

10. Fletcher K. *Chislennyye metody na osnove metoda Galerkina* [Numerical methods based on Galerkin method]: perevod s angl, Moscow, Mir Publ., 1988. pp. 352.
11. Eglit M. E. *Neustanovivshiesya dvizheniya v ruslah i na sklonah* [Unsteady motion in channels and on slopes]. Moscow, MGU Publ. House, 1986, pp. 96.
12. Chen H., Lee C.F. Numerical simulation of debris flows. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, vol. 37, no. 1, pp. 146–160.
13. Mungkasi S., Stephen G. Roberts. A new analytical solution for testing debris avalanche numerical models. *ANZIAM J. 52 (CTAC2010)*, 2011, pp. C349–C363.
14. Mangeney A., Heinrich P., Roche R. Analytical Solution for Testing Debris Avalanche Numerical Models. *PA-GEOPH*, 2000, vol. 157. pp. 1081–1096.
15. Zahibo N., Pelinovsky E., Talipova T., Nikolkina I. The Savage-Hutter model for the avalanche dynamics in inclined channels: analytical solutions. *J. Geophys. Res.*, 2010, vol. 115.

УДК 519.688+681.3

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ¹

Статья поступила в редакцию 19.07.2016, в окончательном варианте – 27.07.2016.

Семененко Александр Николаевич, аспирант, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: tanmanianak@mail.ru

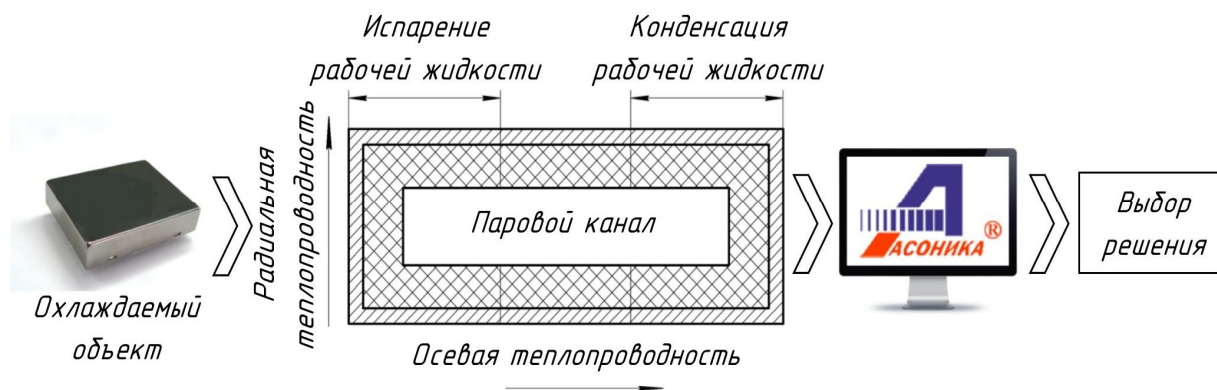
Максимкин Александр Игоревич, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», 115409, Российская Федерация, г. Москва, Каширское ш., 31, e-mail: avian4uk@gmail.com

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) выполняет всё большее количество функций, а ее аппаратно-технические решения становятся все сложнее. Одновременно возрастает и энергопотребление РЭА, что может ухудшать её тепловой режим и надежность эксплуатации, уменьшать сроки службы. Поэтому перед разработчиками РЭА стоит актуальная задача по снижению температуры работающей РЭА при помощи различных систем охлаждения. Существуют воздушные и жидкостные системы охлаждения РЭА. В их конструкциях используются радиаторы, тепловые трубы (ТТ), элементы Пельтье. В данной статье обоснована целесообразность использования ТТ при проектировании РЭА, особенно предназначенной для использования в качестве бортовой аппаратуры. Рассмотрены конструкции ТТ, принципы их работы, критерии выбора теплоносителей, материалов фитилей и корпусов. Кроме того, в статье представлена модель тепловых процессов ТТ и описаны системы охлаждения, использующие тепловые трубы. На основе проведенного исследования описан метод построения моделей тепловых процессов РЭА при наличии ТТ с использованием средства моделирования АСОНИКА-Т. Приведен пример использования предлагаемого метода для моделирования конкретной конструкции РЭА. Сделаны выводы по итогам проделанной работы.

Ключевые слова: тепловая труба, фитиль, рабочая жидкость, АСОНИКА, АСОНИКА-Т, модель тепловых процессов, радиоэлектронная аппаратура, тепловой режим, проектирование, системы охлаждения

Графическая аннотация (Graphical annotation)



¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-07-00422 «Информационно-измерительная система численного моделирования и мониторинга температурных полей электронных средств»).

METHOD OF THERMAL PROCESSES MODELS BUILDING IN THE PRESENCE OF HEAT PIPES

The article has been received by editorial board 04.05.2016, in a final version – 18.07.2016.

Semenenko Aleksandr N., post-graduate student, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: matanmaniak@mail.ru

Maksimkin Aleksandr I., post-graduate student, National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute, 31 Kashirskoe highway, Moscow, 115409, Russian Federation, e-mail: avian4uk@gmail.com

Uvaysov Saygid U., D.Sc. (Engineering), Professor, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Modern radioelectronic equipment (REE) performs an increasing number of functions, as a result their hardware and technology solutions are becoming more complex. At the same time the power consumption of REE increases, which is able to make worse its thermal mode and operating reliability, reduce its life time. Therefore developers of REE have an actual task to reduce operating temperature of REE by using different cooling systems. There are air and liquid cooling systems for REE. Their constructions use radiators, heat pipes (HP), Peltier elements. In this paper is justified the necessity of using HP in the design of REE, especially designated for use as onboard equipment. This article reviews designs of HP, the principles of HP's work, selection criteria of working liquids, wick's and body's materials of HP. Besides, in this article presents the model of thermal processes of HP; also are described cooling systems, based on HP. On the basis of performed research authors are described the method of building of models for thermal processes of REE in the presence of HP – with usage simulation tool ASONIKA-T. This paper presents an example of proposed method usage for modeling of the specific REE construction. At the end of article conclusions by results of work are drawn.

Keywords: heat pipe, wick, working liquid, ASONIKA, ASONIKA-T, model of thermal processes, radioelectronic equipment, thermal mode, design, cooling systems

Современная радиоэлектронная аппаратура (РЭА) имеет тенденцию к увеличению функциональности, усложнению конструкций, уменьшению их размеров. Одновременно, обычно, растет и энергопотребление РЭА на единицу объема. Ввиду низкого КПД большей части РЭА (5–10 %) тепловыделение в процессе ее работы также значительно, причем для некоторых классов аппаратуры оно происходит в достаточно ограниченных объемах. Такое тепловыделение приводит к перегреву функциональных узлов аппаратуры – например, электрорадиоизделий, установленных на печатных платах. Нарушение теплового режима РЭА критично в первую очередь для аппаратуры ответственного назначения, включая бортовую. Это особенно касается космической аппаратуры, к которой одновременно предъявляются жесткие требования по массогабаритным характеристикам и тепловому режиму. Кратковременные значительные нарушения теплового режима могут приводить к выходу РЭА из строя, а повышенные тепловые нагрузки в течение длительных периодов могут сокращать срок службы изделий, увеличивать аварийность работы РЭА в целом. Поэтому эффективное решение задач отвода тепла в РЭА, расположенной в ограниченных объемах, безусловно, является актуальной задачей. Одним из направлений решения этой задачи является применение тепловых труб (ТТ).

Согласно [3] ТТ длиной 0,5 м могут иметь эквивалентный коэффициент теплопроводности (КТ) до $(3 \dots 10) \cdot 10^{14}$ Вт/(мК) и выше. Масса единицы поверхности радиаторов лежит в пределах $(5 \dots 7)$ кг/м², а излучателей на основе ТТ – $(0,8 \dots 3)$ кг/м². Такие характеристики делают ТТ незаменимыми при охлаждении узлов космических аппаратов, другой бортовой аппаратуры.

В связи с необходимостью применения ТТ в РЭА, разработчики должны иметь возможность уже на этапе проектирования электронных устройств строить модели тепловых процессов (МТП) ТТ и проводить тепловое моделирование с учетом использования данного типа охлаждения. Безусловно, для данной цели могут применяться различные программные средства (включая основанные на использовании методов конечных разностей и конечных элементов), в т.ч. широко распространенные средства, применяемые в вузах [4, 9]. Однако для решения практических теплотехнических задач, связанных с использованием ТТ, они оказываются недостаточно удобными из-за необходимости программной реализации расчетных блоков с фазовыми превращениями, формирования сложных пространственных сеток и пр.

Анализ подсистемы АСОНИКА-Т [1, 19], специально предназначенной для проведения моделирования блоков РЭА на тепловые воздействия, показал, что она обладает всеми необходимыми возможностями для построения МТП ТТ и систем охлаждения на их основе. В данной статье представлен метод построения МТП при наличии ТТ, используемых для охлаждения РЭА. Для разработки (использования) данного метода необходимо понимать конструкцию ТТ, принцип их работы, особенности выбора конструкционных материалов ТТ и способы построения МТП ТТ.

Конструкция ТТ. Мы будем считать, что ТТ имеет следующие отличительные свойства: служит для направленной передачи тепла; представляет собой испарительно-конденсационное герметичное устройство использующее капиллярные силы (эффекты); работает по замкнутому циклу [8]. Внутренняя

поверхность стенок устройства (ТТ) покрыта слоем капиллярно-пористого материала (фитиль). После вакуумирования ТТ фитиль заполняется рабочей жидкостью (теплоносителем). Обычно ТТ состоит из трёх зон (рис. 1):

- 1) паровой канал (транспортная зона ТТ) – эта часть заполнена насыщенным паром рабочей жидкости;
- 2) зона подвода тепла ТТ – та ее часть, к которой подводится тепло, и в которой происходит испарение или кипение рабочей жидкости;
- 3) зона отвода тепла ТТ – та ее часть, к которой подводится тепло, переносимое паром рабочей жидкости (в этой зоне происходит конденсация пара).

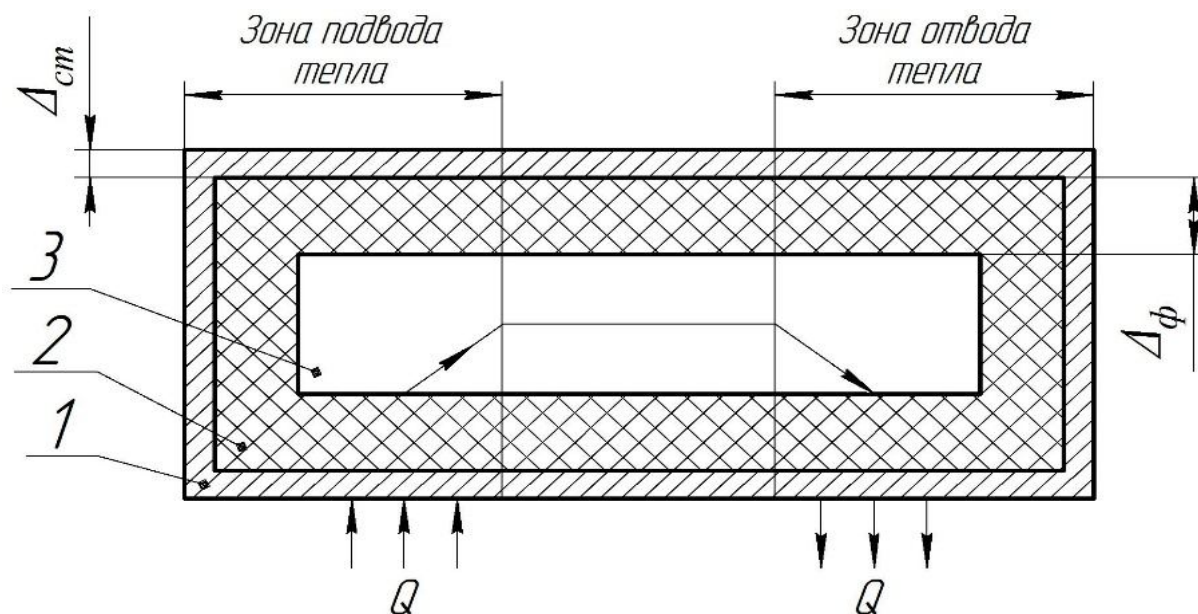


Рисунок 1 – Схема тепловой трубы: $\Delta_{ст}$ – толщина стенки корпуса; $\Delta_{ф}$ – толщина фитиля; Q – тепловой поток; 1 – корпус; 2 – фитиль; 3 – паровой канал

Принято делить ТТ на 7 видов [8] (табл. 1).

Таблица 1 – Виды тепловых труб

Вид ТТ	Рабочий температурный диапазон
Криогенная ТТ (КТТ)	Температура пара при работе ТТ ниже 200 К (ниже минус 73 °С)
Низкотемпературная ТТ (НТТ)	Температура пара при работе ТТ от 200 К (минус 73 °С) до 550 К (плюс 277 °С)
ТТ среднетемпературного диапазона (СТТ)	Температура пара при работе ТТ от 550 К (плюс 277 °С) до 750 К (плюс 477 °С)
Высокотемпературная ТТ (ВТТ)	Температура пара при работе ТТ выше 750 К (выше плюс 477 °С)
Регулируемая ТТ (РТТ)	Конструкция данного вида ТТ предусматривает возможность изменения её термического сопротивления
Газорегулируемая ТТ (ГРТТ)	РТТ, у которой стабилизация температуры части корпуса обеспечивается наличием в ней неконденсирующегося газа
Диодная ТТ (ДТТ)	РТТ, передающая тепло только в одном направлении и прекращающая работу при изменении направления теплового потока

Для охлаждения РЭА наиболее распространены НТТ [2]. Поэтому в данной статье рассматриваются МТП НТТ и системы охлаждения на их основе.

Принцип работы ТТ. Зона подвода тепла ТТ прикрепляется непосредственно к охлаждаемому узлу РЭА. Согласно [2, 16] работа ТТ заключается в следующем: тепло, подведенное к ТТ от узла РЭА, расходуется на испарение рабочей жидкости, заполняющей фитиль. Тем самым достигается охлаждение узла за счет «отъема» энергии, используемой для фазового перехода. В транспортной зоне поглощенное тепло переносится паром в зону отвода тепла. В последней происходит конденсация пара на поверхности

жидкости в фитиле с выделением переносимого тепла (энергии фазового перехода). Далее сконденсированная жидкость в результате действия капиллярных сил (капиллярного эффекта) по фитилю переносится (возвращается) в зону подвода тепла. Затем цикл повторяется.

При построении моделей ТТ за основу берётся расчёт тепло- и массопереноса. При этом проводится расчёт поля температуры по конструкции ТТ в стационарном и нестационарном режимах, а также расчёт значений теплового сопротивления ТТ [2].

Передача тепла к рабочей жидкости в фитиле происходит за счет теплопроводности через стенку трубки и в капиллярном слое фитиля [2]. Последний процесс достаточно сложный. Поэтому для упрощения расчёта передачи тепла при конструировании ТТ через фитиль вводится понятие эффективного КТ смоченного фитиля $\lambda_{\text{э}}$. Эксперименты с реальными ТТ показали, что можно принять $\lambda_{\text{э}} = \text{const}$ и использовать для их определения формулу [2]:

$$\lambda_{\text{э}} = \lambda_{\text{ж}} \cdot (\lambda_{\text{ж}} + \lambda_{\text{с}} - (1 - \varepsilon)(\lambda_{\text{ж}} - \lambda_{\text{с}})) \cdot (\lambda_{\text{ж}} + \lambda_{\text{с}} + (1 - \varepsilon)(\lambda_{\text{ж}} - \lambda_{\text{с}}))^{-1}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{ж}}$ – КТ жидкости; $\lambda_{\text{с}}$ – КТ «скелета» фитиля; ε – пористость фитиля.

В работе [12] представлены результаты анализа зависимости эффективного КТ смоченного фитиля $\lambda_{\text{э}}$ от КТ «скелета» фитиля $\lambda_{\text{с}}$ и пористости фитиля ε . Этот анализ показал, что эффективный КТ смоченного фитиля $\lambda_{\text{э}}$ прямо пропорционален КТ «скелета» фитиля и обратно пропорционален пористости фитиля. Если за рабочую жидкость взять воду, имеющую КТ 0,6 Вт/(мК), то для определения $\lambda_{\text{э}}$ целесообразно использовать следующее выражение:

$$\lambda_{\text{э}} = 0,6 \cdot (0,6 + \lambda_{\text{с}} - (1 - \varepsilon)(0,6 - \lambda_{\text{с}})) \cdot (0,6 + \lambda_{\text{с}} + (1 - \varepsilon)(0,6 - \lambda_{\text{с}}))^{-1}. \quad (2)$$

В наглядной форме зависимость $\lambda_{\text{э}}$ от влияющих факторов представлена на рисунке 2.

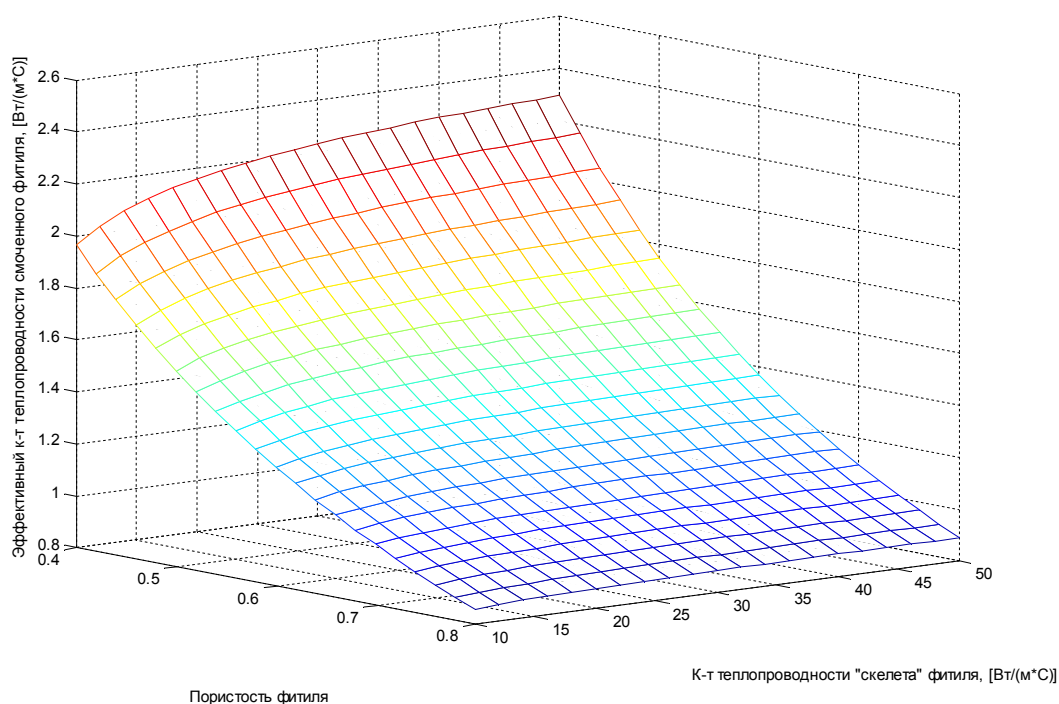


Рисунок 2 – График зависимости эффективного КТ смоченного фитиля ТТ, в которой рабочей жидкостью является вода

Выбор теплоносителя, материала «скелета» фитиля и стенки корпуса ТТ. Такой выбор является непростой задачей и относится к классу задач многокритериального принятия решений [11, 17]. Материал данного раздела можно рассматривать как справочный в отношении дальнейшего текста. Более подробно данный вопрос рассмотрен в специальной литературе [10, 18].

Согласно [10] к рабочей жидкости (РЖ) для ТТ предъявляются следующие основные требования.

1. Она должна обеспечивать передачу большого количества тепловой энергии.
2. Критические параметры РЖ должны быть существенно выше рабочих параметров устройства при рабочей температуре. Это обеспечивает необходимый запас при работе ТТ. При приближении температуры к критической параметры РЖ «ухудшаются», и способность теплоносителя проводить тепло

сильно снижается. Поэтому теплоноситель (РЖ) способен эффективно работать лишь в определённом рабочем диапазоне температур. В таблице 2 представлены некоторые теплоносители для НТТ с указанием приблизительных интервалов их рабочих температур [10].

Таблица 2 – Теплоносители для низкотемпературных ТТ

Теплоноситель	Приблизительный рабочий температурный диапазон, [°C]
Аммиак	От –60°C до +60°C
Фреон–21	От –50°C до +90°C
Ацетон	От –20°C до +100°C
Этанол	От +20°C до +120°C
Гептан	От +30°C до +160°C
Вода	От +40°C до +180°C

3. Давление насыщенных паров РЖ при рабочей температуре должно быть высоким. Это обеспечивает хорошую передачу тепловой энергии и небольшой перепад температур между зонами подвода и отвода тепла (а значит, невысокое тепловое сопротивление всей ТТ в целом).

4. РЖ, как правило, не должна содержать примесей.

5. РЖ не должна быть токсичной и взрывоопасной.

6. РЖ не должна вызывать коррозию фитиля и стенок корпуса ТТ. Также при их химическом взаимодействии не должны возникать неконденсирующиеся газы. В таблице 3 представлены некоторые теплоносители и конструкционные материалы, совместимые друг с другом [10] для использования в ТТ.

С точки зрения переноса тепловой энергии вода имеет преимущество перед остальными РЖ, используемыми в НТТ. Однако её недостаток заключается в том, что вода имеет относительно высокую температуру кристаллизации.

Таблица 3 – Совместимые теплоносители и некоторые конструкционные материалы

Конструкционный материал	Теплоносители
Нержавеющая сталь	Метанол, этанол, аммиак, фреоны
Никель	Вода, метанол, этанол, аммиак
Медь	Вода, метанол, ацетон, аммиак
Алюминий	Пропан, фреоны, ацетон

К фитилям предъявляются жёсткие требования по возможностям тепло- и массопереноса, технологичности изготовления и надёжности. Эти требования накладывают условия (ограничения) на выбор материала фитиля, его толщины и структуры (простые и составные фитили). При выборе конструкций и МТП НТТ очень важную роль играет правильный выбор толщины фитиля. Чрезмерно большая толщина фитиля создаёт повышенное тепловое сопротивление в радиальном направлении, что может вызвать перегрев и закипание рабочей жидкости НТТ внутри НТТ. Тепловое сопротивление в радиальном направлении также может повышаться из-за низкого эффективного КТ смоченного фитиля. Это можно заметить, проанализировав выражение для расчёта теплового сопротивления в радиальном направлении R_T^r :

$$R_T^r = R_{CT} + R_\phi = l_{CT} \cdot (\lambda_{CT} \cdot S)^{-1} + l_\phi \cdot (\lambda_\phi \cdot S)^{-1}, \quad (3)$$

где R_{CT} – тепловое сопротивление стенки; R_ϕ – тепловое сопротивление фитиля; l_{CT} , l_ϕ – толщина стенки корпуса и смоченного фитиля (в зоне подвода/отвода тепла) соответственно; λ_{CT} – КТ материала стенки; S – площадь зоны подвода (отвода тепла).

Толщина смоченного фитиля может не равняться геометрической толщине фитиля. Степень «заглубления» рабочей жидкости в фитиль зависит от режима работы ТТ и от рабочей температуры. Рекомендации по вычислению толщины смоченного фитиля для НТТ приведены в [7].

К материалам корпусов ТТ предъявляют следующие требования: высокий КТ; совместимость с теплоносителем; стойкость к внешним воздействиям.

Таким образом, выбор решений по использованию ТТ, фактически, является подклассом задач «связанного» выбора нескольких решений, относящихся к различным «компонентам» ТТ. При этом необходимо учитывать соображения группового управления рисками [20], связанными с использованием различных компонент ТТ, в т.ч. при нарушении температурных диапазонов принятых при проектировании устройств; старения материалов, используемых в ТТ и пр.

Задачи, решаемые при помощи ТТ. Системы охлаждения на основе ТТ. К задачам, решаемым с использованием систем охлаждения на основе ТТ, относятся следующие [2].

1. Уменьшение теплового сопротивления между источником (охлаждаемый узел РЭА) и стоком тепла.
2. Обеспечение необходимого теплового режима труднодоступных узлов РЭА.

3. Выравнивание температурного поля конструкций РЭА и теплоотводов.
 4. Отвод тепла от узлов, расположенных в разных участках РЭА, и передача его к одному стоку, в котором созданы наилучшие условия для охлаждения (отвода тепла).
 5. Уменьшение массы и объёма системы охлаждения РЭА и всего устройства в целом.
- Для охлаждения узлов РЭА используются не сами ТТ, а системы охлаждения, выполненные на их основе. Наиболее распространена схема, показанная на рисунке 3 [2].

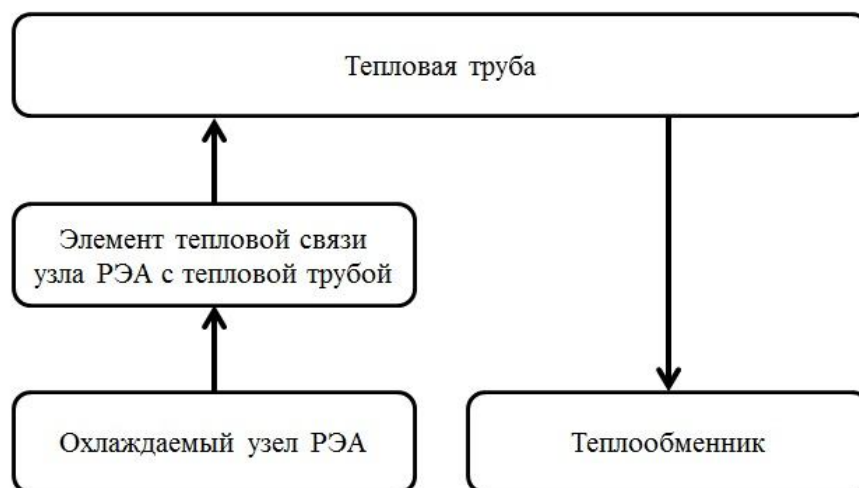


Рисунок 3 – Структурная схема системы охлаждения на основе ТТ

В роли теплообменника может выступать внешняя газообразная или жидкостная среда, а также специальная конструкция, увеличивающая поверхность теплоотдачи во внешнюю среду.

Представленная на рисунке 3 структурная схема имеет некоторые разновидности. Отсутствие элемента тепловой связи узла РЭА с ТТ означает то, что ТТ непосредственно устанавливается на охлаждаемый узел РЭА (в т.ч. и с использованием термопасты для исключения дополнительного теплового сопротивления в воздушном зазоре). При таком способе крепления необходимо учитывать контактное тепловое сопротивление (КТС), возникающее между поверхностью ТТ и охлаждаемым элементом [5, 13].

Иногда для увеличения удельной площади теплоотдачи поверхность ТТ в зоне отвода тепла делают оребренной – ребристой или штыревой. Кроме того, сам материал поверхности может быть сделан более шероховатым – за счёт механической или химической обработки.

Отметим, также, что ТТ потенциально имеют большую надежность по сравнению с устройствами охлаждения, содержащими движущиеся механические части (для определенности – вентиляторами). Кроме того, по сравнению с вентиляторами они не требуют электропитания, что также важно с позиций управления рисками [6, 20]. Таким образом, использование ТТ может рассматриваться и как средство «управления рисками», связанными с эксплуатацией РЭА.

В любом случае адекватный выбор решений на основе ТТ требует выполнения расчетов по апробированным формулам и/или применения методов имитационного моделирования.

Метод построения моделей тепловых процессов при наличии тепловых труб, используемых для охлаждения РЭА. Предлагаемый в работе метод построения МТП при наличии ТТ ориентирован на подсистему моделирования АСОНИКА-Т. Однако им можно пользоваться и при применении других средств моделирования, в том числе входящих в САПР.

Метод предусматривает выполнение следующих шагов.

1 шаг. Анализ технического задания и чертежей РЭА, тепловой режим которой необходимо изучить (оценить).

2 шаг. Анализ системы охлаждения, построенной на основе ТТ, используемой в рассматриваемом РЭА: тип, конструкция, способ крепления ТТ к охлаждаемому узлу, применяемые конструкционные материалы корпуса ТТ и фитиля.

3 шаг. Задание упрощений для исследуемой конструкции и системы охлаждения.

4 шаг. Разбивка конструкции РЭА и системы охлаждения на изотермические объёмы, которым ставятся в соответствие узлы графа. Затем определяются типы тепловых связей между узлами. Каждой связи соответствует своя ветвь в расчетной схеме подсистемы АСОНИКА-Т.

5 шаг. Для каждой ветви вводятся свои параметры. Они определяются, исходя из конструкций РЭА и системы охлаждения, применяемых материалов, условий окружающей среды и т.д.

6 шаг. Вводится МТП в рабочую область подсистемы АСОНИКА-Т.

7 шаг. Проводится моделирование, его результаты анализируются.

8 шаг. Если полученные результаты физически неадекватны или не удовлетворяют требованиям технического задания на систему охлаждения, то производят коррекцию технического решения и его модели. Затем возвращаются на этап повторного проведения моделирования. Если полученные результаты приемлемы, то поставленную задачу можно считать достигнутой.

К данной последовательности этапов следует сделать три примечания.

1. Описанная последовательность этапов, в принципе, может быть модифицирована для получения оптимального решения из числа полностью удовлетворяющих техническому заданию. При этом выбор критерия оптимальности (целевой функции) в общем случае будет представлять собой весьма непростую задачу – что достаточно характерно для многокритериальных решений [11, 17].

2. Потенциально возможен вариант, когда все «испробованные» путем моделирования конструктивные (технические) решения не будут удовлетворять требованиям технического задания. В этом случае может оказаться необходимым изменение конструкции РЭА и/или переформулирование требований технического задания – в т.ч. за счет изменения массогабаритных характеристик изделия и пр.

3. Необходимо использовать компромисс между сложностью МТП и точностью результатов моделирования при задании упрощений конструкции.

Разработанный метод является весьма эффективным при моделировании и проектировании систем охлаждения РЭА, в т.ч. использующих ТТ.

Построение МТП НТТ в подсистеме АСОНИКА-Т. Если тепло через смоченный фитиль в радиальном направлении передаётся посредством эффективной теплопроводности, а кипение рабочей жидкости в зоне подвода тепла отсутствует, то перенос тепла в НТТ определяют следующие три процесса (см. рис. 4):

- 1) теплопроводность через стенку корпуса и смоченный фитиль в радиальном направлении в зонах отвода и подвода тепла;
- 2) осевая теплопроводность вдоль конструкции ТТ;
- 3) перенос тепла в паровом канале.

Построение модели целесообразно проводить в подсистеме АСОНИКА-Т, являющейся частью системы АСОНИКА. Использование данной подсистемы при проведении моделирования подробно описано в [1, 14, 15, 19]. Введём несколько упрощений для построения МТП.

1. Примем, что конструкция ТТ такова, что можно пренебречь осевой теплопроводностью вдоль конструкции ТТ.

2. Будем считать $\lambda_j = const$ на всём протяжении конструкции ТТ в радиальном и осевом направлениях.

3. Толщину стенки и фитиля примем постоянной на всём протяжении конструкции ТТ.

4. Кипение рабочей жидкости в области подвода тепла будем считать отсутствующим.

5. Тепловое сопротивление парового канала ТТ примем пренебрежимо малым.

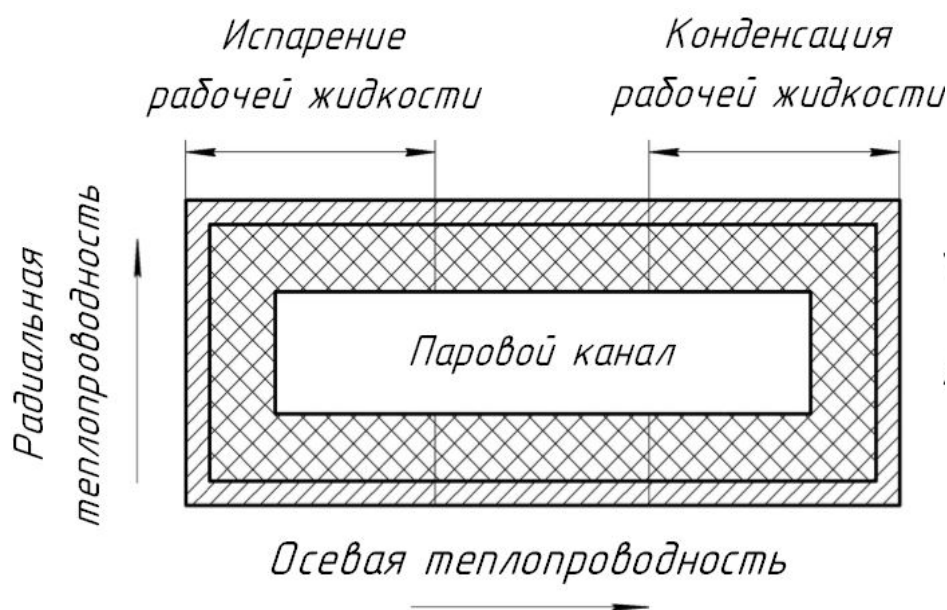


Рисунок 4 – Схема переноса тепла в тепловой трубе

На рисунке 5 представлена МТП НТТ, построенная в подсистеме АСНИКА-Т.

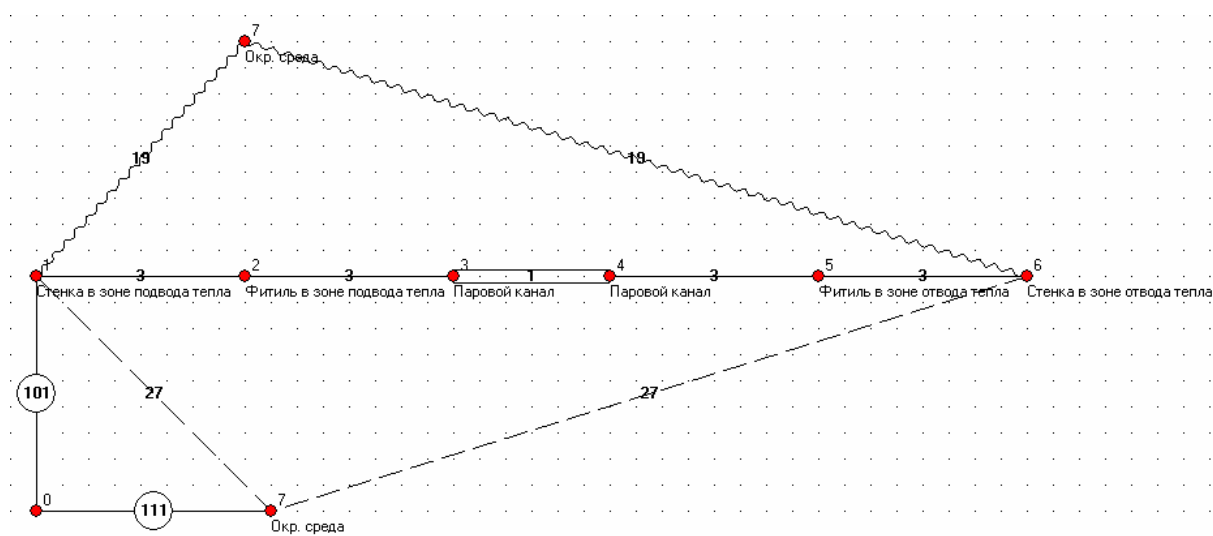


Рисунок 5 – МТП НТТ в подсистеме АСНИКА-Т

При построении МТП НТТ в подсистеме АСНИКА-Т, представленной на рис.5, использованы следующие ветви МТП (табл. 4).

Таблица 4 – Ветви МТП, используемые при построении МТП НТТ в подсистеме АСНИКА-Т

№ ветви	Описание
1	Заданное тепловое сопротивление
3	Вычисляемое тепловое сопротивление в цилиндрической системе координат в радиальном направлении
19	Излучение с неразвитой цилиндрической поверхности
27	Естественная конвекция с неразвитой горизонтальной цилиндрической поверхности в окружающую среду
101	Источник постоянной мощности
111	Источник постоянной температуры

Целесообразно МТП ТТ в виде эквивалентной схемы представить с использованием теплового сопротивления R_{TT} , определяемого по формуле:

$$R_{TT} = \Delta T / P, \quad (4)$$

где ΔT – разность температур стенок в зонах подвода и отвода тепла; P – подводимая к ТТ мощность.

Пример моделирования. Ниже приведен пример моделирования конструкции с НТТ согласно разработанному методу. Дана печатная плата, на которой смонтирован DC/DC-преобразователь, «конвертирующий» постоянное напряжение величиной 27В в 12В (такое напряжение необходимо для питания остальных электронных компонентов на плате). При этом мощность тепловыделения преобразователя составляет 5 Вт. Для терморегулирования преобразователя используется НТТ, характеристики которой представлены в таблице 5. Печатная плата располагается в блоке, среднее значение температуры внутри которого составляет 50 °С.

Таблица 5 – Характеристики используемой НТТ

Параметр	Величина
Теплоноситель	Вода
Материал корпуса	Медь
Материал фитиля	Медь
Диаметр, мм	6
Длина, мм	150
Длина зоны подвода тепла, мм	67
Длина зоны отвода тепла, мм	20
Пористость фитиля	0,7
Крепление НТТ к охлаждаемой поверхности	При помощи термопасты КПТ-8

Изготовление фитиля выполняется методом спекания медного порошка при 850°C внутри трубы, которая в дальнейшем станет корпусом ТТ. Фитиль припекается к стенке корпуса ТТ, что делает её конструкцию более прочной. Для того чтобы в изделии осталось место под паровой канал, в корпус ТТ на период процесса спекания вставляют сердечник из нержавеющей стали. Поскольку медь не припекается к нержавеющей стали, сердечник легко демонтируется по завершении процесса спекания.

Согласно выражению (2) и характеристикам НТТ, представленным в таблице 5, эффективный КТ смоченного фитиля $\lambda_{\text{ж}} = 1,11 \text{ Вт/(мК)}$. При построении МТП для рассматриваемой конструкции были приняты следующие упрощения.

1. Принимаем DC/DC-преобразователь за один изотермический объём.
2. Пренебрегаем конвекцией и излучением с торцов DC/DC-преобразователя.
3. Пренебрегаем взаимодействием за счет теплопередачи DC/DC-преобразователя с печатной платой и другими элементами на этой плате.
4. Пренебрегаем излучением между НТТ и DC/DC-преобразователем, печатной платой и элементами на плате.

В блоке, в котором установлена данная плата, выделена область, в которой созданы максимально благоприятные условия для отвода тепла. В этой области значение температуры составляет 50 °C. К данной области подводится НТТ. МТП исследуемой конструкции аналогична МТП, представленной на рисунке 5. Отличие заключается в том, что добавляется восьмой узел (преобразователь), являющийся источником тепловыделения и соединённый с узлом 1 при помощи ветви № 1. Кроме того, значение температуры узла 6 задано на уровне 50 °C.

В результате проведённого моделирования были получены следующие результаты (табл. 6).

Таблица 6 – Результаты моделирования работы ТТ

Имя узла	Температура, °C
Стенка в зоне подвода тепла	68,4
Фитиль в зоне подвода тепла	68,4
Паровой канал	66,2
Паровой канал	57,4
Фитиль в зоне отвода тепла	50,0
Стенка в зоне отвода тепла	50,0
Окружающая среда	50,0
Преобразователь	70,9

Как видно из полученных результатов НТТ обеспечивает эффективную терморегуляцию DC/DC-преобразователя, не позволяя ему перегреваться.

По результатам проведённых исследований были сделаны следующие **выводы**.

1. Системы охлаждения на основе ТТ являются достаточно эффективными для обеспечения терморегулирования узлов РЭА, имеют невысокую стоимость и хорошую надёжность эксплуатации.
2. Для поддержания требуемого теплового режима в РЭА целесообразно применение НТТ.
3. Подсистема АСОНИКА-Т позволяет удобно строить МТП ТТ и систем охлаждения на их основе.
4. Разработан метод построения МТП при наличии ТТ, используемых для охлаждения РЭА.
5. Представлен пример построения МТП конкретной конструкции, содержащей НТТ и результаты ее моделирования.

Список литературы

1. Автоматизированная система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учётом внешних воздействий / под. ред. А. С. Шалумова. – Москва : Радиотехника, 2013. – 424 с.
2. Алексеев В. А. Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры / В. А. Алексеев, В. А. Арефьев. – Москва : Энергия, 1979. – 128 с.
3. Алексеев С. В. Низкотемпературные тепловые трубы для космической техники : в 2 т. / С. В. Алексеев, И. Ф. Прокопенко, Б. И. Рыбкин. – Москва : Типография «Новости», 2006. – Т. 1. Проблемы обеспечения работоспособности. – 240 с.
4. Аминев Д. А. Анализ принципов построения аппаратно-программного комплекса для диагностического моделирования разнородных физических процессов в радиоэлектронной аппаратуре / Д. А. Аминев, Н. Н. Кокин, С. У. Увайсов, А. Н. Тихменев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 3. – С. 129–141.
5. Аминев Д. А. Метод расчёта погрешностей измерений температур электрорадиоэлементов печатного узла / Д. А. Аминев, А. И. Манохин, А. Н. Семенов, С. У. Увайсов // Измерительная техника. – 2015. – № 5. – С. 45–47.
6. Брумштейн Ю. М. Анализ некоторых моделей группового управления рисками / Ю. М. Брумштейн, О. Н. Выборнова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2016. – № 2. – С. 64–72.
7. Воронин В. Г. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов / В. Г. Воронин, А. В. Ревякин, В. Я. Сасин, В. С. Тарасов. – Москва : Машиностроение, 1976. – 200 с.

8. ГОСТ 23073-78. Трубы тепловые. Термины, определения и буквенные обозначения. – Введен 1979–07–01. – Москва : Госстандарт России, 1979. – 5 с.
9. Жилин Л. Э. Анализ номенклатуры программных средств массового использования, применяемых в российских вузах (на примере Астраханского государственного университета) / Л. Э. Жилин, А. Н. Горбачева, Ю. М. Брумштейн, Е. Ю. Васильковский // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. № 2. С. 20–37.
10. Ивановский М. Н. Технологические основы тепловых труб / М. Н. Ивановский, В. П. Сорокин, Б. А. Чулков, И. В. Ягодкин. – Москва : Атомиздат, 1980. – 160 с.
11. Измаилов А. Ф., Солодов М. В. Численные методы оптимизации / А. Ф. Измаилов, М. В. Солодов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 с.
12. Кофанов Ю. Н. Модели тепловых процессов систем охлаждения с использованием тепловых труб, с плавящимся рабочим веществом, термоэлектрической системы охлаждения для автоматизированного анализа тепловых процессов / Ю. Н. Кофанов, А. И. Манохин, А. В. Сарафанов // Системотехника. – 2006. – № 4.
13. Панасик Д. С. Зависимость контактного теплового сопротивления от силы прижима термодпары к электроразрядному элементу / Д. С. Панасик, И. А. Иванов, А. Н. Семенов, С. У. Увайсов // Надёжность и качество : труды международного симпозиума. – 2015. – Т. 2. – С. 305–306.
14. Семенов А. Н. Применение системы АСОНИКА при проектировании радиоэлектронных средств / А. Н. Семенов, П. О. Керре, А. С. Роткевич, А. И. Максимкин и др. // Динамика сложных систем – XXI век. – 2013. – Т. 7, № 1. – С. 35–41.
15. Семенов А. Н. Методика применения системы АСОНИКА при моделировании тепловых процессов блоков и печатных узлов / А. Н. Семенов, Б. Л. Линецкий, И. А. Иванов, С. У. Увайсов // Динамика сложных систем – XXI век. – 2014. – Т. 8, № 5. – С. 3–9.
16. Семенов А. Н. Разработка методики идентификации тепловых параметров, методов охлаждения и моделирования тепловых процессов в радиоэлектронных средствах произвольной конструкции / А. Н. Семенов, М. А. Шалумов, А. В. Малов, О. Е. Куликов // Динамика сложных систем – XXI век. – 2012. – Т. 6, № 3. – С. 106–110.
17. Соболев Б. В. Методы оптимизации : практикум / Б. В. Соболев, Б. Ч. Месхи, Г. И. Каныгин. – Ростов н/Д : Феникс, 2009. – 380 с.
18. Чи С. Тепловые трубы: Теория и практика / С. Чи; пер. с англ. В. Я. Сидорова. – Москва : Машиностроение, 1981. – 207 с.
19. Шалумов А. С. Автоматизированная система АСОНИКА для проектирования высоконадёжных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий / А. С. Шалумов, Н. В. Малютин, Ю. Н. Кофанов, Д. А. Способ, В. В. Жаднов, В. Н. Носков, А. С. Ващенко. – Москва : Энергоатомиздат, 2007. – Т. 1. – 368 с.
20. Юрков Н. К. К проблеме моделирования риска отказа электронной аппаратуры длительного функционирования / Н. К. Юрков, И. И. Кочегаров, Д. Л. Петрянин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 4. – С. 220–231.

References

1. Shalumov A. S. (ed.) *Avtomatizirovannaya sistema ASONIKA dlya modelirovaniya fizicheskikh protsessov v radioelektronnykh sredstvakh s uchetom vneshnikh vozdeystviy* [Automated system ASONIKA for modelling of physical processes in radio-electronic means taking into account external influences], Moscow, Radiotekhnika Publ., 2013. 424 p.
2. Alekseev V. A., Arefev V. A. *Teplovye truby dlya okhlazhdeniya i termostatirovaniya radioelektronnoy apparatury* [Heat pipes for cooling and temperature control of electronic equipment], Moscow, Energiya Publ., 1979. 128 p.
3. Alekseev S. V., Prokopenko I. F., Rybkin B. I. *Nizkotemperaturnye teplovye truby dlya kosmicheskoy tekhniki* [Low-temperature heat pipes for space applications], Moscow, Tipografiya «Novosti» Publ., Vol. 1. The problem of providing health, 2006. 240 p.
4. Aminev D. A., Kokin N. N., Uvajsov S. U., Tihmenev A. N. *Analiz printsipov postroeniya apparatno-programmnogo kompleksa dlya diagnosticheskogo modelirovaniya raznorodnykh fizicheskikh protsessov v radioelektronnoy apparature* [Analysis of construction principles of hardware and software complex for diagnostic simulation heterogeneous physical processes in electronics]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2013, no. 3, pp. 129–141.
5. Aminev D. A., Manohin A. I., Semenenko A. N., Uvajsov S. U. *Metod rascheta pogreshnostey izmereniy temperatury elektroradioelementov pechatnogo uzla* [Method of calculating errors of measurement of the temperatures of the electronic components of a printed circuit Assembly]. *Izmeritel'najatehnika* [Measurement techniques], 2015, no. 5, pp. 45–47.
6. Brumshteyn Ju. M., Vybornova O. N. *Analiz necotorykh modeley gruppovogo upravleniya riskami* [Analyze of some models of group risk management]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2016, no. 2, pp. 64–72.
7. Voronin V. G., Revjakin A. V., Sasin V. Ja., Tarasov V. S. *Nizkotemperaturnye teplovye truby dlya letatelnykh apparatov* [Low temperature heat pipes for flying apparatus], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 200 p.
8. GOST 23073-78. Pipe heat. Terms, definitions and letter symbols. Introduced 197–07–019. Moscow, Gosstandart Publ., 1979. 5 p.
9. Zhilin L. Je., Gorbacheva A. N., Brumshteyn Ju. M., Vas'kovskij E. Ju. *Analiz nomenklatury programnykh sredstv massovogo ispolzovaniya, primenyaemykh v rossiyskikh vuzakh (na primere Astrahanskogo gosudarstvennogo universiteta)* [The nomenclature analysis of mass usage software, applied in Russian Universities (on the example of Astrakhan State University)]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 2, pp. 20–37.
10. Ivanovskij M. N., Sorokin V. P., Chulkov B. A., Jagodkin I. V. *Tekhnologicheskie osnovy teplovykh trub* [Technological foundations of heat pipes], Moscow, Atomizdat Publ., 1980. 160 p.

11. Izmailov A. F., Solodov M. V. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods], Moscow, FIZMATLIT Publ., 2003. 304 p.
12. Kofanov Yu. N., Manohin A. I., Sarafanov A. V. Modeli teplovykh protsessov system okhlazhdeniya s ispolzovaniem teplovykh trub, s plavyashchimsya rabochim veshchestvom, termoelektricheskoy sistemy okhlazhdeniya dlya avtomatizirovannogo analiza teplovykh protsessov [Models of thermal processes of cooling systems using heat pipes with consumable working substance, thermoelectric cooling system for automated analysis of thermal processes]. *Sistemotekhnika* [Systems Engineering], 2006, no. 4.
13. Panasik D. A., Ivanov I. A., Semenenko A. N., Uvajsov S. U. Zavisimost kontaktnogo teplovogo soprotivleniya ot sily prizhima termopary k elektroradioelementu [The dependence of the contact thermal resistance on the strength of pressure thermocouple to electro-radio element]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium], 2015, vol. 2, pp. 305–306.
14. Semenenko A. N., Kerre P. O., Rotkevich A. S., Maksimkin A. I., et al. Primenenie sistemy ASONIKA pri proektirovanii radioelektronnykh sredstv [The application of the system ASONIKA for designing the electronic funds]. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek* [Dynamics of Complex Systems – XXI century], 2013, vol. 7, no. 1, pp. 35–41.
15. Semenenko A. N., Lineckij B. L., Ivanov I. A., Uvajsov S. U. Metodika primeneniya sistemy ASONIKA pri modelirovanii teplovykh protsessov blokov i pechatnykh uzlov [Method of application of the system ASONIKA for simulation of heat processes, units and printed circuit assemblies]. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek* [Dynamics of Complex Systems – XXI century], 2014, vol. 8, no. 5, pp. 3–9.
16. Semenenko A. N., Shalumov M. A., Malov A. V., Kulikov O. E. Razrabotka metodiki identifikatsii teplovykh parametrov, metodov okhlazhdeniya i modelirovaniya teplovykh protsessov v radioelektronnykh sredstvakh proizvolnoy konstrukcii [Development of methods of identification of thermal parameters, methods of cooling and modelling of thermal processes in radio-electronic means of any design]. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek* [Dynamics of Complex Systems – XXI century], 2012, vol. 6, no. 3, pp. 106–110.
17. Sobol B. V., Meshi B. Ch., Kanygin G. I. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2009. 308 p.
18. Chi S. *Teplovye truby: Teoriya i praktika* [Heat pipes: Theory and practice], Moscow. Mashinostroyeniye Publ., 1981. 207 p.
19. Shalumov M. A., Malutin N. V., Kofanov Yu. N., Sposob D. A., Zhadnov V. V., Noskov V. N., Vachenko A. S. Avtomatizirovannaya sistema ASONIKA dlya modelirovaniya vysokonadezhnykh radioelektronnykh sredstv na printsipakh CALS-tehnologii [Automated system ASONIKA for modeling high reliability radio-electronic means taking into account CALS-technology], Moscow, Energoatomizdat Publ., 2007. 368 p.
20. Jurkov N. K., Kochegarov I. I., Petranin D. L. K problem modelirovaniya riska otказа elektronnoy apparatury dlitel'nogo funktsionirovaniya [To the problem of modeling the risk of failure of long functioning electronic equipment]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 220–231.

УДК 004.942

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ СКИПА В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ANSYS MAXWELL¹

Статья поступила в редакцию 21.06.2016, в окончательном варианте – 28.07.2016.

Жаутиков Бахыт Ахатович, первый проректор, доктор технических наук, профессор, Атырауский государственный университет имени Х. Досмухамедова, 060011, Республика Казахстан, г. Атырау, пр. Студенческий, 212, e-mail: bakhyt.zhautikov@atgu.kz

Айкеева Алтын Аманжоловна, кандидат технических наук, доцент, Карагандинский государственный университет имени академика Е. А. Букетова, 100028, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Университетская, 28, e-mail: aikееva@mail.ru

Жаутиков Фархат Бахытович, магистр технических наук, Карагандинский государственный индустриальный университет, 101400, Республика Казахстан, г. Темиртау, пр. Республики, 30, e-mail: farhat_zhautikov@mail.ru

Роговая Ксения Сергеевна, магистр технических наук, Карагандинский государственный университет имени академика Е. А. Букетова, 100028, Республика Казахстан, г. Караганда, ул. Университетская, 28, e-mail: ksusharogovaya@mail.ru

Мухтарова Перизат Асхатовна, студент, Азиатско-Тихоокеанский университет технологий и инноваций, 57000, Малайзия, Куала-Лумпур, Technology Park Malaysia, Bukit Jalil, e-mail: mukhtarova_p@mail.ru

¹ Статья написана на основании результатов исследований, выполняемых в рамках грантового финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан по приоритету «Энергетика и машиностроение» по теме № 0686/ГФ4 «Разработка системы автоматического управления и комплексной защиты энергосберегающей электромагнитной подъемной установки».