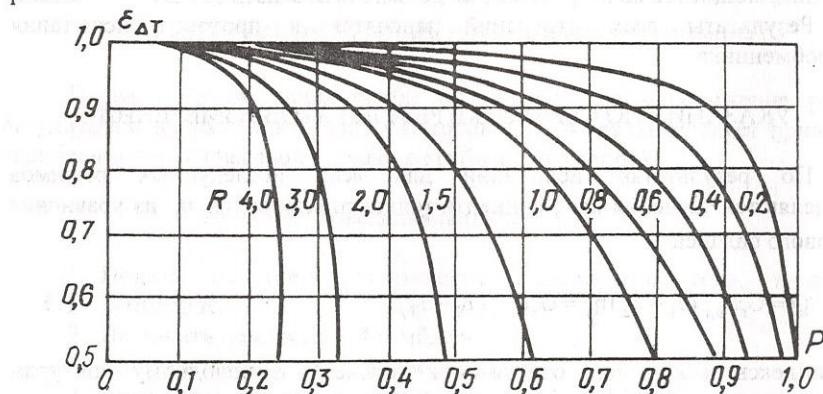


Рис. 3. Зависимость  $\varepsilon_{\Delta T} = f(R, P)$

Экспериментально найденные значения коэффициентов теплопередачи необходимо сопоставить с расчетными. Для оребренных с двух сторон поверхностей

$$K_r = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{o,r}\alpha_r} + \frac{1}{\eta_{o,x}\alpha_x} \cdot \frac{F_r}{F_x}}; \quad (5)$$

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{o,x} \alpha_x} + \frac{1}{\eta_{o,r} \alpha_r} \cdot \frac{F_x}{F_r}}, \quad (6)$$

где  $\eta_{o,r}$ ,  $\eta_{o,x}$  – эффективность оребренной поверхности теплообмена со стороны горячего и холодного потоков соответственно.

Значение эффективности  $\eta_o$  оребренной поверхности находится из соотношения

$$\eta_o = 1 - \frac{F_p}{F} \cdot (1 - \eta_p), \quad (7)$$

где  $\eta_p = \frac{\operatorname{th}(m \cdot l_p)}{m \cdot l_p}$  – эффективность ребра;  $F_p$  – площадь поверхности ребер;

$F$  – полная поверхность теплообмена. Величина  $l_p$  – высота ребра (для пластиинчато-ребристых теплообменников принимается равной половине высоты канала);  $m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda_p \delta_p}}$  – параметр ребра, где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности ребра;  $\delta_p$  – толщина ребра.

Для определения коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  в пластиинчато-ребристых теплообменниках используются эмпирические соотношения, полученные для каждого типа поверхности теплообмена при тепловых испытаниях. Эти соотношения обычно представляются в виде

$$j = A \cdot \operatorname{Re}^n, \quad (8)$$

где  $n$  – показатель степени;  $j = St \cdot Pr^{2/3}$  – фактор теплоотдачи;  $St = \frac{\alpha}{c_p \rho W}$  – число Стентона;  $\rho$  – плотность воздуха;  $\rho W = G/S$  – массовая скорость потока в каналах теплообменника;  $S$  – свободное сечение пакета теплообменной поверхности;  $Pr = \nu/\alpha$  – число Прандтля;  $Re = \frac{Wd_{экв}}{\nu}$  – число Рейнольдса;  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности воздуха;  $\nu$  – кинематическая вязкость воздуха. Применительно к исследуемому теплообменнику с жалюзийными (чешуйчатыми) ребрами:

$$\text{для горячего потока } j = 0,32 \cdot \operatorname{Re}^{-0,49}, \quad (9)$$

$$\text{для холодного потока } j = 0,39 \cdot \operatorname{Re}^{-0,49}. \quad (10)$$

Соотношения (9) и (10) справедливы при  $200 < Re < 2200$ .

Гидравлические испытания теплообменного аппарата состоят в определении потерь давления потока горячего воздуха  $\Delta p$  при различных значениях числа Рейнольдса  $Re$ . Экспериментальные результаты испытаний необходимо сравнить с расчетными.

Величина  $\Delta p$  теплообменника равна сумме потерь давления на местных сопротивлениях и на трение в каналах теплообменного аппарата

$$\Delta p = \Delta p_p + \Delta p_{bx} + \Delta p_{tp} + \Delta p_{vых} + \Delta p_c, \quad (11)$$

где  $\Delta p_p$  – потеря давления на внезапное расширение потока,  $\Delta p_{bx}$  – потеря давления на входе в пакет теплообменной поверхности,  $\Delta p_{tp}$  – потеря давления на трение в каналах теплообменника,  $\Delta p_{vых}$  – потеря давления на выходе из пакета,  $\Delta p_c$  – потеря давления при внезапном сужении потока.

Составляющие общего гидравлического сопротивления определяются по формулам

$$\Delta p_{bx} = \frac{\rho W^2}{2} \left( 1 - \sigma^2 + k_{bx} \right), \quad (12)$$

$$\Delta p_{vых} = \frac{\rho W^2}{2} \left( 1 - \sigma^2 - k_{vых} \right), \quad (13)$$

где  $\sigma = \frac{S}{S_\phi}$ ,  $S$  – свободное сечение пакета теплообменной поверхности,

$S_\phi$  – полное фронтальное сечение пакета,  $k_{bx} = \varphi_1(\sigma, Re)$ ,  $k_{vых} = \varphi_2(\sigma, Re)$  – коэффициенты, зависящие от типа поверхности теплообмена. Для исследуемого теплообменника в диапазоне чисел  $200 < Re < 2000$  значения этих коэффициентов следующие:  $k_{bx} = 0,7$ ,  $k_{vых} = 0,75$ .

Потери давления на трение

$$\Delta p_{tp} = \xi \cdot \frac{\rho W^2}{2} \cdot \frac{F}{S}, \quad (14)$$

где  $\xi = f(Re)$  – фактор трения. Для исследуемого типа теплообменного аппарата

$$\xi = 85/Re, \quad (15)$$

$$\Delta p_c = \zeta \cdot \frac{\rho W^2}{2}, \quad (16)$$

$$\Delta p_p = \frac{\rho W^2}{2} \left( 1 - \frac{S_{tp}}{S_\phi} \right), \quad (17)$$

где  $S_{tp}$  – площадь сечения подводящего и отводящего трубопровода;  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления. Для данного типа теплообменника  $\zeta = 0,485$ .

Результаты вычислений рекомендуется представить в форме таблицы следующего вида,

№ исп.	$I_1$ , А	$U_1$ , В	$I_2$ , А	$U_2$ , В	$N$ , Вт	$Q_r$ , Вт	$Q_x$ , Вт	$\eta_T$	$K_x$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$K_x$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$K_r$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$K_r$ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$\Delta p$ , Па	$\Delta p$ , Па	
	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	
1															
2															
3															
$N$															

в которой:

$I_1$  – ток, подаваемый на вентилятор;

$U_1$  – напряжение на вентиляторе;

$I_2$  – ток в обмотке нагревателя;

$U_2$  – напряжение на нагревателе;

$N = I_2 U_2$  – электрическая мощность нагревателя;

$Q_r = G_r c_{p,r} (T_1 - T_2)$  – количество теплоты, которое отдает горячий поток в теплообменнике за единицу времени;

$Q_x = G_x c_{p,x} (T_4 - T_3)$  – количество теплоты, поступающее к холодному потоку за единицу времени;

$\eta_T = Q_x / Q_r$  – коэффициент теплоиспользования;

$K_r$  и  $K_x$  – экспериментальные и теоретические значения коэффициентов теплоотдачи, отнесенные соответственно к полной поверхности оребрения со стороны горячего и холодного потоков;

$\Delta p$  – экспериментальные и теоретические потери давления потока в теплообменнике.

Геометрические характеристики пластинчато-ребристого теплообменника приведены в нижеследующей таблице.

Характеристика	По холодному воздуху	По горячему воздуху
Число оребренных каналов	12	12
Высота канала ( $2l_p$ ), мм	7	3,31
Ширина канала, мм	180	43,4
Длина канала, мм	43,4	180
Толщина ребер, $\delta_p$ , мм	0,15	0,15
Материал ребер	АМЦ	АМЦ
Значение коэффициента теплопроводности, $\lambda_p$ , Вт/(м · К)	200	200
Свободное сечение пакета, $S$ , м <sup>2</sup>	0,0082	0,00096
Полное фронтальное сечение пакета, $S_\Phi$ , м <sup>2</sup>	0,015	0,00516
Полная поверхность теплообмена, $F$ , м <sup>2</sup>	0,459	0,375
Эквивалентный гидравлический диаметр, $d_{экв}$ , мм	3,08	1,97
Диаметр патрубка, $D$ , мм	48	18
Площадь поверхности ребер, $F_p$ , м <sup>2</sup>	0,282	0,198

Формулы для пересчета показаний приборов в соответствующие значения физических параметров приводятся ниже.

Объемный расход горячего воздуха  $V_r$ , м<sup>3</sup>/с, определяется по формуле

$$V_r = 4,12 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\Delta H / \rho_r}, \quad (18)$$

где  $\Delta H$  – перепад уровней столбов жидкости в U-образном дифференциальном манометре, мм;  $\rho_r$  – плотность горячего воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость холодного воздуха в выходном патрубке

$$W_x = \sqrt{\frac{2\Delta p_x}{\rho_x}}. \quad (19)$$

Здесь  $\rho_x$  – плотность холодного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$$\Delta p_x = k \cdot \rho_c g \Delta h, \quad (20)$$

где  $\Delta p_x$  – динамический напор в холодном потоке;  $k$  – коэффициент спиртового микроманометра;  $\rho_c$  – плотность спирта;  $g$  – ускорение

свободного падения,  $\Delta h$  – изменение положения уровня спирта в трубке микроманометра, м.

Очевидно, что массовый расход холодного воздуха

$$G_x = \rho_x \cdot \frac{\pi D_x^2}{4} \cdot W_x. \quad (21)$$

Как было отмечено выше, аналого-цифровой преобразователь производит пересчет значений термо-ЭДС в значения температуры по имеющимся зависимостям. Тем не менее рекомендуется для одного из режимов работы теплообменника определить температуры путем самостоятельного пересчета значений термо-ЭДС, измеренных вольтметром.

Взаимосвязь температуры  $t$  по шкале Цельсия и термо-ЭДС хромель-алюмелевой термопары  $E(t)$ , мВ, в интервале  $0,5 < E < 10$  мВ при холодных спаях термопары, имеющих температуру  $0^\circ\text{C}$ , может быть представлена в виде следующего градуировочного полинома:

$$t(E) = -3,35777 \cdot 10^{-3} + 25,33744 E - 0,36526 E^2 + 0,02734 E^3 + 1,77611 \cdot 10^{-3} E^4. \quad (22)$$

График этой зависимости показан на рис. 4.

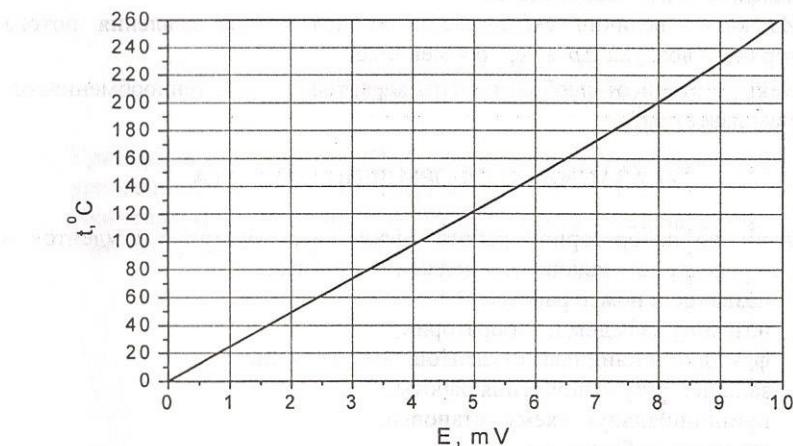


Рис. 4. Взаимосвязь температуры и термо-ЭДС термопары хромель-алюмель

Температуры термопар можно также определить при помощи градуировочной таблицы, приведенной в приложении.

Аналого-цифровой преобразователь может выполнять расчеты температур при холодных спаях термопар, имеющих температуру отличную

от 0°C. Это означает, что нет необходимости помещать холодные спаи термопар в сосуд Дьюара с тающим льдом. Если температуры определяются таким способом (при температуре холодных спаев  $t_1$ ), то измеренное вольтметром значение термо-ЭДС  $E_{изм}$  связано с  $E(t)$  известным соотношением

$$E_{изм} = E(t) - E(t_1), \quad (23)$$

где  $E(t_1)$  – термо-ЭДС при температуре  $t_1$  и температуре холодных спаев, равной 0°C.

Оценку погрешности результатов эксперимента выполнить с учетом рекомендаций, изложенных в лекционном курсе «Теория и методы низкотемпературного эксперимента».

### ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЫ

1. Что такое эффективность ребра  $\eta_p$  и эффективность оребренной поверхности  $\eta_o$ ?
2. Какой вид имеют соотношения для определения коэффициентов теплопередачи  $K_r$  и  $K_x$ ?
3. Почему с увеличением числа Рейнольдса возрастает значение коэффициента теплоотдачи?
4. Из каких величин складывается полная потеря давления потока горячего воздуха  $\Delta p$  в теплообменнике?
5. Какие потери от необратимости, характерные для теплообменников, Вам известны?

### УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется бригадой студентов в объеме, определяемом заданием, и должен содержать:

- название и номер работы;
- название кафедры и лаборатории;
- фамилии и инициалы студентов, номер группы;
- задание, дату выполнения работы;
- принципиальную схему установки;
- протокол наблюдений;
- расчеты в развернутой форме, допускающие их проверку;
- результаты вычислений, представленные в таблице (см. с. 10);
- графические зависимости:  $K = f(Re)$  и  $\Delta p = f(Re)$ ;
- оценку погрешности эксперимента;
- выводы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Номинальная статическая характеристика преобразования термопары  
хромель–алюмель

Термо-ЭДС, мВ

<i>t</i> , °C	0°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357	0,397
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758	0,798
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162	1,203
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570	1,611
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981	2,022
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394	2,436
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,726	2,767	2,809	2,850
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224	3,266
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639	3,681
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054	4,095

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Григорьев В.А., Крохин Ю.И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
- Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.