
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 681.382
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-6-477-484

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Т. А. ИСМАИЛОВ, О. В. ЕВДУЛОВ, А. М. ИБРАГИМОВА

*Дагестанский государственный технический университет, 367015, Махачкала, Россия
E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru*

Рассмотрено устройство для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок. Устройство выполнено на основе плавящихся рабочих веществ с дополнительным воздушным теплоотводом за счет вентиляторных агрегатов. Описан экспериментальный стенд, приведены результаты натурных испытаний прибора. Представлены зависимости изменения температуры оболочки емкости во времени при плавлении и затвердевании рабочего вещества, а также продолжительности полного плавления (затвердевания) рабочего агента от подводимой (отводимой) теплоты. Определено, что использование вентиляторных агрегатов позволяет сократить длительность затвердевания вещества примерно в 1,7 раза по отношению к случаю естественного теплообмена с окружающей средой посредством медного радиатора. Согласно оценке, расхождение экспериментальных и расчетных данных составило 8 %.

Ключевые слова: элемент РЭА, повторно-кратковременные тепловыделения, охлаждение, плавящееся вещество, воздушное охлаждение, опытный образец, экспериментальный стенд, температура, измерения

Введение. На сегодняшний день среди большого многообразия радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) выделяются элементы, подвергающиеся периодическим кратковременным тепловым нагрузкам при эксплуатации. К ним относят приборы автоматики, следящую аппаратуру, передающие и принимающие радиосистемы. Для стабильной работы такого класса приборов используются системы обеспечения температурных режимов, основанные на воздушном, жидкостном, испарительном, кондуктивном и некоторых других методах отвода теплоты [1—9]. Каждый из методов обладает определенными преимуществами и недостатками. Так, температурные режимы работы элементов РЭА конструктивно и технологически достаточно легко обеспечить воздушными или кондуктивными системами теплоотвода, но малоэффективно вследствие низких интенсивности отвода теплоты и точности поддержания температуры объекта на требуемом уровне. Жидкостные и испарительные системы охлаждения более эффективны с этой точки зрения, но существенно более сложны, громоздки и дорогостоящи.

В этой связи для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок, оптимально применять плавящиеся рабочие вещества с

большой теплотой плавления и стабильной температурой плавления (35—65 °С) [10, 11]. Конструктивно приборы, реализующие такой метод, представляют собой тонкостенную емкость, заполненную рабочим агентом. На внешней поверхности емкости устанавливаются тепловыделяющие элементы РЭА, а ее внутренняя поверхность „оребрывается“ [12]. Теплота, выделяемая во время работы РЭА, поглощается за счет скрытой теплоты плавления рабочего агента. Расплавленное вещество остывает во время паузы в работе радиоэлемента.

Возможности использования систем, реализующих рассмотренный принцип отвода теплоты, для охлаждения элементов РЭА с высокими плотностями теплового потока ограничены необходимостью поддержания рабочего агента в состоянии фазового перехода на протяжении всего цикла работы прибора. В этой ситуации необходимо чрезмерно увеличить количество плавящегося вещества в системе для устранения риска выхода элемента РЭА из строя при недостаточной теплоаккумулирующей способности рабочего агента. Поэтому для обеспечения температурных режимов элементов РЭА с высокой плотностью тепловых потоков целесообразно использовать дополнительную охлаждающую систему с целью отвода избытка теплоты от рабочего вещества. В отношении энергетических и массогабаритных показателей эффективно использовать в качестве такой системы воздушный теплоотвод.

Целью настоящей статьи является экспериментальное исследование опытного образца устройства для отвода теплоты от элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок. Образец реализован с использованием плавящихся в заданном температурном диапазоне рабочих веществ с дополнительным воздушным теплоотводом.

Конструкция устройства. На рис. 1 изображена схема рассматриваемого устройства [13], а на рис. 2 представлен его внешний вид. На структурной схеме элементы РЭА 1 размещаются на торцевых поверхностях тонкостенной металлической емкости 2, заполненной рабочим веществом 3. Перпендикулярно элементам РЭА в ней расположены каналы 4 для продува воздуха за счет вентиляторных агрегатов 5, один из которых работает на приток, а другой на вытяжку. Вентиляторные агрегаты включаются и продувают воздух в каналах во время перерыва в функционировании тепловыделяющего элемента РЭА.

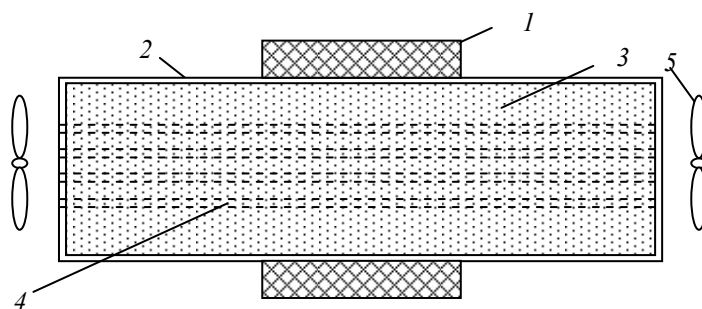


Рис. 1

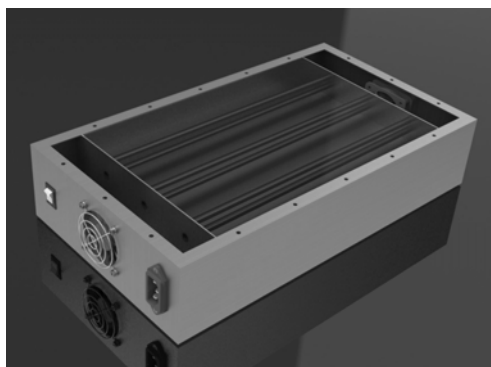


Рис. 2

Экспериментальный стенд. Натурные испытания опытного образца устройства для охлаждения элементов РЭА проводились на экспериментальном стенде (рис. 3).

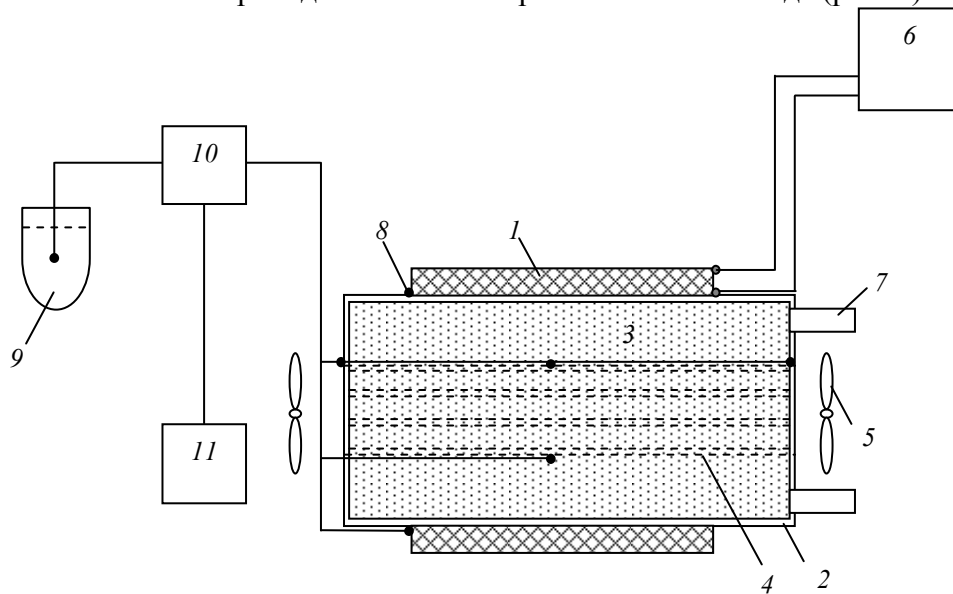


Рис. 3

При исследовании процесса плавления на торцевые поверхности контейнера устанавливались источники тепловыделений (имитаторы элементов РЭА 1), в качестве которых использованы плоские электронагреватели, питаемые от источника электрической энергии 6 (п. 2—5 — то же, что на рис. 1). Плотность теплового потока от нагревателей регулировалась в диапазоне $1000\text{—}6000\text{ Вт/м}^2$. В качестве рабочего вещества использовался парафин. Во избежание риска разрыва емкости при расширении плавящегося агента установлены сильфоны 7.

Для измерения температуры источников тепловыделений, оболочки емкости, температуры на входе и выходе каналов применены медь-константановые термопары 8, опорные спаи которых находились в сосуде Дьюара 9. Выходные сигналы с термопар поступали на измерительный комплекс ИРТМ 10, подключенный к ПЭВМ 11.

Для определения основных параметров исследуемого опытного образца устройства измерялись напряжение и ток на источниках тепловыделений; температура на верхней и нижней торцевой поверхности емкости; температура на входе и выходе каналов; напряжение и ток питания вентиляторных агрегатов.

Результаты натурных испытаний устройства представлены зависимостями изменения температуры оболочки емкости от времени при плавлении и затвердевании рабочего вещества, а также продолжительности полного плавления (затвердевания) рабочего агента от подводимой (отводимой) теплоты.

На рис. 4 и 5 представлены экспериментальные данные изменения температуры оболочки $T_{об}$ (торцевой поверхности емкости, на которой размещен источник теплоты) от времени при плавлении рабочего вещества. Согласно графикам, с увеличением мощности тепловыделений $T_{об}$ повышается. Так, изменение плотности теплового потока нагревателя $q_{РЭА}$ с 1500 до 4500 Вт/м^2 через $1,5\text{ ч}$ увеличивает $T_{об}$ примерно на 45 К при подводе теплоты к верхней поверхности емкости (см. рис. 4) и на 40 — к нижней (см. рис. 5). Полученная разница температур для верхней и нижней поверхностей прибора обусловлена развитой конвекцией при подводе теплоты к рабочему веществу снизу и соответственно более низким тепловым сопротивлением расплавленного слоя.

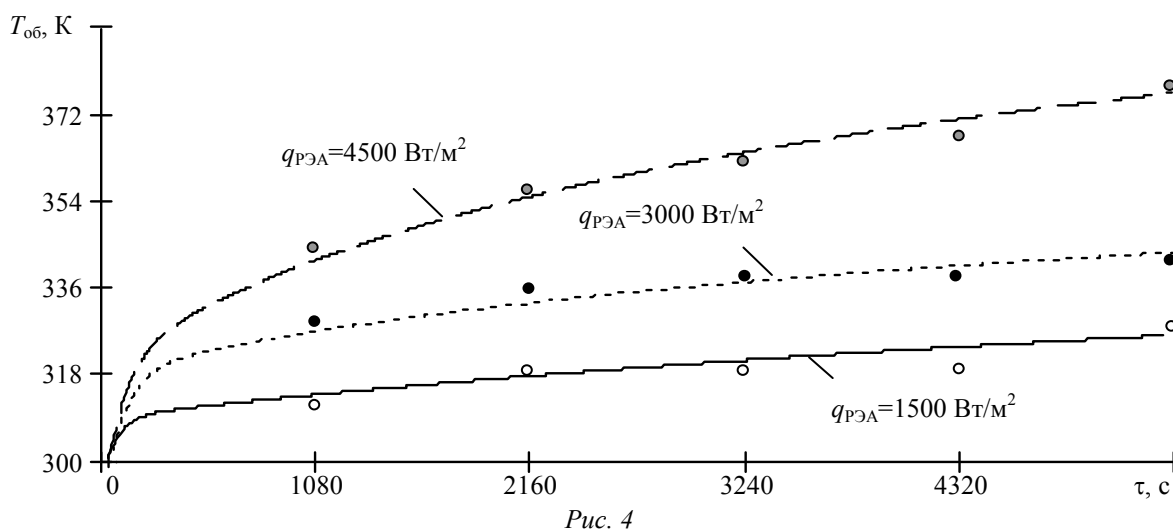


Рис. 4

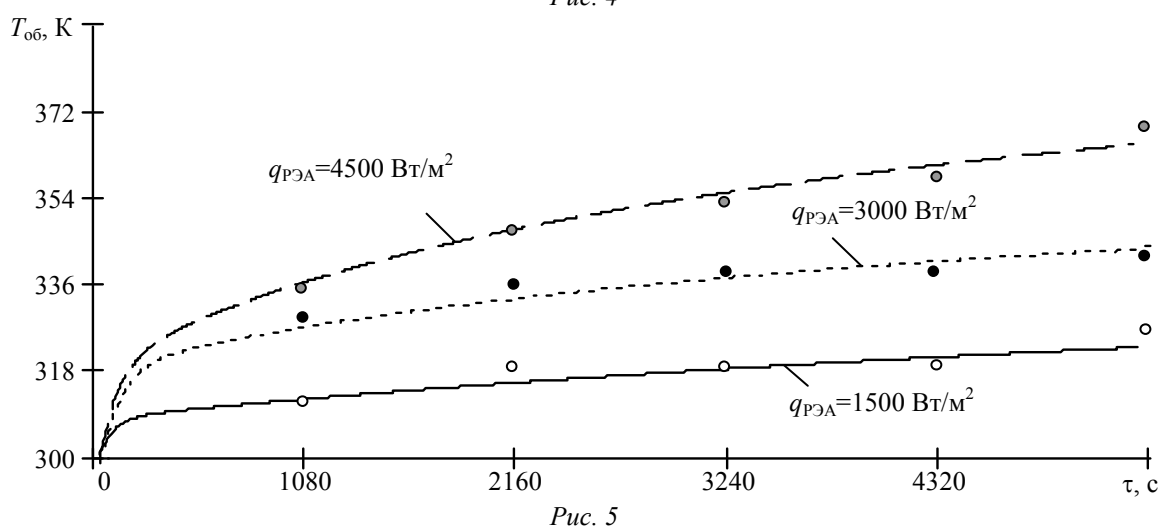


Рис. 5

На рис. 6 представлена зависимость времени полного плавления рабочего вещества от плотности теплового потока элемента РЭА при подводе теплоты к верхней (кривая 1) и нижней торцевой поверхности емкости (2). Результаты измерений показывают снижение времени с 4,7 до 1,1 ч. На практике это может привести к тому, что при определенных тепловых нагрузках режим работы элементов РЭА может нарушиться, возникнет риск их выхода из строя. Поэтому указанное обстоятельство следует учитывать при проектировании теплоотводящей системы.

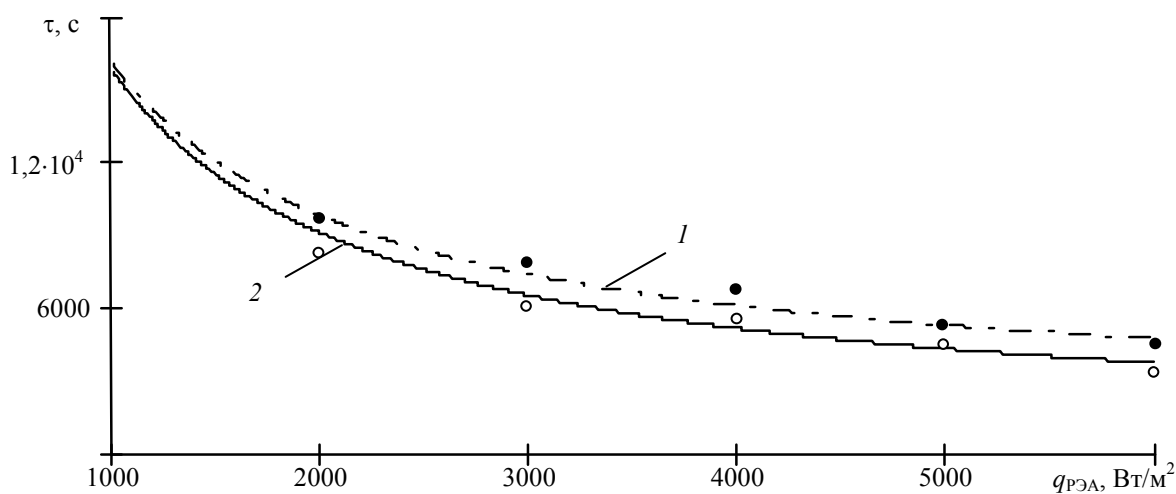


Рис. 6

На рис. 7 приведена зависимость температуры оболочки от времени при затвердевании парафина в случае отвода теплоты от нижней торцевой поверхности емкости с рабочим веществом. Согласно полученным зависимостям, использование дополнительного теплосъема от рабочего агента позволяет существенно сократить „паузу“ в работе тепловыделяющего элемента РЭА. Видно, что при данных условиях примерно за 1 ч температура верхней торцевой поверхности емкости снижается с 317 до 305 К (кривая 1), а температура нижней торцевой поверхности — до 302 К (2). При этом в случае затвердевания рабочего вещества только за счет естественной конвекции за 1 ч температура верхней и нижней торцевой поверхности емкости составит соответственно 313 и 311 К.

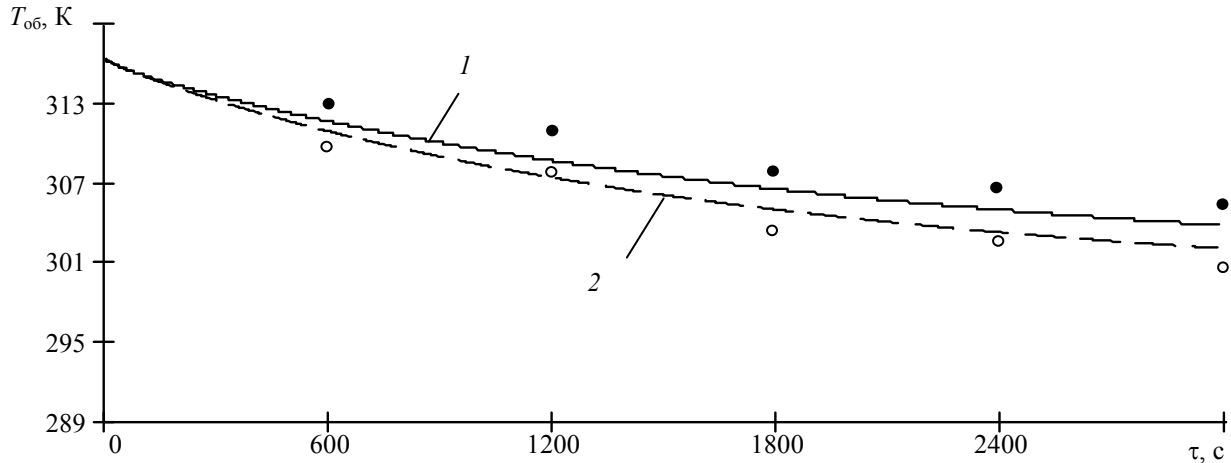


Рис. 7

На рис. 8 изображена зависимость времени полного затвердевания вещества от мощности дополнительной системы теплоотвода q_v . Для сравнения сняты данные при затвердевании рабочего вещества в случае естественного теплообмена с окружающей средой. С целью отвода теплоты в этом случае применялся медный радиатор. Сопоставление результатов измерений показывает, что при использовании дополнительного воздушного теплосъема для интенсификации процесса длительность затвердевания рабочего агента примерно в 1,7 раз меньше, чем при использовании радиатора. Указанное обстоятельство позволяет говорить о существенном снижении ограничений к требованиям времени перерыва в работе циклически работающего элемента РЭА.

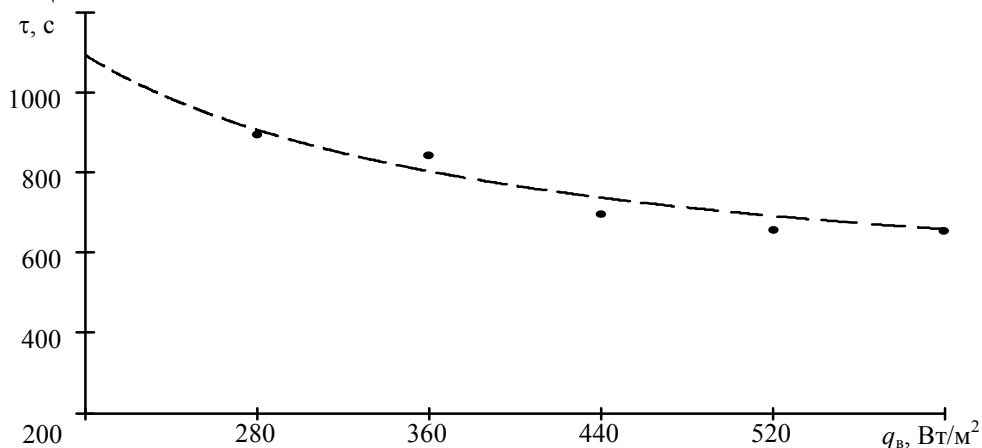


Рис. 8

Сопоставление результатов теоретических [14, 15] и экспериментальных исследований (на рис. 4—8 теоретические данные отражены кривыми, экспериментальные — точками) показало приемлемую точность математической модели. Максимальное расхождение опытных и расчетных данных не превышает 8 %. Наибольшее отклонение результатов расчета и измерений в основном наблюдается на временном промежутке до стабилизации температуры

рабочего вещества, что объясняется неточностью математической модели, решение которой осуществлено численным методом конечных разностей, неидеальностью тепловой изоляции, нестабильностью работы приборов до выхода системы в стационарный режим, некоторым разбросом параметров электронагревателей и вентиляторных агрегатов.

Заключение. Метод, основанный на применении плавящихся рабочих веществ, эффективен при охлаждении элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок. Его главный недостаток — необходимость обеспечения процесса плавления на протяжении всего цикла работы радиоэлемента. В работе:

1) рассмотрена конструкция устройства для охлаждения элементов РЭА, позволяющая сократить продолжительность „паузы“ в их работе за счет использования дополнительного воздушного отвода теплоты от плавящегося агента посредством вентиляторных агрегатов;

2) разработан экспериментальный стенд для проведения натурных испытаний опытного образца данного устройства, позволяющий отслеживать изменение температуры в различных частях прибора во времени при плавлении и затвердевании рабочего вещества в случае различных тепловых нагрузок;

3) установлено, что с увеличением плотности теплового потока элементов РЭА температура оболочки емкости с рабочим веществом существенно растет, причем при одинаковой тепловой нагрузке температура оболочки сверху и снизу устройства различается, что объясняется наличием конвекции при подводе теплоты к рабочему веществу снизу и соответственно более низким тепловым сопротивлением образующегося расплавленного слоя;

4) установлено, что использование вентиляторных агрегатов позволяет примерно в 1,7 раза сократить время затвердевания вещества по сравнению с естественным теплообменом с окружающей средой посредством медного радиатора. Максимальное расхождение результатов расчетов и эксперимента составило 8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архаров А. М., Дилевская Е. В., Каськов С. И., Шевич Ю. А. Конструкции микротеплообменников криогенных систем для охлаждения маломощных электронных устройств // Вестник МАХ. 2008. № 1. С. 15—20.
2. Дульнев Г. Н. Теория тепло- и массообмена. СПб: СПб НИУ ИТМО, 2012. 195 с.
3. Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Магомадов Р. А.-М. Охлаждающие системы на базе сильноточных термоэлектрических полупроводниковых преобразователей. СПб: Политехника, 2020. 285 с.
4. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. О возможности регулирования тепловых режимов типичного элемента радиоэлектронной аппаратуры или электронной техники с локальным источником тепла за счет естественной конвекции // Микроэлектроника. 2010. Т. 39, № 6. С. 452—467.
5. Goldsmid H. J. Thermoelectric refrigeration. NY: Springer, 2013. 240 p.
6. Ding L. C., Akbarzadeh A., Tan L. A review of power generation with thermoelectric system and its alternative with solar ponds // Renewable and sustainable energy reviews. 2018. Vol. 81. P. 799—812.
7. Ssennoga T., Zhu J., Yuying A., Li B. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. 2016. N 65. P. 114—121.
8. Etemoglu A. B. A brief survey and economical analysis of air cooling for electronic equipment // Intern. communication in heat and mass transfer. 2007. Vol. 34. P. 25—32.
9. Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P. Fundamentals of heat and mass transfer. NY: John Wiley & Sons, 2011. 1076 p.
10. Алексеев В. А., Малоземов В. В. Проектирование тепловых аккумуляторов. М.: МАИ, 2008. 86 с.
11. Алексеев В. А. Основы проектирования тепловых аккумуляторов космических аппаратов. Курск: Наукком, 2016. 248 с.

12. Трофимов В. Е. Теплоаккумулирующая панель для поддержания микроклимата в помещении с радиоэлектронным оборудованием // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2017. № 3. С. 36—39.
13. Габитов И. А. Системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры на базе плавящихся тепловых аккумуляторов с дополнительным воздушным и жидкостным теплосъемом: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Махачкала, 2018. 20 с.
14. Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Евдулов Д. В. Результаты теоретических исследований системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Термоэлектричество. 2015. № 6. С. 74—87.
15. Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Махмудова М. М., Евдулов Д. В. Исследование системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2008. № 5. С. 52—59.

Сведения об авторах

- Тагир Абдурашидович Исмаилов** — д-р техн. наук, профессор; заслуженный деятель науки РФ; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники; заведующий кафедрой;
E-mail: dstu@dstu.ru
- Олег Викторович Евдулов** — д-р техн. наук, доцент; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники;
E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru
- Асият Магомедовна Ибрагимова** — соискатель; Дагестанский государственный технический университет, кафедра теоретической и общей электротехники;
E-mail: ibrasya@mail.ru

Поступила в редакцию
11.02.2021 г.

Ссылка для цитирования: Исмаилов Т. А., Евдулов О. В., Ибрагимова А. М. Экспериментальное исследование устройства для охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 6. С. 477—484.

EXPERIMENTAL STUDY OF A DEVICE FOR COOLING ELEMENTS OF RADIO ELECTRONIC EQUIPMENT OPERATING IN THE INTERMITTENT THERMAL LOADS MODE

T. A. Ismailov, O. V. Evdulov, A. M. Ibragimova

Dagestan State Technical University, 367015, Makhachkala, Russia
E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru

A device for cooling elements of radio-electronic equipment operating in the mode of intermittent thermal loads is considered. The device uses melting working substances with an additional air heat sink due to fan units. An experimental stand is described, results of the device field tests are presented. Time dependences of the container shell temperature during melting and solidification of the working substance, as well as duration of complete melting (solidification) of the working agent caused by supplied (removed) heat, are presented. It is determined that the use of fan assemblies makes it possible to reduce the substance solidification time by about 1.7 times in relation to the case of natural heat exchange with the environment by means of a copper radiator. According to estimates carried out, the discrepancy between the experimental and calculated data is 8 %.

Keywords: radio electronic element, intermittent thermal release, cooling, melting substance, air cooling, prototype, experimental stand, temperature, measurements

REFERENCES

1. Arkharov A.M, Dilevskaya E.V., Kaskov S.I., Shevich Yu.A. *Journal of International Academy of Refrigeration*, 2008, no. 1, pp. 15–20. (in Russ.)
2. Dul'nev G.N. *Teoriya teplo- i massoobmena* (Heat and Mass Transfer Theory), St. Petersburg, 2012, 195 p. (in Russ.)
3. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Magomadov R.A.-M. *Okhlazhdayushchiye sistemy na baze sil'notochnykh termoelektricheskikh poluprovodnikovyykh preobrazovateley* (Cooling Systems Based on High-Current Thermoelectric Semiconductor Converters), St. Petersburg, 2020, 285 p. (in Russ.)

4. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Russian Microelectronics*, 2010, no. 6(39), pp. 427–442.
5. Goldsmid H.J. *Thermoelectric refrigeration*, NY, Springer, 2013, 240 p.
6. Ding L.C., Akbarzadeh A., Tan L. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2018, vol. 81, pp. 799–812.
7. Ssenoga T., Zhu J., Yuying A., Li B. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, no. 65, pp. 114–121.
8. Etemoglu A.B. *International communication in heat and mass transfer*, 2007, vol. 34, pp. 25–32.
9. Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewitt D.P. *Fundamentals of heat and mass transfer*, NY, John Wiley & Sons, 2011, 1076 p.
10. Alekseyev V.A., Malozemov V.V. *Proyektirovaniye teplovykh akkumulyatorov* (Design of Heat Accumulators), Moscow, 2008, 86 p. (in Russ.)
11. Alekseyev V.A. *Osnovy proyektirovaniya teplovykh akkumulyatorov kosmicheskikh apparatov* (The Basics of Designing Heat Accumulators for Spacecraft), Kursk, 2016, 248 p. (in Russ.)
12. Trofimov V.E. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2017, no. 3, pp. 36–39. (in Russ.)
13. Gabitov I.A. *Sistemy okhlazhdeniya elementov radioelektronnoy apparatury na baze plavyashchikhsya teplovykh akkumulyatorov s dopolnitel'nym vozdushnym i zhidkostnym teplos'yemom* (Cooling Systems for Radio Electronic Equipment Elements Based on Melting Heat Accumulators with Additional Air and Liquid Heat Removal), Extended abstract of candidate's thesis, Makhachkala, 2018, 20 p. (in Russ.)
14. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Evdulov D.V. *Journal of Thermoelectricity*, 2015, no. 6, pp. 74–87. (in Russ.)
15. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Makhmudova M.M., Evdulov D.V. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2008, no. 5, pp. 52–59. (in Russ.)

Data on authors

- Tagir A. Ismailov** — Dr. Sci., Professor, Honored Scientist of the Russian Federation; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Head of the Department;
E-mail: dstu@dstu.ru
- Oleg V. Evdulov** — Dr. Sci., Associate Professor; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering;
E-mail: ole-ole-ole@rambler.ru
- Asiyat M. Ibragimova** — Applicant; Dagestan State Technical University, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; E-mail: ibrasya@mail.ru

For citation: Ismailov T. A., Evdulov O. V., Ibragimova A. M. Experimental study of a device for cooling elements of radio electronic equipment operating in the intermittent thermal loads mode. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 6. P. 477–484 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-6-477-484