

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ТЕРМООХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

© 2008 Б.А. Соломин, А.М. Ходаков

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники РАН

Произведён теплофизический расчёт двух схем охлаждающих устройств на элементах Пельтье, работающих в динамическом режиме. Показано преимущество одной из схем.

Для исследования низкотемпературных свойств жидкостей в условиях неравновесной термодинамики удобно использование компактных охлаждающих устройств на базе элементов Пельтье. Основными требованиями к таким установкам являются: достаточно высокий темп охлаждения и нагрева проб жидкостей; предельно низкая минимально достижимая температура пробы на интервале времени не более $3 \div 5$ минут; низкая потребляемая мощность; возможность внешнего автоматического управления режимами охлаждения и нагрева проб. Была разработана автономная, экономичная и эффективная система охлаждения и нагрева проб жидкостей с воздушным принудительным охлаждением, использующая две системы элементов Пельтье с независимым и регулируемым питанием и аккумулятор холода, находящийся между ними. Одна из систем элементов Пельтье находится в тепловом контакте с кюветой для исследуемой пробы и служит для её охлаждения или нагрева с заданной скоростью. В свою очередь она имеет тепловой контакт с аккумулятором холода, который на период измерения низкотемпературных свойств исследуемых жидкостей имеет достаточно низкую температуру, обеспечивающую требуемый тепловой режим элементов Пельтье в условиях максимального охлаждения пробы. Низкая начальная температура аккумулятора холода обеспечивается второй системой элементов Пельтье в промежутки времени между периодами охлаждения пробы [1]. Возможны различные функциональные схемы подобных систем охлаждения. Расчёт термоохлаждающих устройств в нестационарном режиме необходим как при

выборе схемы термоохлаждения, с точки зрения достижения заданной температуры, так и времени её достижения. Однако строгое решение поставленной задачи вызывает определённые трудности. Теоретически и экспериментально нами исследовались по термической и энергетической эффективности две нижеописанные схемы.

Тепловой расчёт блока охлаждения устройства, предназначенного для исследований низкотемпературных теплофизических свойств жидкостей, проводился согласно представленных на рис. 1 и 2 схем установок. Схема 1 содержала аккумулятор холода 6, представляющий собой параллелепипед с большой величиной коэффициента удельной теплоёмкости, который охлаждался двумя боковыми термоэлектрическими модулями 8 до начальной температуры T_0 . Далее включалась вторая ступень охлаждения непосредственно жидкости, которая состояла из термоэлектрического модуля 3, расположенного на верхней грани параллелепипеда аккумулятора. Охлаждение жидкости осуществлялось с заданной скоростью изменения температуры v . В схеме 2 аккумулятор холода отсутствовал, а вместо него находилась термоаккумулирующая пластина 4, которая располагалась между двумя термоэлектрическими преобразователями 3 и 5. Обе схемы адиабатически теплоизолировались. Горячие грани термоэлементов 8 в схеме 1 и 7 в схеме 2 охлаждались радиаторами принудительного охлаждения, с известной пропускной способностью по воздуху P_s .

Для определения зависимости температуры жидкости от времени необходимо предварительно решить нестационарные задачи

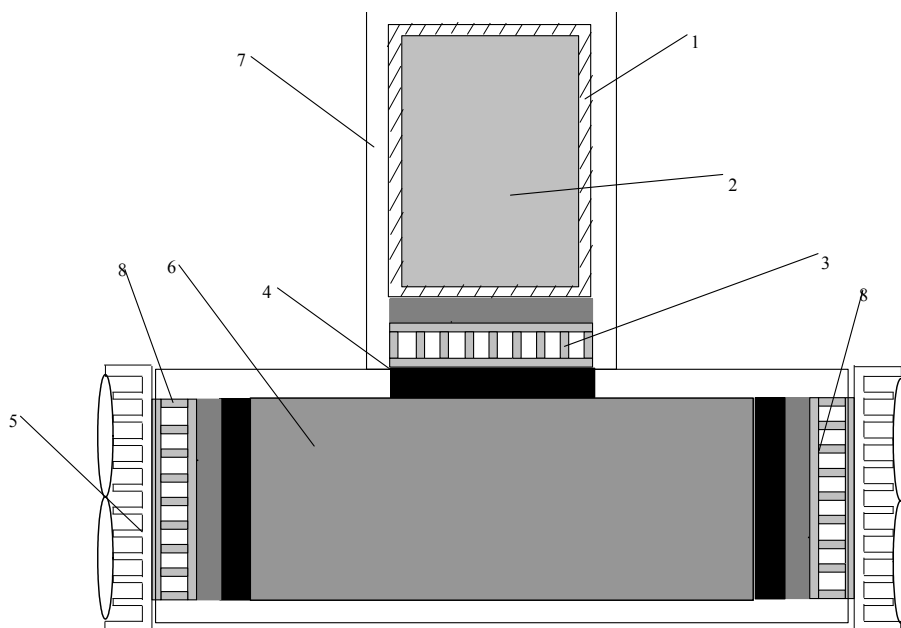


Рис. 1. Схема установки 1:

1 – кювета, 2 – охлаждаемая жидкость, 3, 8 – термоэлектрические модули, 4 – пластина крепления модуля, 5 – радиатор принудительного охлаждения, 6 – аккумулятор холода, 7 – теплоизоляция

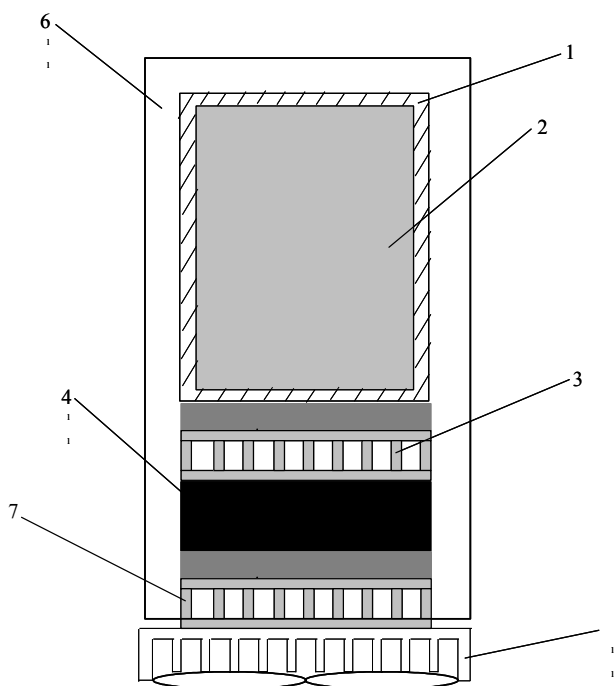


Рис. 2. Схема установки 2:

1 – кювета, 2 – охлаждаемая жидкость, 3, 7 – термоэлектрические модули, 4 – термоаккумулирующая пластина, 5 – радиатор принудительного охлаждения, 6 – теплоизоляция

теплопроводности, определяющие распределение температуры в аккумуляторе холода и термоаккумулирующей пластине, которое возникает при включении второй ступени охлаждения и работы её горячей грани в качестве источника тепла. Так как задачи эти

являются симметричными в декартовой системе координат, то рассматривается 1/4 часть соответствующих геометрий (рис.3). При этом координаты в областях Π и Π_1 меняются следующим образом:

$$\Pi = \begin{cases} 0 \leq x \leq L_x, \\ 0 \leq y \leq L_y; \end{cases} \quad \Pi_1 = \begin{cases} 0 \leq x \leq l_x, \\ 0 \leq y \leq l_y; \\ 0 \leq z \leq L_z, \end{cases} \quad (1)$$

где L_x, L_y, L_z – 1/2 длины, ширины и высота аккумулятора холода или термоаккумулирующей пластины соответственно; l_x, l_y – 1/2 длины и ширины термоэлемента.

Обозначим, $T_{ак}$ – температуру аккумулятора или термоаккумулирующей пластины, а через $T_{cl}(t)$ – температуру холодной грани термоэлектрического модуля 1-ой ступени, причём $T_{cl}(0) = T_0$. Уравнение теплопроводности будет

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta_{x,y,z} T, \quad (2)$$

где $T = T_{ак} - T_{cl}$, a – коэффициент температуропроводности аккумулятора или термоаккумулирующей пластины.

1-я задача (аккумулятор холода).

Начальное условие:

$$T(x, y, z, 0) = 0. \quad (3)$$

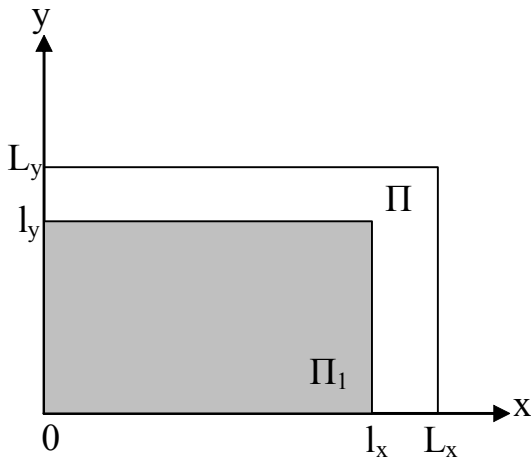


Рис. 3. Геометрия задач 1 и 2 (ось z не показана, $0 \leq z \leq L_z$)

Граничные условия:

$$T|_{x=0, L_x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{y=0, L_y} = 0, \quad (4)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\bigg|_{z=0} = \begin{cases} q(t), & \text{если } (x, y) \in \Pi_1, \\ 0, & \text{если } (x, y) \in \Pi - \Pi_1, \end{cases}$$

$$\frac{\partial T}{\partial z}\bigg|_{z=L_z} = 0, \quad (5)$$

где $q(t)$ – плотность теплового потока от горячей грани термоэлектрического модуля 2-ой ступени. Задача решалась с использованием преобразований Фурье и Лапласа [2] и её решение имеет вид

$$T(x, y, z, t) = \frac{2q(t)L_z}{L_x L_y \lambda} \left[\left(1 - \frac{z}{L_z}\right)^2 - \frac{1}{3} \right] \sum_{m, n=1}^{\infty} B_{nm0} \sin\left(\frac{n\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) + \frac{\delta a}{\lambda L_x L_y L_z} \otimes \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m, n=1}^{\infty} B_{nmk} \sin\left(\frac{n\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{k\pi z}{L_z}\right) \int_0^t q(\tau) \exp\{-a\gamma_{nmk}(t-\tau)\} d\tau, \quad (6)$$

где

$$B_{nmk} = \frac{L_x L_y}{nm \pi^2} \left(1 - \cos\left(\frac{n\pi l_x}{L_x}\right)\right) \sin\left(\frac{m\pi l_y}{L_y}\right), \text{ если } k \neq 0$$

и

$$B_{nmk} = \frac{L_x L_y}{2nm \pi^2} \left(1 - \cos\left(\frac{n\pi l_x}{L_x}\right)\right) \sin\left(\frac{m\pi l_y}{L_y}\right), \text{ если } k = 0;$$

$$\gamma_{nmk} = \left(\frac{n\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{k\pi}{L_z}\right)^2.$$

2-я задача (термоаккумулирующая пластина).

Начальное условие:

$$T(x, y, z, 0) = 0. \quad (7)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial T}{\partial x}\bigg|_{x=0, L_x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y}\bigg|_{y=0, L_y} = 0, \quad (8)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\bigg|_{z=0} = \begin{cases} q(t), & \text{если } (x, y) \in \Pi_1, \\ 0, & \text{если } (x, y) \in \Pi - \Pi_1; \end{cases}$$

$$T|_{z=L_z} = 0. \quad (9)$$

Решение этой задачи будет

$$T(x, y, z, t) = \frac{4q(t)}{L_x L_y \lambda} (L_z - z) \sum_{m, n=1}^{\infty} A_{nm} \cos\left(\frac{n\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) + \frac{\delta a}{L_x L_y L_z \lambda} \otimes \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{m, n=1}^{\infty} A_{nmk} \cos\left(\frac{n\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{(2k-1)\pi z}{2L_z}\right) \int_0^t q(\tau) \exp\{-a\gamma_{nmk}(t-\tau)\} d\tau, \quad (10)$$

где

$$A_{nm} = \frac{L_x L_y}{nm \pi^2} \sin\left(\frac{n\pi l_x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{m\pi l_y}{L_y}\right);$$

$$\gamma_{nmk} = \left(\frac{n\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{(2k-1)\pi}{L_z}\right)^2.$$

Расчёт нестационарных режимов работы термоэлементов проводился по методике, представленной в работе [3]. Согласно её, процесс установления температур холодной и горячей граней можно описать экспоненциальным законом при следующих модельных допущениях: 1) рабочий ток необходимо ограничивать максимальным током $I_{max} = \alpha T_c / R$, где α – средний коэффициент термоэдс термоэлемента в рабочем интервале температур, T_c – температура холодной грани, R – сопротивление термоэлемента; 2) отбор (подвод) тепла от полупроводникового материала и охлаждаемых (нагреваемых) тел считать объёмным. Составляя дифференциальные уравнения баланса тепла для грани термоэлемента и охлаждаемых и нагреваемых тел, можно получить их решения в виде следующих функций

$$T_c = \frac{A}{B} + \left(T_0 - \frac{A}{B}\right) \exp(-|\lambda_1|t),$$

$$T_h = \frac{C}{B} - \left(\frac{C}{B} - T_0\right) \exp(-|\lambda_2|t). \quad (11)$$

где T_h – температура горячей грани термоэлемента, A, B, C, I_1, I_2 – постоянные коэффициенты. Коэффициенты A и C зависят от температуры охлаждаемой (нагреваемой) среды, то есть $A(T_{ж})$ и $C(T_h)$. Итерационный алгоритм расчёта T_c, T_h и $T_{ж}$ состоит из следующих операций. Для первого приближения нахождения $T_{ж}(t)$ используется линейный закон охлаждения по заданной скорости v . На дискретных промежутках времени находятся значения T_c и T_h из выражений (11). Далее используя те же выражения, по найденным ранее значениям температур горячей и холодной граней термоэлемента, решается обратная задача по нахождению температуры жидкости. Процесс повторяется до тех пор, пока относительная ошибка предыдущего и последующего значений не будет превышать заданного предельного значения. При вычислении температуры горячей грани учитывается средняя температура аккумулятора холода, либо термоаккумулирующей пластины, которая вычисляется по формуле

$$\langle T(t) \rangle = \frac{1}{V} \iiint_v T(x, y, z, t) dx dy dz, \quad (12)$$

где V – объём аккумулятора или пластины.

Исходя из основных уравнений теории термоэлектрического охлаждения [4], необходимые для вычислений термоэлектрические величины $\bar{\alpha}$ и комплекс $\frac{\bar{\alpha}^2}{RZ}$, где Z –

эффективность полупроводникового вещества термоэлемента, можно выразить через его паспортные данные, а именно максимальную разность температур между холодной и горячей гранью ΔT_{max} при холодопроизводительности $Q_0 = 0$ и соответствующих ей величин тока I_{max} и напряжения U_{max} :

$$\frac{\bar{\alpha}^2}{RZ} = \frac{RI_{max}^2}{2\Delta T_{max}}, \quad \bar{\alpha} = \frac{(U_{max} - I_{max}R)}{\Delta T_{max}}. \quad (13)$$

При проведении расчётов был выбран термоэлемент ТВ-127-1,4-2,5. Его паспортные данные: $I_{max} = 3,7A$, $Q_{max} = 37,00W$, $U_{max} = 16,3V$, $\Delta T_{max} = 72K$, $R = 3,2\Omega$. Расчёты проводились для декана, помещённого в кювету из латуни. Материалами аккумулятора холода и термоаккумулирующей пластины

были алюминий и медь соответственно. Все необходимые для расчётов физические характеристики определялись из [5]. Температура окружающей среды и начальная температура равнялись $T_{cp} = 24^\circ C$ и $T_0 = -15^\circ C$ соответственно. На рис. 4 представлено распределение температуры по длине аккумулятора холода ($z = L_z/2$) для различных моментов времени. Видно, что максимальное превышение температуры, по отношению к начальной, составляет порядка $7^\circ C$ за 5 секунд, после чего температура горячей грани 2-го термоэлемента выходит на стационарный режим (рис. 5) и дальнейшее повышение

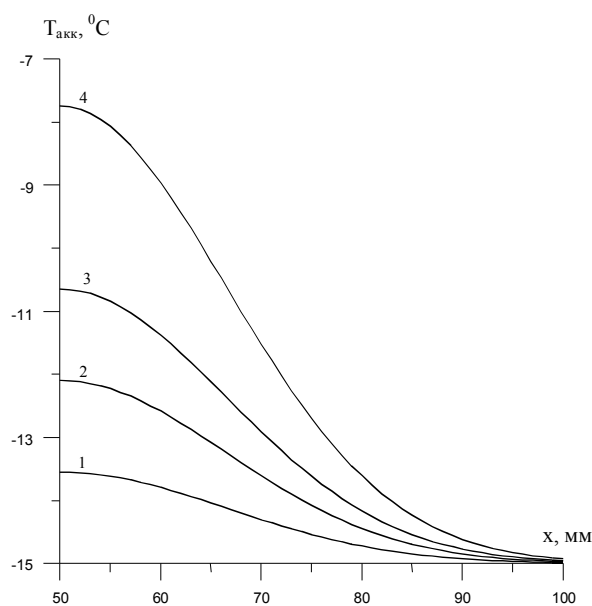


Рис. 4. Распределение температуры по половине длины (x) аккумулятора холода: $z = L_z/2 = 20mm$; t : 1–2, 2–3, 3–4, 4–5 с

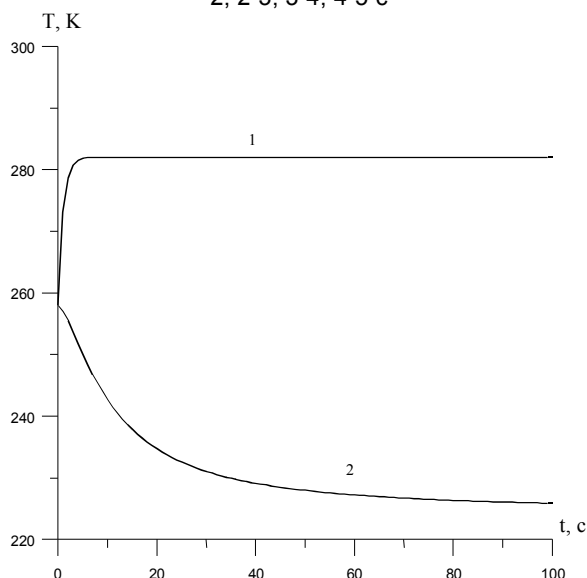


Рис. 5. Изменение температур горячей (1) и холодной (2) граней 2-го термоэлемента со временем

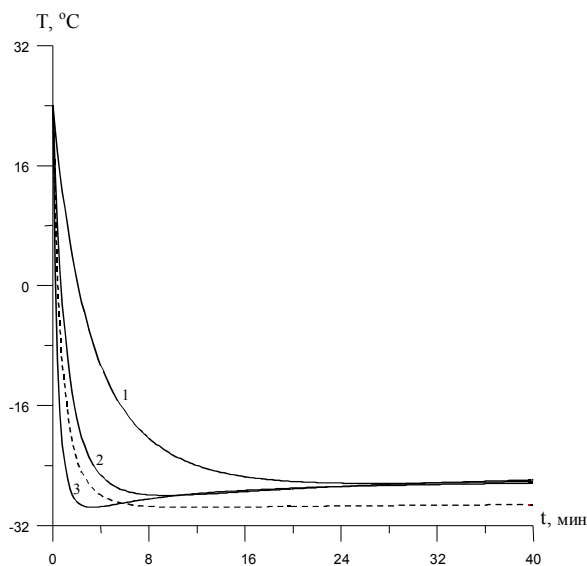


Рис. 6. Зависимость температуры жидкости от времени:
сплошная линия – 1-я схема, v :
1 – 1/9, 2 – 1/3, 3 – 1 град/с;
пунктир – 2-я схема, $v = 1/3$ град/с

ние температуры аккумулятора холода не происходит. Зависимость температуры жидкости от времени представлена на рис. 6. При увеличении скорости охлаждения v , для 1-ой схемы, наблюдается минимум в распределении температуры, величина которого увеличивается с увеличением скорости. Это определяется теплоинерционностью аккумулятора холода. При равных скоростях ох-

лаждения, использование второй схемы приводит к достижению более низких температур в стационарном режиме, что объяснимо лучшими условиями теплоотдачи. Кроме того, вторая схема отличается, в лучшую сторону, значительно меньшим энергопотреблением, меньшими габаритами и весом, проще в реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Конторович М. Л., Соломин Б. А., Черторийский А. А.* и др. Способ исследования низкотемпературных свойств многокомпонентных жидкостей и устройство для его осуществления. Патент № 2183323 от 10.06.2002.
2. *Карташов Э. М.* Аналитические методы в теории теплопроводности твёрдых тел. М.: Высш. школа, 1985.
3. *Покорный Е. Г., Щербина А. Г.* Расчёт полупроводниковых охлаждающих устройств. Л.: Наука, 1969.
4. *Бурштейн А. И.* Физические основы расчёта полупроводниковых термоэлектрических устройств. М.: ГИФМЛ, 1962.
5. Физические величины. Справочник / Под ред. *Григорьева И. С., Мейлихова Е. З.* М.: Энергоатомиздат, 1991.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF CIRCUITS THERMO-FREEZING DEVICES IN INSTALLATION FOR RESEARCH HEAT-TRANSFER PROPERTIES OF LIQUIDS IN CONDITIONS OF NONEQUILIBRIUM THERMODYNAMICS

© 2008 B.A. Solomin, A.M. Hodakov

Ulyanovsk Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics
of Russian Academy of Science

It is made heat-transfer calculation of two circuits of cooling devices on elements Peltje working in a dynamic mode. Advantage of one of circuits is shown.