

Проектирование радиатора в составе стойки диаграммообразующих устройств

Л. В. Глазунова, А. Н. Соловьёв

(Донской государственный технический университет)

Рассмотрены конструкторско-технологические приёмы по улучшению гидравлических и, соответственно, тепловых характеристик радиатора жидкостного охлаждения стойки диаграммообразующих устройств радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Рассматривается жидкостный метод охлаждения РЭА, позволяющий отводить тепловые потоки с небольших площадей. Осуществлено CAD-CAE моделирование течения охлаждающей жидкости в канале и исследование её гидродинамических характеристик при заданных параметрах охлаждающей жидкости и окружающей среды. Решены следующие задачи: построена объёмная модель стойки диаграммообразующего устройства, содержащая нетиповые конструктивные решения, выполнено математическое моделирование гидродинамических процессов, разработан метод повышения турбулентности потока, проведён численный анализ предложенной конструкции, сопоставлены результаты теоретического исследования и эксперимента. Предложенная конструкция технологична, в частности сборка изделия не вызывает особой сложности и позволяет использовать средства автоматизации, такие как электроинструмент.

Ключевые слова: теплоотдача, турбулентность, потеря напора, гидравлическое сопротивление, охлаждение радиоэлектронной аппаратуры.

Введение. Развитие радиоэлектронных устройств бортовой аппаратуры связано с постоянным ростом их тепловых мощностей, требований по увеличению функциональности и улучшению показателей надёжности при общей тенденции уменьшения их массогабаритных характеристик. Следствием этого является непрерывное усложнение конструктивно-технологических решений и алгоритмов функционирования. Важной задачей при разработке РЭА является обеспечение функциональных характеристик с эффективной компенсацией проявления побочных факторов работы РЭА.

При проектировании бортовой РЭА рассматривают 3 метода охлаждения [1]: воздушный, жидкостный и кондуктивный. Воздушный метод является менее затратным, но предполагает большие габариты и высокий уровень шума. Кондуктивный метод эффективен в малогабаритной аппаратуре, эксплуатирующейся в различных климатических условиях, но не эффективен при выделении большого теплового потока.

В работе рассмотрены конструкторско-технологические приёмы по улучшению гидравлических и, соответственно, тепловых характеристик радиатора жидкостного охлаждения стойки диаграммообразующих устройств. Принятые конструктивно-технологические решения соответствуют требованиям технического задания. Стандартным решением охлаждения РЭА является применение жидкостного метода охлаждения, позволяющего отводить тепловые потоки с небольших площадей [2]. При проектировании системы охлаждения одним из важных аспектов является потеря напора.

Цель работы — разработка радиатора стойки диаграммообразующего устройства, моделирование течения охлаждающей жидкости в канале и исследование её гидродинамических характеристик при заданных параметрах охлаждающей жидкости и окружающей среды.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: построена объёмная модель стойки диаграммообразующего устройства, содержащая нетиповые конструктивные решения, выполнено математическое моделирование гидродинамических процессов, разработан метод повышения турбулентности потока, сопоставлены результаты теоретического исследования и эксперимента.

Физическая и CAD-модель стойки диаграммообразующих устройств. Стойка состоит из двадцати четырёх диаграммообразующих устройств и радиатора. Радиатор — полая тонкостенная алюминиевая стойка, являющаяся базовой деталью. Функции радиатора — отвод тепла от контактной поверхности 24 диаграммообразующих устройств (далее блоков) (см. рис. 1), внутри которых располагаются энергонапряжённые элементы. Кроме этого, радиатор является несущей конструкцией блоков.



Рис. 1. Структурная схема отвода тепла от стойки

Проектирование трёхмерной модели радиатора (поз. 1, рис. 2) и охлаждаемых им блоков (поз. 2, рис. 2) выполнено в среде САПР для трёхмерного моделирования SolidWorks [3], что даёт возможность проработать компоновку, сделать конструкцию более технологичной и эргономичной.

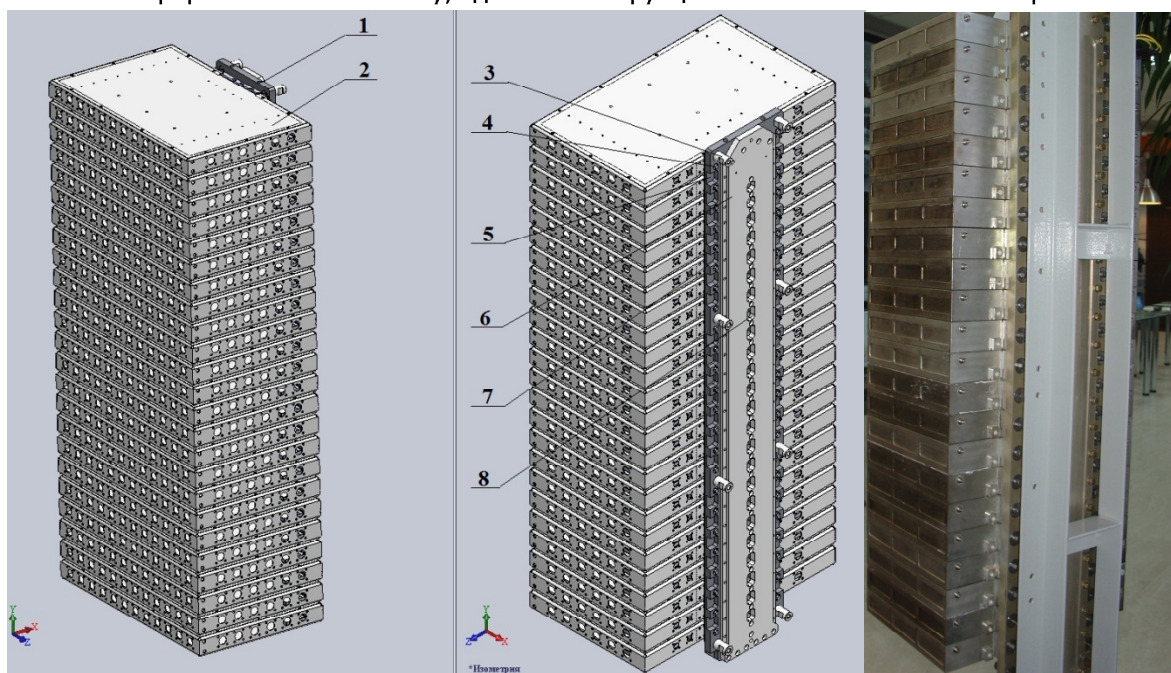


Рис. 2. Трёхмерная модель (слева и в центре) и реальная сборка радиатора с блоками РЭА (справа)

Для упрощения сборки и компоновки конструктив радиатора выполнен с минимальным количеством деталей. Крышка и корпус радиатора (поз. 5, 6, рис. 2) скреплены винтами. Штуцеры, к которым подключается трубопровод внешней системы термостабилизации, ввинчиваются в корпус радиатора. Игла для стравливания воздуха располагается в наивысшей точке системы.

Полости внутри радиатора являются охлаждающими П-образными каналами, по которым циркулирует рабочая жидкость. Особенностью геометрии канала является наличие на прямых участках канала продольных рёбер, выполненных на корпусе и крышке радиатора, увеличивающих полезную поверхность теплоотвода.

Блоки РЭА расположены относительно радиатора таким образом, чтобы исключить вероятность попадания охлаждающей жидкости на аппаратуру и, вследствие этого, выход её из строя. При этом обеспечивается возможность оперативно выполнить замену устройств без остановки функционирования системы охлаждения. Блоки РЭА крепятся к радиатору парой винтов с втулками (поз. 4, рис. 2), так, что панель, на которую в самом блоке отводится тепло, плотно примыкает к торцу радиатора. Полностью исключить зазор невозможно вследствие микроскопических неровностей поверхностей, поэтому для уменьшения теплового сопротивления стыки обрабатываются теплопроводящей пастой. Радиатор крепится к несущей конструкции с помощью четырёх пар титановых стоек (поз. 3, рис. 2). Для уменьшения массы в крышке и корпусе радиатора удалена часть материала, не участвующего в обеспечении прочностных характеристик и теплообмене (поз. 7, 8, рис. 2).

В стойке диаграммообразующего устройства применяется система охлаждения закрытого типа с принудительной циркуляцией охлаждающей жидкости. Вместимость системы составляет 3,7 литра. Условия подключения к внешней системе термостабилизации РЭА: температура на входе в радиатор 40 °С, расход жидкости 25 л/мин. Температура окружающего воздуха, при которой эксплуатируется изделие, варьируется от –50 °С до +65 °С. Атмосферное давление пониженное, до 0,2 атм. Поэтому выбрана незамерзающая при –50 °С жидкость — раствор этиленгликоля с водой ОЖ-65 (с антикоррозионными присадками) с хорошими относительно других антифризов теплофизическими показателями. Суммарная выделяемая блоками тепловая мощность достигает 1,2 кВт. По техническим условиям температура на поверхности блока, которая стыкуется с радиатором, не должна превышать 70 °С, потеря напора жидкости между входом и выходом из канала радиатора должна быть менее 0,2 МПа.

Нагрузки, которые приходится выдерживать радиатору, очень высоки. Одной из них является перепад температуры охлаждающей жидкости, которая варьируется в широком диапазоне значений: от –50 °С до +80 °С. Поэтому, для изготовления деталей радиатора применён материал АМгб ГОСТ 4784-97, который, имея необходимые технические параметры, превосходит медные аналоги по весу, стоимости, герметичности, стойкости к перепадам давления, обладает достаточной прочностью.

Математическая модель процесса охлаждения. В результате расчёта необходимо оценить правомерность предположения о том, что при добавлении рёбер в канал увеличивается теплоотвод, и при этом гидравлическое сопротивление не превышает допустимых значений. Расчёт гидравлического сопротивления радиатора проводится в среде SolidWorks Flow Simulation, в которой движение и теплообмен жидкости с твёрдыми телами моделируется с помощью уравнений Навье — Стокса [4], описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии жидкости. Кроме этого используется уравнения состояния компонентов жидкости, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры. Этими уравнениями моделируется режим течения жидкости, который определяется усреднённым значением числа Рейнольдса.

Система дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый процесс теплоотдачи в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат ($x_i, i = 1, 2, 3$), имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) &= 0, \\ \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} &= S_i, \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) &= S_k u_k + Q_H,\end{aligned}$$

где t — время, u — скорость жидкости, ρ — плотность жидкости, P — давление жидкости, S_i — внешние массовые силы, действующие на единичную массу жидкости (действие гравитации), E — полная энергия единичной массы жидкости, Q_H — тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объёме жидкости, τ_{ik} — тензор вязких сдвиговых напряжений, q_k — диффузионный тепловой поток. Нижние индексы означают суммирование по трём координатным направлениям.

Тензор вязких сдвиговых напряжений определяется:

$$\tau_{ik} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

где $\mu = \mu_j + \mu_i$, μ_j — коэффициент динамической вязкости, μ_i — коэффициент турбулентной вязкости, δ_{ij} — дельта-функция Кронекера ($\delta_{ij} = 1$ при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$), k — кинетическая энергия турбулентности. В соответствии с k – ε моделью турбулентности, μ_i определяется через величины кинетической энергии турбулентности k и диссипации этой энергии ε :

$$\mu_i = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon},$$

где $f_\mu = \left[1 - \exp(-0,025 R_y) \right]^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_\tau} \right)$; $R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_i}$; $R_\tau = \frac{\rho k^2}{\mu_i \varepsilon}$, y — расстояние от поверхности стенки, $C_\mu = 0,09$.

С помощью функции f_μ моделируется турбулентное течение. Кинетическая энергия турбулентности k и диссипация этой энергии ε определяются в результате решения соответствующих двух уравнений [4]. Для расчёта принято, что отношение средней пульсационной составляющей к среднemasсовой скорости потока 2 % и длина наибольшего завихрения 0,00067005025 м, что соответствует следующим значениям: $k = 1$ Дж/кг и $\varepsilon = 1$ Вт/кг.

Диффузионный тепловой поток моделируется с помощью уравнения:

$$q_k = - \left(\frac{\mu_i}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2, 3,$$

где $\sigma_c = 0,9$, Pr — число Прандтля, c_p — удельная теплоёмкость при постоянном давлении, T — температура жидкости. Расчёт будем производить для повышенной температуры окружающего воздуха, что соответствует критическому режиму работы.

Для нахождения искомого численного решения используется конечно-элементное разбиение по методу фиктивных областей, позволяющему рассчитывать течение в каналах сложной геометрии без усложнения алгоритма решения задачи. Формально расчётная сетка строится в параллелепипедаобразной области. Принята минимальная длина стороны параллелепипеда, достаточная для достоверного описания модели, — 0,004 м.

Исследование процессов на основании модели. В результате расчёта получены следующие исследуемые значения: радиатором отведено 957 Вт, температура на стенке блока 77 °С. При этом потеря напора 0,025 МПа. Среднее число Рейнольдса равно 3000, что соответствует турбулентному течению. Следовательно, теплоотдача недостаточная, несмотря на то, что значение потери напора не превышает допустимого.

Расчёт показывает, что на течение жидкости влияют процессы, происходящие вблизи стенки. Начиная с некоторого расстояния от входа в тракт радиатора, жидкость по всему попе-

речному сечению канала испытывает тормозящее действие сил вязкости, происходит изменение температур, как по сечению, так и по длине канала.

Жидкость поступает из трубопровода внешней системы термостабилизации в штуцер, затем проходит через него и попадает в общий канал, который на расстоянии 0,031 м разделяется на четыре равных канала с помощью направляющих рёбер, ширина которых — 0,008 м, глубина — 0,0145 м. Расчёт показывает, что свойства всех четырёх потоков аналогичны. Рассмотрим течение одного из них. Вблизи стенки в потоке жидкости формируется пограничный слой, в котором температура и скорость жидкости варьируются в диапазоне 0,374...0,578 м/с², и по мере отдаления от стенок скорость увеличивается, и образуется турбулентное ядро. На расстоянии 0,05...0,06 м от начала общего канала толщина пограничного слоя достигает середины ширины канала — 0,004 м.

Для качественного анализа теплообмена при движении жидкости в канале используется формула [5]:

$$\alpha \approx \frac{\lambda}{\delta_n} (t_{\text{ж}} - t_c), \quad (1)$$

где λ — теплопроводность жидкости; δ_n — толщина теплового пограничного слоя; $t_{\text{ж}}$ и t_c — температуры в центре потока и вблизи стенки, соответственно.

Из выражения (1) следует, что для увеличения теплообмена необходимо уменьшить толщину пограничного слоя. Для этого в канале радиатора выполняются выборки (рисунок 3) и располагаются относительно оси OX на расстоянии 0,056 м от входа в канал радиатора, глубиной (радиусом) 0,005 м. При этом потоки жидкости, попадающие в выборки, меняют направление движения, перемешивая её. Кроме этого, полезная площадь поверхности теплообмена увеличивается с 0,229 м² до 0,437 м².

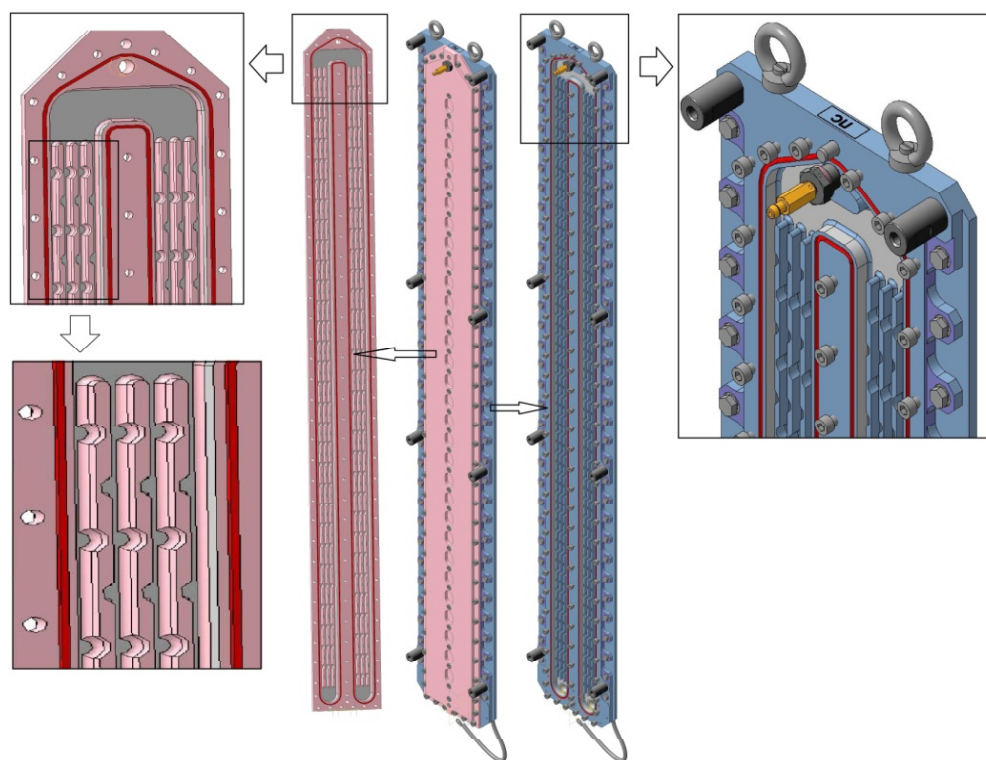


Рис. 3. Радиатор стойки диаграммообразующего устройства

Сравнивая эпюры скоростей, полученные в расчёте с учётом принятых решений, на расстоянии 0,056 м от входа в канал (см. рис. 4), можно сделать вывод, что добавление канавок меняет распределение скоростей жидкости в канале.

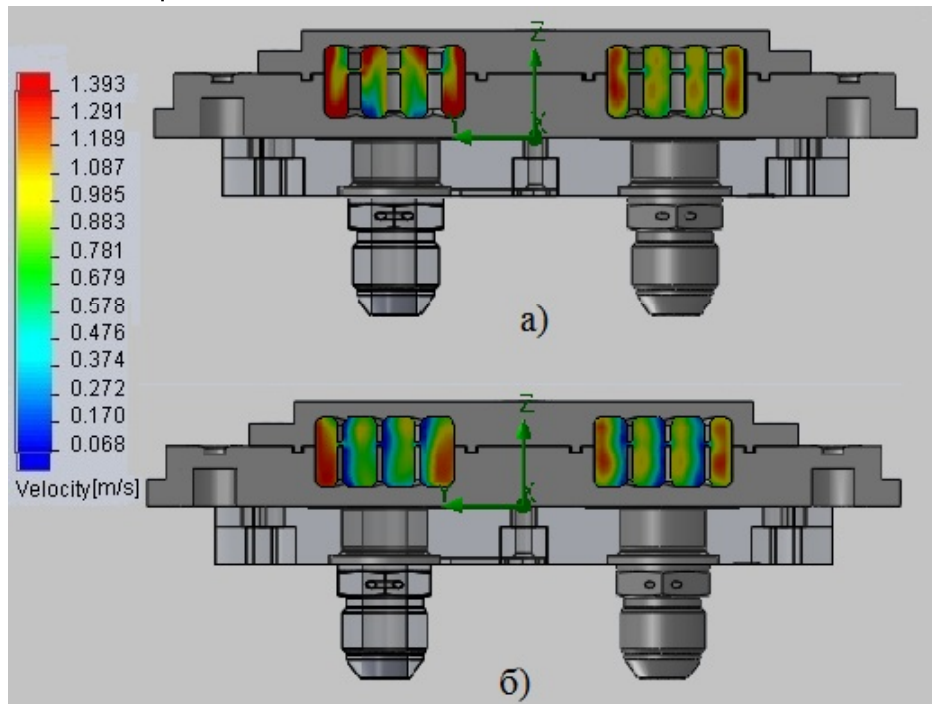


Рис. 4. Эпюра скоростей жидкости в сечениях канала радиатора:
а — без канавок на рёбрах, б — с канавками на рёбрах

На рисунке 5 показано изменение скорости в центре турбулентного ядра по длине канала. Скорость меняется при попадании жидкости в канавку. Таким образом, уменьшается толщина пограничного слоя, жидкость лучше перемешивается, и отводит большее количество тепла. В результате расчёта получены следующие значения: радиатором отведено 1185 Вт, температура на стенке блока 68 °С. При этом потеря напора 0,03 МПа. Результаты расчёта показывают, что теплоотдача эффективна, а значение потери напора не превышает допустимого.

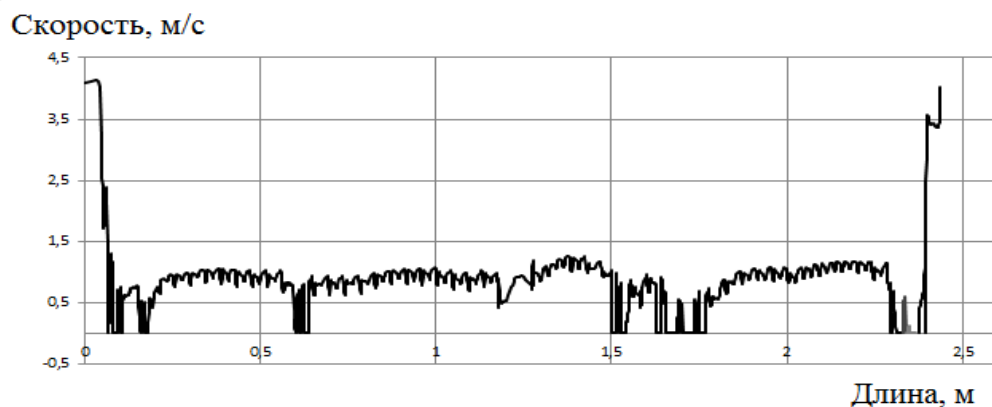


Рис. 5. Изменение скорости потока по длине канала

Для подтверждения правильности решения проведены испытания стойки и получены эмпирические характеристики потока жидкости. Испытания по определению количества отведённого тепла и потери напора проведены на экспериментальной установке, которая позволяла реализовать поток с расходом 25 л/мин при давлении жидкости на входе в канал до 1,0 МПа. Потеря

напора при давлении 0,75 МПа, соответствующем эксплуатационному, составила 0,03 МПа. Затем были проведены замеры потери напора при разных значениях давления. Данные опыты показали, что при любом давлении на входе в канал радиатора, которое реализовывала экспериментальная установка, потеря напора составляла 0,03 МПа. Отведённое тепло — 1180...1210 Вт. Следовательно, принятые конструктивно-технологические решения эффективны.

Для проверки герметичности радиатора и надёжной работы при возникновении гидравлического удара проведено с помощью гидравлического пресса испытание избыточным давлением, превышающим в несколько раз рабочее. При давлении 2,0 МПа в радиаторе отсутствовали падение давления и утечки. Таким образом, испытание на герметичность и гидравлический удар радиатор выдержал.

Заключение. Уравнениями Навье — Стокса с достаточной для практики точностью описали турбулентное течение. Полученные расчётные характеристики совпадают с экспериментальными и удовлетворяют требованиям технического задания.

Конструкция разработанного радиатора технологична. В процессе изготовления существует возможность производить обработку минимальным количеством инструмента и с минимальным количеством операций, повышая общую технологичность деталей [6]. В сборке используется стандартизированный крепёж, что улучшает ремонтпригодность. Используемые материалы обладают достаточной для данных условий эксплуатации прочностью, коррозионной стойкостью, лёгкостью, что немаловажно для бортовой аппаратуры. Сборка изделия не вызывает особой сложности и позволяет использовать средства автоматизации, такие как электроинструмент.

Применение разработанной системы позволяет: охлаждать бортовую аппаратуру, рассчитанную для работы в суровых климатических условиях, при пониженном атмосферном давлении и широком диапазоне температур $-50...+65$ °С; уменьшить массу на 30 %; сократить габариты блоков; повысить ремонтпригодность и обслуживание блоков РЭА.

Проведённые испытания стойки диаграммообразующих устройств с использованием имитатора системы жидкостного охлаждения позволяют утверждать, что применение разработанной системы охлаждения, основанной на жидкостном методе охлаждения, является эффективным способом отвода тепла и удовлетворяет требованиям технического задания.

Библиографический список

1. Волохов, В. А. Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов / В. А. Волохов, Э. Е. Хрычиков, В. И. Киселёв. — Москва: Сов. радио, 1975. — С. 123—125.
2. Варламов, Р. Г. Справочник конструктора РЭА. Общие принципы конструирования / Р. Г. Варламов. — Москва: Сов. радио, 1980. — С. 399—406.
3. Дударева, Н. Ю. Самоучитель SolidWorks 2006 / Н. Ю. Дударева, С. А. Загайко. — Санкт-Петербург: БВХ-Петербург, 2006. — 216 с.
4. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.] // SolidWorks 2007/2008. — Санкт-Петербург: БВХ-Петербург, 2008. — С. 913—930.
5. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел — Москва: Энергия, 1981. — 217 с.
6. Яновский, Г. А. Методика отработки конструкций на технологичность и оценки уровня технологичности изделий машиностроения и приборостроения / Г. А. Яновский. — Москва: Энергия, 1973. — 390 с.

Материал поступил в редакцию 20.06.2012.

References

1. Volokhov, V.A., Khrychikov, E.E., Kiselev, V.I. *Sistemy okhlazhdeniya teplonagruzhennykh radioelektronnykh priborov*. [Cooling systems for heat-loaded radio-electronic devices.] Moscow: Sovetskoye radio, 1975, pp. 123–125 (in Russian).
2. Varlamov, R.G. *Spravochnik konstruktora REA. Obshchiye printsipy konstruirovaniya*. [Handbook for designers of radio-electronic equipment. General principles of design.] Moscow: Sovetskoye radio, 1980, pp. 399–406 (in Russian).
3. Dudareva, N.Y., Zagayko, S.A. *Samouchitel SolidWorks 2006* [Self-teacher in SolidWorks 2006.] St. Petersburg: BVKh-Peterburg, 2006, 216 p. (in Russian).
4. Alyamovskiy, A.A., et al. *Kompyuternoye modelirovaniye v inzhenernoy praktike. SolidWorks 2007/2008*. [Computer simulation in engineering practice. SolidWorks 2007/2008.] St. Petersburg: BVKh-Peterburg, 2008, pp. 913–930 (in Russian).
5. Isachenko, V.P., Osipova, V.A., Sukomel, A.S. *Teploperedacha*. [Thermal transmission.] Moscow: Energiya, 1981, 217 p. (in Russian).
6. Yanovskiy, G.A. *Metodika otrabotki konstruksiy na tekhnologichnost i otsenki urovnya tekhnologichnosti izdeliy mashinostroyeniya i priborostroyeniya*. [Fabricability development techniques and evaluation of engineering and instrumentation product workability level.] Moscow: Energiya, 1973, 390 p. (in Russian).

RADIATOR DESIGN AS PART OF BEAMFORMER RACK

L. V. Glazunova, A. N. Solovyev

(Don State Technical University)

The design-engineering techniques to improve hydraulic and, accordingly, thermal characteristics of the liquid cooling radiator of the communications-electronics equipment (CEE) beamformer rack are presented. The liquid cooling method of CEE permitting to remove heat flows from small areas is considered. CAD-CAE simulation of the cooling fluid in the channel is performed, and its hydrodynamic characteristics at the preset parameters of the coolant and the environment are studied. The following tasks are solved: a beamformer rack solid model involving non-type designs is built, the mathematical simulation of the hydrodynamic processes is done, the technique of increasing the flow turbulence is developed, the numerical analysis of the proposed design is presented, the results of the theoretical research and the experiment are compared. The suggested design is producible, particularly the product assembly is not difficult and permits the use of automation devices, such as power tools.

Keywords: heat transfer, turbulence, pressure loss, hydraulic resistance, electronics cooling.