

*Толокнов К.В., Соловьев Е.Д.,
студенты 1-го курса магистратуры
факультета «Ракетно-космической техники»
БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова
Россия, г. Санкт-Петербург*

**ПЕРСПЕКТИВЫ АДДИТИВНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ
ТРУБ ДЛЯ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

***Аннотация:** В статье рассмотрены роль тепловых труб в системах обеспечения теплового режима космических аппаратов и возможности их изготовления методом лазерного сплавления в порошковом слое. Описаны принцип работы тепловой трубы, назначение капиллярной структуры и основные технологические ограничения печати. Рассмотрено применение неявного моделирования в nTop для построения капиллярных структур и обоснована необходимость изготовления первичного образца с последующей проверкой его работоспособности.*

***Ключевые слова:** космический аппарат, система обеспечения теплового режима, тепловая труба, капиллярная структура, лазерное сплавление в порошковом слое, неявное моделирование, nTop.*

*K. V. Toloknov, E. D. Solovyov,
first-year master's students, Faculty of Rocket and Space Engineering
Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F.
Ustinov
Saint Petersburg, Russia*

PROSPECTS FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF HEAT PIPES FOR SPACECRAFT THERMAL CONTROL SYSTEMS

Annotation: *The article considers the role of heat pipes in spacecraft thermal control systems and the possibility of manufacturing them by laser powder bed fusion. The operating principle of a heat pipe, the function of its capillary structure, and the main manufacturing limitations are described. The use of implicit modeling in nTop for capillary structure design is discussed, along with the need to fabricate a primary specimen and verify its performance.*

Key words: *spacecraft, thermal control system, heat pipe, capillary structure, laser powder bed fusion, implicit modeling, nTop.*

Система обеспечения теплового режима космического аппарата

Система обеспечения теплового режима (СОТР) представляет собой комплекс взаимосвязанных подсистем, агрегатов и элементов конструкции, предназначенных для поддержания условий, необходимых для нормального функционирования космического аппарата (КА). К ее функциям относятся поддержание температуры элементов конструкции, обеспечение требуемого состояния газовой среды герметичных отсеков, перераспределение тепловых потоков и отвод избыточных тепловыделений в окружающее пространство [1, с. 6].

В принятой в учебном пособии С. И. Королева классификации выделяются активные системы, пассивные и полупассивные средства терморегулирования. К последним отнесены тепловые трубы, тепловые аккумуляторы и электрические нагреватели [1, с. 6]. К СОТР предъявляются требования по надежности, эффективности, минимальной массе и энергопотреблению. Их разработка усложняется ростом мощности и плотности размещения оборудования, увеличением срока активного существования КА, повышением требований к температурной стабильности и нестационарным характером тепловых воздействий [1, с. 7–8]. Одним из

перспективных средств перераспределения тепла являются тепловые трубы [1, с. 8].

Тепловые трубы как элемент СОТР

Тепловая труба представляет собой герметичное двухфазное теплопередающее устройство. В зоне испарения рабочее тело поглощает тепло и переходит в парообразное состояние. Пар перемещается к зоне конденсации, отдает теплоту и превращается в жидкость, которая возвращается к испарителю по капиллярной структуре. Такой перенос не требует внешнего насоса и движущихся механических элементов [2].

Работоспособность тепловой трубы определяется согласованностью корпуса, рабочего тела и капиллярной структуры. Корпус должен сохранять герметичность, рабочее тело – соответствовать температурному диапазону и материалу корпуса, а капиллярная структура – создавать достаточное давление возврата жидкости без чрезмерного гидравлического сопротивления. Поэтому ее оценивают по пористости, эффективному радиусу пор и проницаемости [4].

Капиллярные структуры и металлическая порошковая печать

В тепловых трубах применяются канавочные, сетчатые, спеченные пористые и составные капиллярные структуры. Их общая задача состоит в возврате жидкого рабочего тела к зоне испарения за счет капиллярных сил. Различия в геометрии определяют капиллярное давление, проницаемость, теплопроводность и технологичность изготовления [4, 5].

Лазерное сплавление в порошковом слое (LPBF) позволяет формировать внутренние полости и мелкоразмерные элементы непосредственно по цифровой модели. Применительно к тепловой трубе это создает возможность совместного изготовления корпуса и внутренних капиллярных элементов в одной детали [3–5]. Исследования аддитивно изготовленных фитилей подтверждают получение металлических пористых структур, однако их фактические характеристики зависят не только от заданной геометрии, но и от параметров процесса и направления построения [4, 5].

Основными ограничениями являются отклонения размеров малых элементов, шероховатость внутренних поверхностей, локальное припекание частиц, пористость стенок и сложность удаления несплавленного порошка. Остаточный порошок может частично перекрывать каналы и изменять движение пара и жидкости. Поэтому контроль должен охватывать внутреннюю геометрию, очищаемость и целостность корпуса, а не только наружную форму детали [3, 5].

Первичный технологический образец

До разработки сложной функциональной конструкции целесообразно изготовить первичный технологический образец тепловой трубы. Он позволяет проверить воспроизводимость внутренних элементов, возможность удаления порошка, состояние стенок и доступность внутренней полости для контроля. Полученные результаты используются для назначения минимальных размеров, допустимой протяженности закрытых каналов и требований к технологическим отверстиям. После подтверждения воспроизводимости конструкции можно переходить к комплексной проверке работоспособности образца.

Применение nTop при проектировании капиллярной структуры

После подтверждения технологической реализуемости базовой геометрии дальнейшее развитие капиллярной структуры может быть связано с неявным и управляемым полями моделированием в программном комплексе nTop, ранее называвшемся nTopology. При неявном представлении геометрия задается математическими зависимостями, а поля позволяют изменять параметры в разных областях модели по заданному пространственному распределению [6].

Применительно к тепловой трубе управляемыми параметрами могут быть размер ячейки, толщина стенок, объемная доля материала, направление каналов и изменение структуры по длине или поперечному сечению. Такой подход позволяет формировать серию сопоставимых вариантов по единому алгоритму и создавать плавные переходы между областями с различными

характеристиками. При этом $p\text{Tor}$ формирует геометрию, но не подтверждает ее капиллярную эффективность и изготавливаемость.

Методический пример сочетания расчетного проектирования и неявного моделирования приведен в работе Дж. Н. Оракве и соавторов. Для жидкостных теплоотводов авторы объединили термогидравлическую топологическую оптимизацию с конформными решетками на основе трижды периодических минимальных поверхностей. Основные пути движения жидкости определялись по результатам оптимизации, а в $p\text{Tor}$ вдоль них формировалась решетчатая геометрия. После численной проверки прототипы были изготовлены методом LPBF [7].

Результаты этой работы нельзя непосредственно переносить на тепловую трубу, поскольку в теплоотводе жидкость движется принудительно, а в тепловой трубе возврат конденсата обеспечивается капиллярными силами. Для рассматриваемой задачи важна сама последовательность: функционально обусловленное распределение внутренних областей, построение параметрической структуры и последующая проверка по физическим и технологическим критериям. К ним относятся капиллярное давление, эффективный радиус пор, проницаемость, теплопередача и очищаемость [4, 5, 7].

При проектировании также необходимо учитывать минимальный воспроизводимый размер, тонкие стенки, нависающие участки, направление построения и удаление порошка. Повышение геометрической сложности может увеличить поверхность теплообмена, но одновременно повысить сопротивление движению жидкости и усложнить очистку. Поэтому параметры структуры должны уточняться по результатам печати контрольных образцов [7].

Заключение

Тепловые трубы являются одним из средств перераспределения тепла в составе СОТР. LPBF позволяет рассматривать изготовление корпуса и внутренних капиллярных элементов в едином процессе, но требует контроля

внутренней геометрии, очищаемости и целостности стенок. Первичный образец необходим для определения реальных ограничений технологии.

Неявное и управляемое полями моделирование nTop может использоваться для параметрического построения капиллярных структур, а топологическая оптимизация – для обоснования пространственного распределения внутренних областей. Практическая ценность такого подхода должна подтверждаться изготовлением образцов и проверкой их работоспособности.

Использованные источники:

1. Королев, С.И. Системы обеспечения теплового режима космических аппаратов: учебное пособие / С.И. Королев; Балтийский государственный технический университет «Военмех». – Санкт-Петербург: БГТУ, 2006. – 100 с.
2. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1978. 256 с.
3. Szymanski, P. Additive Manufacturing as a Solution to Challenges Associated with Heat Pipe Production / P. Szymanski, D. Mikielwicz // Materials. – 2022. – Vol. 15, no. 4. – Art. 1609. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15041609>.
4. Jafari, D. Metal 3D-printed wick structures for heat pipe application: capillary performance analysis / D. Jafari, W. W. Wits, B. J. Geurts // Applied Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 143. – P. 403–414. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.111>.
5. Kappe, K. Design Concepts and Performance Characterization of Heat Pipe Wick Structures by LPBF Additive Manufacturing / K. Kappe [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, no. 24. – Art. 8930. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15248930>.
6. nTop. Implicits and fields for beginners [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://www.ntop.com/resources/blog/implicits-and-fields-for-beginners/> (дата обращения: 19.06.2026).
7. Orakwe, J. N. An integration of topology optimization and conformal minimal surfaces for additively manufactured liquid-cooled heat sinks / J. N.

Orakwe [et al.] // Additive Manufacturing. – 2025. – Vol. 107. – Art. 104814. – DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2025.104814>.