

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА С ВЫСОКОЙ МОЩНОСТЬЮ ИСТОЧНИКОВ

В. В. ГЕРАСЮТЕНКО<sup>1</sup>, В. А. КОРАБЛЁВ<sup>1</sup>, Д. А. МИНКИН<sup>2</sup>, А. В. ШАРКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 196105, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

Предложен вариант оптимизации жидкостной системы охлаждения за счет применения теплоаккумулирующего устройства. Система охлаждения состоит из блока аккумуляции теплоты, расширительного бака, насоса, прокачивающего теплоноситель через каналы охлаждения, и радиатора. Для оптимизации конструкции теплоаккумулирующего устройства были построены тепловая и математическая модели. Рассчитаны температура охлаждающей жидкости и радиус границы фазового перехода в плавящемся веществе. Рассмотрено условие, при котором тепловой аккумулятор восстанавливает поглощательную способность. Приведен пример расчета теплоаккумулирующего устройства, обеспечивающего тепловой режим прибора мощностью 3 кВт в течение 5 минут. Даны рекомендации для проектирования и эксплуатации конструкции теплового аккумулятора, позволяющие выбрать параметры и рассчитать тепловой режим жидкостной теплоаккумулирующей системы охлаждения. Теплоаккумулирующие устройства, позволяя существенно улучшить массогабаритные характеристики систем охлаждения, являются высокоэффективным средством обеспечения теплового режима приборов, работающих в сложных внешних условиях.

**Ключевые слова:** тепловой режим, жидкостная система охлаждения, тепловой аккумулятор, фазовый переход, октадекан, математическая модель, уравнение теплового баланса

Тепловой режим электронных приборов, интенсивно выделяющих тепло, обеспечивается путем применения жидкостных систем охлаждения. Как правило, охлаждающая жидкость прокачивается через каналы охлаждения прибора с помощью насоса, затем поступает в теплообменный аппарат (где избыточная теплота передается в окружающую среду) далее — в расширительный бак [1]. Масса и объем таких систем часто превышают массогабаритные характеристики охлаждаемого объекта. Это усложняет функционирование приборов в экстремальных условиях, например на околоземных орбитах, тропических широтах или районах чрезвычайных ситуаций [2, 3]. В ряде случаев можно улучшить массогабаритные показатели систем охлаждения за счет применения теплоаккумулирующих устройств, использующих органические вещества с высокой скрытой теплотой плавления [4, 5].

Гидравлическая схема такой системы представлена на рис. 1. Охлаждаемый объект 1 включен в циркуляционный контур, состоящий из насоса 2, расширительного бака 3, радиатора 4 и теплового аккумулятора 5. Электромагнитный клапан 6 отключает радиатор 4, если температура среды оказывается выше допустимой температуры жидкости, а клапан 7 подключает

охлаждаемый объект напрямую к тепловому аккумулятору 5. Работой клапанов управляет электронный блок, подключенный к датчикам температуры среды или радиационного потока, например датчику излучения Солнца.

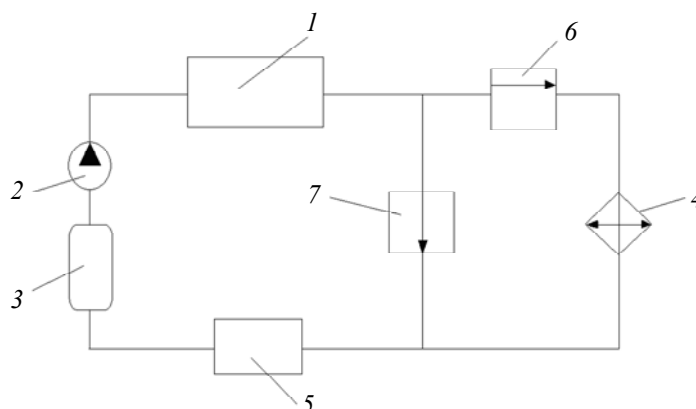


Рис. 1

Конструкция теплового аккумулятора схематично представлена на рис. 2. Плавящееся вещество 1 заполняет пространство внутри корпуса 2 между трубками 3. Концы трубок выходят во входной 4 и выходной 5 коллекторы. Нагретый в электронном блоке теплоноситель поступает в коллектор 4, затем распределяется по трубкам 3, в которых путем конвективного теплообмена передает теплоту плавящемуся веществу. Охлажденный теплоноситель через коллектор 5 сливается в расширительный бак. Плавящееся вещество переходит в жидкое состояние, поглощая теплоту.

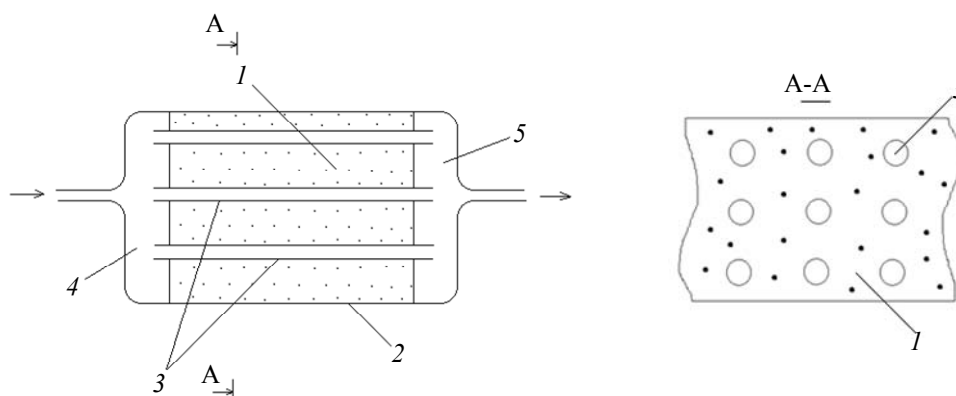


Рис. 2

Недостаток такой конструкции — появление дополнительного теплового сопротивления в виде слоя жидкого плавящегося вещества вокруг трубок 3, в результате чего тепловой поток от жидкости к границе фазового перехода снижается.

Для оптимизации конструкции разработана тепловая и математическая модель теплового аккумулятора при следующих допущениях:

- температура твердой фазы теплоаккумулирующего вещества близка к температуре фазового перехода;
- теплоемкость охлаждаемого прибора много меньше теплоемкости системы охлаждения;
- температура  $T$  жидкости в тепловом аккумуляторе равна среднему значению температур на входе и выходе  $T_{\text{вх}}$  и  $T_{\text{вых}}$  патрубков охлаждаемого прибора;
- теплообмен охлаждаемого прибора и системы охлаждения с окружающей средой практически отсутствует;
- тепловое сопротивление стенок труб пренебрежимо мало.

Фрагмент поперечного сечения аккумулятора с указанием координат показан на рис. 3.

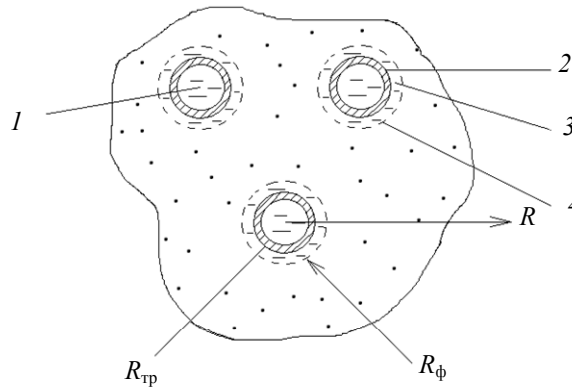


Рис. 3

Теплоноситель 1 движется по трубкам 2, передавая теплоту плавящемуся веществу. В области 3, прилегающей к трубкам, плавящееся вещество перешло в жидкое состояние, и граница фазового перехода 4 находится на расстоянии  $R_\phi$  от оси трубки. Координата  $R$  находится на оси трубки. Математическая модель представляет собой систему уравнений теплового баланса для различных элементов системы охлаждения [6].

Уравнение теплопроводности для расплавленного вещества находящегося в пристеночной области, имеет вид [7, 8]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} = \frac{c\rho}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $c, \rho, \lambda$  — теплоемкость, плотность и теплопроводность плавящегося вещества в жидком состоянии,  $\tau$  — время.

Граничные и начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} T|_{R=R_\phi} &= T_\phi, \\ \left[ \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\alpha}{\lambda} (T - \bar{T}) \right]_{R=R_{тр}} &= 0, \\ T|_{\tau=0} &= T_\phi, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\alpha$  — коэффициент конвективного теплообмена внутри трубки.

Движение границы расплавленной зоны и баланс тепловых потоков на ней можно описать уравнением:

$$\Phi_r = 2\pi R_\phi L \rho_T r \frac{dR_\phi}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $L$  — общая длина трубок в тепловом аккумуляторе,  $\rho_T$  и  $r$  — плотность и теплота фазового перехода плавящегося вещества,  $\Phi_r$  — тепловой поток на границе расплавленной зоны.

$$\Phi_r = -\lambda 2\pi R_\phi L \rho_T \frac{\partial T}{\partial R}. \quad (4)$$

Баланс тепловых потоков в объеме охлаждающей жидкости описывается уравнениями:

$$C_{ж} \frac{d\bar{T}}{d\tau} = \Phi_{п} - \Phi_{т}, \quad (5)$$

где  $C_{ж}$  — полная теплоемкость охлаждающей жидкости в системе охлаждения,  $\Phi_{п}$  — полная мощность тепловыделений в электронном приборе и насосе,  $\Phi_{т}$  — тепловой поток, поглощенный плавящимся веществом, который можно рассчитать по формуле:

$$\Phi_{т} = -2\pi R_{тр} L \lambda \frac{\partial T}{\partial R}. \quad (6)$$

Система уравнений реализована численно, и в результате расчетов получены температура охлаждающей жидкости и радиус границы фазового перехода в плавящемся веществе (рис. 4, 1 — 4000, 2 — 3000, 3 — 2000 Вт).

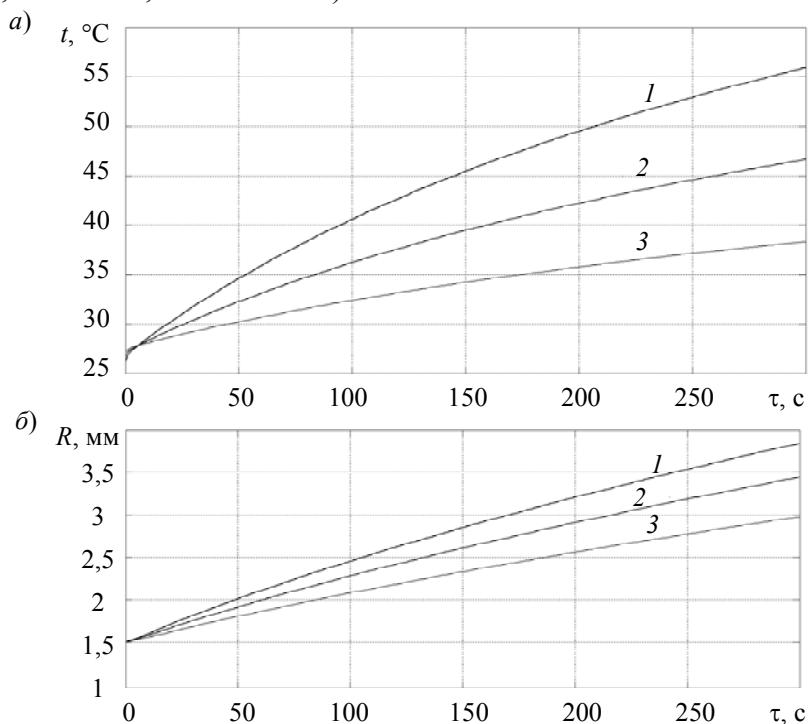


Рис. 4

При практической реализации теплового аккумулятора диаметр и общая длина трубок выбираются исходя из требований к прочности, коррозионной стойкости, конструкционным свойствам при максимальных мощности и продолжительности работы охлаждаемого прибора и допустимой максимальной температуры охлаждающей жидкости. Результаты решения этой системы уравнений позволяют также определить расстояние между трубками в тепловом аккумуляторе как удвоенный максимальный радиус границы фазового перехода в конце работы охлаждаемого прибора.

Для восстановления поглощательной способности теплового аккумулятора необходимо подключение к гидравлической схеме радиатора 4 (см. рис. 1) при помощи клапанов 6 и 7.

В условиях, когда температура окружающей среды ниже температуры фазового перехода плавящегося вещества, а тепловыделение в охлаждаемом приборе отсутствует, теплота из теплового аккумулятора уносится охлаждающей жидкостью и рассеивается в окружающем пространстве через радиатор. В качестве примера результатов расчета можно привести тепловой аккумулятор, обеспечивающий тепловой режим охлаждаемого прибора мощностью 3 кВт в течение 5 мин. В данном тепловом аккумуляторе плавящимся веществом является октадекан с температурой плавления 28 °С. В результате расчетов получено, что нормальный тепловой режим прибора обеспечивается тепловым аккумулятором с массой октадекана 3,72 кг. Охлаждающая жидкость должна прокачиваться по трубкам диаметром 3 мм и общей длиной 135 м. Температура охлаждающей жидкости в процессе работы изменится от 28 до 45 °С при расходе 0,2 л/с.

Тепловой аккумулятор состоит из 225 трубок диаметром 3 мм и длиной 0,6 м, соединенных параллельно. Скорость движения охлаждающей жидкости в трубках 0,15 м/с. Гидравлическое сопротивление трубок теплового аккумулятора не более 500 Па.

Теплоаккумулирующие системы охлаждения являются высокоэффективным средством обеспечения теплового режима функционирования выделяющего тепло приборов в сложных внешних условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришанов В. Н., Изжеуров Е. А., Угланов Д. А. Системы охлаждения лазеров. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2006. 103 с.
2. Самохвалов М. К. Элементы и устройства оптоэлектроники. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 125 с.
3. Тымкул В. М., Тымкул Л. В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета. Новосибирск: СГГА, 2005. 215 с.
4. Bondareva N. S., Sheremet M. A. Conjugate heat transfer in the PCM-based heat storage system with finned copper profile: Application in electronics cooling // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2018. Vol. 124. P. 1275—1284. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.040.
5. Кораблев В. А., Минкин Д. А., Шарков А. В. Методы и средства формирования температурных полей объектов приборостроения. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 82 с.
6. Кораблев В. А., Минкин Д. А., Шарков А. В. Лабораторный практикум по курсу теория тепло- и массообмена. СПб: Университет ИТМО, 2016. 38 с.
7. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории тепломассообмена. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 93 с.
8. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.

## Сведения об авторах

- Виктория Викторовна Герасютенко** — аспирант; Университет ИТМО; факультет низкотемпературной энергетики; E-mail: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru
- Владимир Антонович Кораблёв** — канд. техн. наук, ст. научный сотрудник; Университет ИТМО; факультет низкотемпературной энергетики; E-mail: kvant1953@gmail.com
- Дмитрий Алексеевич Минкин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, факультет низкотемпературной энергетики; E-mail: mindim-spb@mail.ru
- Александр Васильевич Шарков** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; факультет низкотемпературной энергетики; E-mail: avsharkov@corp.ifmo.ru

Поступила в редакцию  
16.11.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Герасютенко В. В., Кораблёв В. А., Минкин Д. А., Шарков А. В. Оптимизация теплоаккумулирующей системы охлаждения электронного прибора с высокой мощностью источников // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 4. С. 387—392.

# OPTIMIZATION OF HEAT-ACCUMULATING SYSTEM FOR COOLING ELECTRONIC DEVICE WITH HIGH-POWER SOURCES

V. V. Gerasyutenko<sup>1</sup>, V. A. Korablev<sup>1</sup>, D. A. Minkin<sup>2</sup>, A. V. Sharkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia,  
196105, St. Petersburg, Russia  
E-mail: viktoriya.gerasyutenko@mail.ru

A liquid cooling system is improved by application of a heat-accumulating device. The modified cooling system consists of a heat accumulation unit, flash tank, pump that transfers coolant through the cooling channels, and radiator. Design of heat accumulation device is optimized with the use of developed thermal and mathematical models. The coolant temperature and the radius of the phase transition boundary in the melting substance are calculated. The condition under which the heat accumulator restores the absorption capacity is analyzed. Result of calculated design of heat-accumulating unit providing a thermal mode of device with power of 3 kW within 5 minutes is presented as a practical example. Recommendations are formulated for development and operation of thermal battery allowing to choose parameters and calculate the thermal regime of the liquid heat storage cooling system. Heat storage devices, allowing to significantly improve the weight and size characteristics of cooling systems, are regarded as highly effective means of ensuring the thermal regime of devices operating under severe external conditions.

**Keywords:** thermal regime, liquid cooling system, heat accumulator, phase transition, octadecane, mathematical model, heat balance equation

# REFERENCES

1. Grishanov V.N., Izzheurov Ye.A., Uglanov D.A. *Sistemy okhlazhdeniya lazerov* (Laser Cooling Systems), Samara, 2006, 103 p. (in Russ.)
2. Samokhvalov M.K. *Elementy i ustroystva optoelektroniki* (Elements and Devices of Optoelectronics), Ul'yanovsk, 2003, 125 p. (in Russ.)
3. Tymkul V.M., Tymkul L.V. *Optiko-elektronnyye pribory i sistemy. Teoriya i metody energeticheskogo rascheta* (Optoelectronic Devices and Systems. Theory and Methods of Energy Calculation), Novosibirsk, 2005, 215 p. (in Russ.)
4. Bondareva N.S., Sheremet M.A. *Intern. J. of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 124, pp. 1275–1284. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.040.
5. Korablev V.A., Minkin D.A., Sharkov A.V. *Metody i sredstva formirovaniya temperaturnykh poley ob'yektov priborostroyeniya* (Methods and Means of Forming the Temperature Fields of Instrumentation Objects), St. Petersburg, 2014, 82 p. (in Russ.)
6. Korablev V.A., Minkin D.A., Sharkov A.V. *Laboratorynyy praktikum po kursu teoriya teplo- i massoobmena* (Laboratory Workshop on the Theory of Heat and Mass Transfer), St. Petersburg, 2016, 38 p. (in Russ.)
7. Dul'nev G.N., Tikhonov S.V. *Osnovy teorii teplomassoobmena* (Fundamentals of the Theory of Heat and Mass Transfer), St. Petersburg, 2010, 93 p. (in Russ.)
8. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* (Heat Conduction Theory), Moscow, 1967, 599 p. (in Russ.)

# Data on authors

<b>Victoria V. Gerasyutenko</b>	—	Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Cryogenic Engineering; E-mail: viktoria.gerasyutenko@mail.ru
<b>Vladimir A. Korablev</b>	—	PhD, Senior Scientist; ITMO University, Faculty of Cryogenic Engineering; E-mail: kvant1953@gmail.com
<b>Dmitry A. Minkin</b>	—	PhD, Associate Professor; St. Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Faculty of Cryogenic Engineering; E-mail: mindim-spb@mail.ru
<b>Alexander V. Sharkov</b>	—	Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Cryogenic Engineering; E-mail: avsharkov@corp.ifmo.ru

**For citation:** Gerasyutenko V. V., Korablev V. A., Minkin D. A., Sharkov A. V. Optimization of heat-accumulating system for cooling electronic device with high-power sources. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 4. P. 387—392 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-4-387-392