

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 1. С. 3–13
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 1, pp. 3–13

Научная статья
УДК 536.28
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187437>
EDN: <https://www.elibrary.ru/IMUTOC>

Методология выбора теплоносителей для контурных тепловых труб на основе их теплофизических свойств

Д.А. Гончаров^{1✉}, К.А. Гончаров²

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

¹d.goncharov@heatpipe.ru✉

Аннотация. В работе представлена методология выбора теплоносителей для контурных тепловых труб (КТТ), основанная на комплексном анализе теплофизических и эксплуатационных характеристик теплоносителей с учетом специфики различных областей применения КТТ. Предложен критерий качества теплофизических свойств, включающий в себя параметр Дунбара, адаптированный для применения к КТТ. Проведен сравнительный анализ теплоносителей для КТТ с количественной оценкой их эффективности в различных температурных диапазонах. Рассмотрены механизмы генерации неконденсирующихся газов (НГ), включая химическое взаимодействие и радиолиз, а также их влияние на теплотехнические характеристики и ресурс КТТ. Представлены экспериментальные результаты и инженерные решения, направленные на повышение ресурса и радиационной стойкости КТТ. Представлена апробация методологии выбора теплоносителя для КТТ в составе космических аппаратов.

Ключевые слова: контурные тепловые трубы (КТТ), теплоноситель, параметр Дунбара, методология выбора, теплофизические свойства, космические аппараты

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по проекту № 23-49-10060.

Для цитирования. Гончаров Д.А., Гончаров К.А. Методология выбора теплоносителей для контурных тепловых труб на основе их теплофизических свойств // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 1. С. 3–13. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187437>

Original article

Methodology for the selection of working fluids for loop heat pipes based on their thermophysical properties

D.A. Goncharov^{1✉}, K.A. Goncharov²^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation¹d.goncharov@heatpipe.ru✉

Abstract. This paper presents a methodology for selecting working fluids for loop heat pipes (LHPs) based on a comprehensive analysis of thermophysical and operational characteristics of working fluids, taking into account the specifics of various LHP application areas. A quality criterion for thermophysical properties is proposed, incorporating the Dunbar merit number adapted for LHP applications. A comparative analysis of working fluids for LHPs is conducted with quantitative assessment of their efficiency across different temperature ranges. The mechanisms of non-condensable gas (NCG) generation, including chemical interaction and radiolysis, as well as their impact on thermal performance and service life of LHPs, are examined. Experimental results and engineering solutions aimed at enhancing the service life and radiation resistance of LHPs are presented. The validation of the working fluid selection methodology for LHPs in spacecraft applications is demonstrated.

Keywords: loop heat pipes (LHPs), working fluid, Dunbar criterion, selection methodology, thermophysical properties, spacecraft

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-49-10060.

For citation. Goncharov D.A., Goncharov K.A. Methodology for the selection of working fluids for loop heat pipes based on their thermophysical properties. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 1, pp. 3–13. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187437>

1. Введение

Современные требования к эффективности работы систем терморегулирования (СТР) в электронике, энергетике и в космической технике определяют необходимость применения высокоэффективных двухфазных теплопередающих устройств. Тепловые трубы (ТТ) занимают особое место среди элементов таких систем благодаря сочетанию высокой теплопередающей способности и эксплуатационной надежности. Схема функционирования ТТ представлена на рисунке 1.

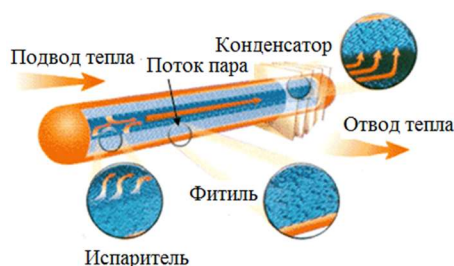


Рис. 1. Схема функционирования тепловой трубы

Тепло в ТТ передается за счет поглощения теплоносителем при его испарении в зоне подвода тепла и последующим выделением при конденсации в зоне отвода тепла. Жидкая фаза теплоносителя возвращается в зону подвода тепла за счет капиллярных сил. Так как испарение и конденсация происходят практически при одной и той же температуре тепловые трубы обладают эффективной теплопроводностью на несколько порядков выше, чем аналогичные по сечению стержни из меди. Тепловой поток (мощность), передаваемый тепловой трубой, описывается выражением (1).

$$Q = \dot{m} \times L, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток, Вт; \dot{m} – массовый расход теплоносителя, кг/с; L – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Капиллярный напор, который возникает вследствие испарения теплоносителя, определяется выражением Лапласа (2):

$$\Delta P_{\text{кап}} = \frac{2 \times \sigma}{r_{\text{кап}}} \times \cos \theta, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{кап}}$ – капиллярный напор, Па; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; θ – краевой угол смачивания теплоносителем стенок капилляров, рад; $r_{\text{кап}}$ – эффективный радиус капилляра пористой структуры фитиля, м.

Массовый расход в тепловой трубе определяется скоростью течения, плотностью теплоносителя и сопротивлением движения теплоносителя в паровой и жидкой фазах, определяется формулой (3).

$$\dot{m} = \rho \times v \times S, \quad (3)$$

где ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; v – скорость движения теплоносителя, м/с; S – площадь сечения канала тепловой трубы, м².

В общем виде сумма всех сопротивлений при движении теплоносителя не может превышать капиллярного напора (4).

$$\Delta P_{\text{кап}} \geq \Delta P_{\text{ж}} + \Delta P_{\text{п}} + \Delta P_{\text{ст}}, \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{ж}}$, $\Delta P_{\text{п}}$ – потери давления в жидкой и паровой фазе теплоносителя, Па; $\Delta P_{\text{г}}$ – гидростатическое сопротивление при наклоне ТТ или ускорении в поле массовых сил, Па.

Потери давления при движении жидкости и пара в транспортных каналах определяются формулами (4) и (5):

$$\Delta P_{\text{ж}} = \frac{\mu_{\text{ж}} \times l_{\text{ж}}}{k \times S_{\text{ж}}} \times \dot{m}, \quad (4)$$

$$\Delta P_{\text{п}} = \xi_{\text{п}} \times \frac{l_{\text{п}}}{d_{\text{п}}} \times \frac{\rho_{\text{п}} \times v_{\text{п}}^2}{2}, \quad (5)$$

где $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость теплоносителя, Па×с; $l_{\text{п}}$ и $l_{\text{ж}}$ – длины паропровода и жидкостной магистрали, м; k – проницаемость фитиля, м²; $S_{\text{ж}}$ – площадь поперечного сечения жидкостной магистрали, м²; $\xi_{\text{п}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления паропровода, б/р; $d_{\text{п}}$ – гидравлический диаметр паропровода, м; $\rho_{\text{п}}$ – плотность пара теплоносителя, кг/м³; $v_{\text{п}}$ – средняя скорость пара, м/с; $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость теплоносителя, Па×с.

Для теплопередающих устройств с двухфазным теплоносителем вопрос о выборе теплоносителя является одним из ключевых. Выбор теплоносителя носит сложный междисциплинарный

характер. Требования, предъявляемые к теплоносителю всех тепловых труб, приведены ниже:

- наличие жидкой и паровой фазы во всем рабочем диапазоне температур;
- высокие значения комплекса теплофизических параметров (скрытой теплоты парообразования, силы поверхностного натяжения, вязкость жидкости и т.д.);
- химическая совместимость теплоносителя с материалами корпуса и капиллярных структур;
- для тепловых труб космического назначения требуется также высокая стойкость к воздействию проникающего ионизирующего космического излучения.

2. Критерий качества теплоносителя

Теплоносителем для тепловых труб могут быть любые простые вещества, которые в рабочем диапазоне температур имеют жидкую и паровую фазу. На рисунке 2 приведен ряд наиболее распространенных теплоносителей и их рабочие диапазоны температур.

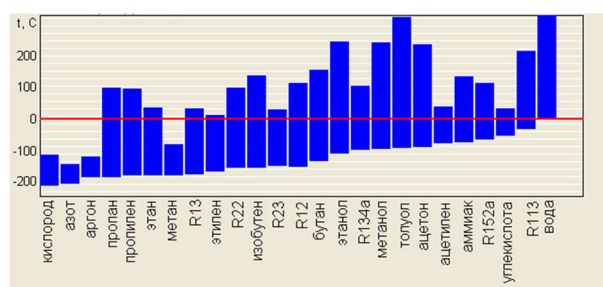


Рис. 2. Температурные диапазоны некоторых теплоносителей

Комплекс теплофизических параметров теплоносителя описывается выражением (7) – сводным «критерием качества», широко используемым при предварительном сравнительном анализе рабочих жидкостей:

$$\Phi = \frac{\rho_{\text{ж}} \times L^2 \times \sigma}{\mu_{\text{ж}}}, \quad (7)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы теплоносителя, кг/м³; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

На рисунке 3 представлены температурные зависимости критерия качества для ряда теплоносителей, рассчитанные по линии насыщения в соответствующих диапазонах температур. Анализ полученных зависимостей показывает, что с ростом температуры значение критерия каче-

ства, как правило, увеличивается, при этом абсолютные значения Φ существенно различаются для разных теплоносителей.

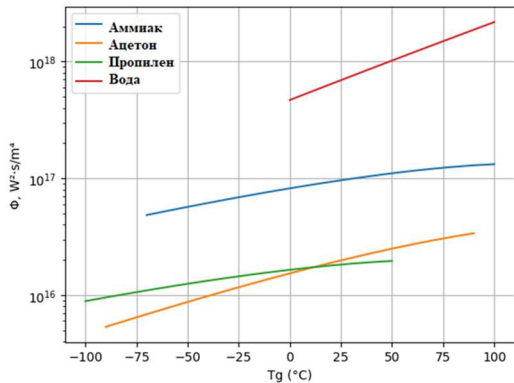


Рис. 3. Значения критерия качества для теплоносителей по линии насыщения

Из рисунка видно, что в рассматриваемом температурном диапазоне явное преимущество по значению критерия качества имеет вода. Во всем диапазоне температур ее значения Φ на порядок превышают соответствующие значения для остальных теплоносителей, что указывает на существенно более высокий потенциал теплопередачи при фазовом переходе.

Аммиак занимает второе место и характеризуется стабильно высокими значениями критерия качества, что делает его предпочтительным выбором для низкотемпературных применений. Органические теплоносители (ацетон и пропилен) демонстрируют заметно меньшие значения Φ , однако могут рассматриваться как альтернатива в специализированных применениях благодаря более низкому давлению насыщенных паров и менее жестким требованиям к прочности конструкции тепловой трубы.

Следует отметить, что критерий качества учитывает исключительно теплофизические свойства теплоносителя и не отражает влияние гидродинамических потерь в паровой и жидкостной магистралях.

В контурных тепловых трубах, где предельная теплопередающая способность в значительной степени определяется сопротивлением течения паровой фазы, применение критерия качества (7) носит ограниченный характер. В связи с этим для анализа работоспособности КТТ и выбора теплоносителя целесообразно использовать параметры, учитывающие особенности двухфаз-

ного течения, в частности параметр Дунбара, который будет рассмотрен далее.

Принцип функционирования контурных тепловых труб (КТТ) отличается от классических тепловых труб и представлен на рисунке 4.

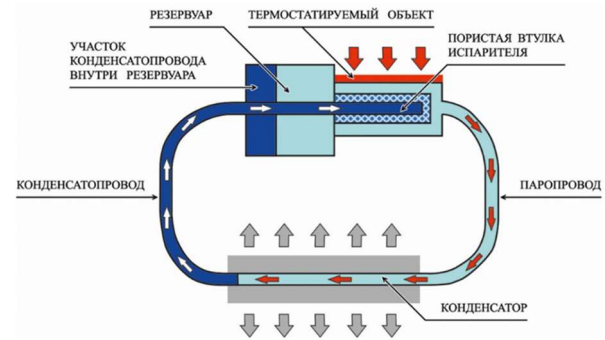


Рис. 4. Принципиальная схема функционирования КТТ

Принципы работы и конструктивные особенности КТТ подробно описаны [1–3]. За последние десятилетия накоплен значительный опыт создания и эксплуатации КТТ в электронике, энергетике и в системах обеспечения теплового режима космических аппаратов [4–9]. КТТ обладают высокими надежностью и ресурсом (более 20 лет), устойчивостью к воздействию космической радиации, механических и тепловых воздействий.

Процессы теплообмена в КТТ описывается тем же комплексом уравнений (1–6), что и в обычных ТТ. Основные отличия КТТ от обычных ТТ с точки зрения выбора теплоносителя заключаются в следующем:

- каналы пара и жидкости разделены, теплоноситель в них может находиться в произвольном состоянии, не обязательно на линии насыщения;
- теплоноситель контактирует с капиллярно-пористой структурой (КПС) только в зоне испарителя и течет не вдоль оси КПС, а поперек, что определяет малое гидравлическое сопротивление на этом участке;
- жидкостной канал и паропровод не имеют капиллярной структуры, течение теплоносителя по этим каналам происходит без дополнительных сопротивлений.

Эти отличия определили и новый формат «критерия качества» теплоносителя для КТТ, который был предложен в Нилом Дунбаром, руководителем лаборатории тепловых труб компании ВАЕ [9].

Для КТТ параметр Дунбара определяется выражением (8):

$$D = \frac{\sigma \times \rho_{\text{п}} \times L^{1,75}}{\mu_{\text{п}}^{0,25}}, \quad (8)$$

где $\mu_{\text{п}}$ – динамическая вязкость пара, Па·с.

В отличие от обычных ТТ основной вклад в гидравлическое сопротивление теплоносителя в КТТ вносит не жидкость, а пар. Типичное значение распределения потерь давления в различных элементах КТТ представлено на рисунке 5.

Значение параметра Дунбара полностью зависит от свойств теплоносителя. Зависимость параметра Дунбара от температуры имеет максимум, т. е. каждый теплоноситель имеет не только ограниченный температурный диапазон работы, но и определенную температуру, при которой этот теплоноситель наиболее эффективен.

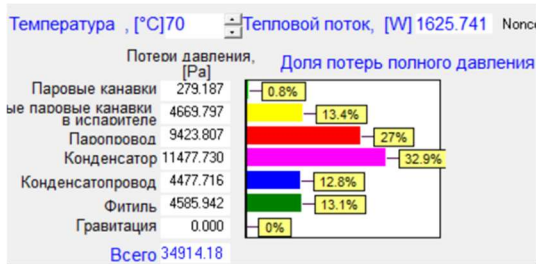


Рис. 5. Пример распределения потерь давления в элементах КТТ

Графическое отображение параметра Дунбара для некоторых теплоносителей представлено на рисунке 6. Сравнение теплоносителей по параметру Дунбара при фиксированной температуре минус 20 °С представлено на рисунке 7. Как следует из рисунков 6 и 7 наиболее эффективным теплоносителем для КТТ в диапазоне температур от минус 20 °С до 100 °С является аммиак.

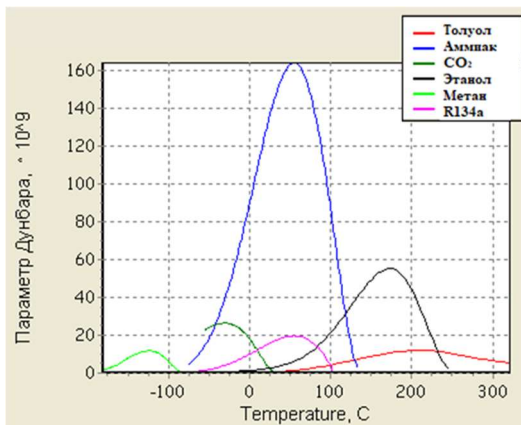


Рис. 6. Параметр Дунбара для некоторых теплоносителей



Рис. 7. Параметр Дунбара для некоторых теплоносителей при минус 20 °С

3. Анализ теплофизических свойств теплоносителей

Для проектирования КТТ был разработан специализированный программный комплекс EASY 2.1 [11], включающий базу данных теплофизических свойств 24 теплоносителей, применяемых в отечественной практике создания тепловых труб. База данных формировалась на основе отечественных и зарубежных справочников [12–14]. Для теплоносителей, данные по которым в справочной литературе представлены не в полном рабочем диапазоне температур, проводилась экстраполяция свойств на граничные области. С применением комплекса EASY 2.1 можно быстро и качественно проанализировать свойства теплоносителей при проектировании КТТ, пример значений теплофизических свойств аммиака при 40 °С на рисунке 8.

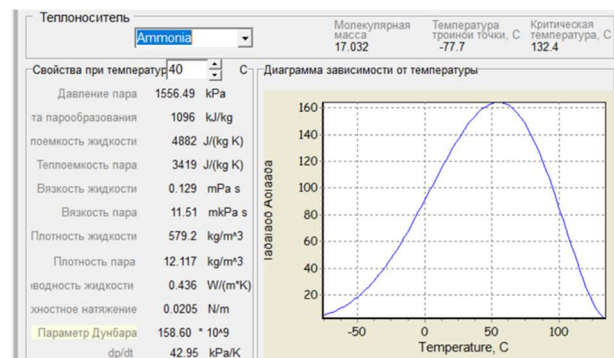


Рис. 8. Свойства аммиака в комплексе EASY 2.1

При выборе теплоносителя для КТТ недостаточно ориентироваться только на оптимальные теплофизические свойства и максимальное значение параметра Дунбара в заданном температурном диапазоне. Важным критерием является давление насыщенных паров теплоносителя, которое должно значительно превышать капиллярный напор КПС.

Капиллярный напор в КТТ в десятки раз превышает соответствующий показатель обычных ТТ, что обусловлено существенным различием в характеристиках капиллярно-пористых структур. Эффективный диаметр пор КПС для КТТ составляет 1–20 мкм, в то время как для обычных ТТ этот параметр находится в диапазоне 60–500 мкм. Капиллярный напор в КТТ может превышать 1 атм. (0,1 МПа). Использование теплоносителей с давлением паров менее 3 атм. (0,3 МПа) в нижней части рабочего диапазона температур приведет к существенному увеличению перепада температур между испарителем и конденсатором, что снижает эффективность работы КТТ.

4. Химическая совместимость теплоносителей с конструкционными материалами

Вторым по значимости критерием выбора теплоносителя после теплофизических свойств является его химическая совместимость с материалами корпуса и капиллярно-пористых структур. Несмотря на превосходные теплофизические характеристики в своих температурных диапазонах, вода и аммиак имеют существенные ограничения по совместимости с конструкционными материалами: аммиак несовместим с медными сплавами, вода – с алюминием и его сплавами, а также с нержавеющей сталью.

Понятие химической совместимости теплоносителя с конструкционными материалами ТТ существенно отличается от понятия «коррозионная стойкость». Коррозионная стойкость определяется по уносу материала с поверхности металлического образца в результате химического взаимодействия с жидкостью или газами. Для тепловых труб данный подход имеет ограниченное применение, поскольку основной проблемой является не разрушение стенок корпуса, а генерация неконденсирующихся газов (НГ) в паровой фазе.

Для нормального функционирования ТТ пары теплоносителя должны беспрепятственно перемещаться в зону отвода тепла и конденсироваться. Присутствие газов с температурой конденсации ниже, чем у паров теплоносителя, затрудняет процесс конденсации: парам теплоносителя приходится преодолевать газовую пробку путем диффузии. Это приводит к снижению темпера-

туры в зоне отвода тепла на величину $\Delta T_{\text{нг}}$, определяемую по формуле (9):

$$\Delta T_{\text{нг}} = \Delta P_{\text{нг}} / \frac{dP}{dT}, \quad (9)$$

где $\Delta P_{\text{нг}}$ – парциальное давление НГ, Па; dP/dT – производная давления насыщенных паров теплоносителя по температуре.

Критическое количество НГ для обычных ТТ обычно составляет не более 10 % от объема конденсатора на нижней границе температур. Расчеты показывают, что это соответствует концентрации не более 1×10^{-3} % об. от общего количества теплоносителя.

В КТТ положение НГ неочевидно. При работе КТТ НГ перемещается в компенсационную полость (КП), где, смешиваясь с паром теплоносителя повышает давление и уменьшает разницу давлений между испарителем и КП. Это приводит к увеличению зоны конденсатора, занятой жидкой фазой теплоносителя, и дополнительному переохлаждению конденсатора. В конечном итоге наличие НГ в контуре приводит к увеличению термического сопротивления КТТ и ухудшению условий для запуска циркуляции.

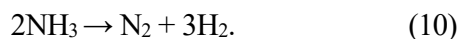
Но учитывая тот факт, что капиллярный напор в КТТ существенно больше, чем в обычных ТТ, а объем КП существенно больше объема конденсатора в обычных ТТ, количество НГ, которое приведет к увеличению термического сопротивления КТТ при прочих равных условиях также в десятки раз больше. Т. е. КТТ менее чувствительна к наличию НГ.

Так, проведенные испытания артериальных, аксиальных и контурных ТТ с теплоносителем аммиак показали, что КТТ способна выдерживать количество НГ в десятки раз превышающее в процентном отношении предельное значение НГ для обычных ТТ. Тем не менее, это количество НГ по-прежнему крайне малая величина и не превышает 3×10^{-2} % об. от общего количества теплоносителя.

Теплоноситель ТТ применяют в чистом состоянии. На процесс генерации НГ и его накопления внутри корпуса ТТ влияет много факторов. Возьмем в качестве примера аммиак, который наиболее распространен в качестве теплоносителя в ТТ космического применения.

Аммиак, заправляемый в ТТ, имеет начальную чистоту не хуже 99,9999 % об. и основная

примесь в нем – вода. В процессе эксплуатации аммиак разлагается с образованием молекул азота и водорода в результате взаимодействия с материалами корпуса и КПС, согласно реакции (10), а также под воздействием ионизирующего излучения:



Если корпус и капиллярная структура ТТ выполнена из совместимых с аммиаком материалов (нержавеющая сталь, никель, титан, некоторые алюминиевые сплавы), то химический процесс генерации НГ только от взаимодействия с аммиаком идет медленно. Основной вклад в процесс генерации НГ в этом случае будут вносить примеси, содержащиеся в аммиаке и следы загрязнений, которые остались на внутренней поверхности корпуса и КПС после подготовки ТТ к заправке. Это вода и углеводороды. Главный вклад в этот процесс будет вносить вода.

Она приводит к каталитической реакции разложения аммиака, при этом она не рекомбинирует полностью с материалами корпуса, сохраняя свою каталитическую активность долгие годы. Воду очень сложно удалить из аммиака – он очень гигроскопичен. Также сложно определить ее содержание в аммиаке в малых дозах. Кулонометрический метод Фишера, который применяется для определения следов воды в аммиаке, имеет чувствительность, не превышающую $1 \times 10^{-4} \%$ объемных от общего количества аммиака.

Для надежной работы ТТ в течение более 10 лет необходимо снизить содержание воды до величины $1 \times 10^{-6} \%$ об. и современные технологии очистки аммиака это позволяют, но проконтролировать это количество воды прямыми методами невозможно. Для этой цели приходится применять ускоренные ресурсные испытания.

5. Методы контроля качества и ускоренные ресурсные испытания

Для оценки долговременной надежности ТТ необходимо контролировать скорость химических реакций взаимодействия теплоносителя и примесей с материалами корпуса и КПС. Наиболее распространенным методом является проведение ускоренных ресурсных испытаний при повышенной температуре.

Согласно закону Аррениуса – формула (11), константа скорости химической реакции экспоненциально зависит от температуры:

$$k = A \times e^{\frac{-E_a}{RT}}, \quad (11)$$

где k – константа скорости реакции, б/р; A – предэкспоненциальный множитель, б/р; E_a – энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль×К); T – абсолютная температура, К.

Однако применение закона Аррениуса для расчета скорости реакций в условиях ТТ затруднено, поскольку определение требует проведения дорогостоящих экспериментальных исследований.

На практике для оценки ускорения реакций используют эмпирическое правило Вант-Гоффа: скорость химических реакций увеличивается минимум в 2 раза при повышении температуры на 10 °С. Следовательно, при увеличении температуры на 60 °С скорость реакций возрастает в $2^6 = 64$ раза. Таким образом, для подтверждения ресурса работы ТТ при средней температуре 20 °С в течение 10 лет требуется проведение ускоренных испытаний при температуре 80 °С длительностью менее 2 месяцев.

Ресурсные испытания показали, что при одинаковой технологии подготовки ТТ к заправке и применении аммиака от разных производителей с одинаковой чистотой (99,9999 % об.) количество НГ, возникающее при ускоренных ресурсных испытаниях, может отличаться в разы.

Как было сказано выше, примеси являются основным источником НГ при правильно выбранных совместимых материалах корпуса и КПС. Количество и тип примесей зависит от технологии очистки теплоносителя и технологии подготовки корпуса и КПС ТТ к заправке. Таким образом, говорить о совместимости теплоносителей с материалами корпуса и КПС без детального описания технологии очистки корпуса, КПС и самого теплоносителя от примесей некорректно.

6. Радиационная стойкость теплоносителей

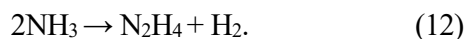
На скорость образования НГ влияют четыре основных фактора: время эксплуатации, температура, скорость циркуляции теплоносителя и ионизирующее излучение. Авторами был проведен полнофакторный эксперимент с артериальными тепловыми трубами, использующими аммиак чистотой 99,9999 % об. в качестве теплоносителя.

Ионизирующее излучение моделировалось γ -квантами с энергией 1,25 МэВ с низкой мощ-

ностью дозы на установке «Угра» с гамма пушкой на Co^{62} . Результаты испытаний показали, что доминирующим фактором, определяющим выход НГ, является ионизирующее излучение. Относительные весовые коэффициенты влияния факторов составили: время – 1, температура – 4, скорость циркуляции теплоносителя – 0, ионизирующее излучение – 16.

Радиационные испытания тепловых труб с корпусом из нержавеющей стали 12Х18Н9Т и алюминиевого сплава АД31 выявили два важных явления.

Первое явление связано с механизмом радиолиза аммиака. Масс-спектрометрический анализ содержимого нескольких ТТ, проведенный в течение 10 дней после завершения облучения, показал отсутствие азота в составе НГ. При этом количество выделившегося водорода оказалось в три раза меньше расчетного по реакции (8). Это указывает на то, что при низкой температуре (0–40 °С) и малой мощности дозы радиолиза аммиака протекает по альтернативному пути с образованием гидразина:



Малое количество гидразина в жидкой фазе скапливается в испарителе и не мешает процессу циркуляции теплоносителя, напротив, улучшается краевой угол смачивания и несколько увеличивается предельная мощность.

Второе явление – эффект самовосстановления тепловых характеристик – было обнаружено через 2 месяца выдержки ТТ в нормальных условиях после завершения облучения. Тепловые параметры ТТ с корпусом из нержавеющей стали (12Х18Н9Т), которые ухудшились после радиационного воздействия дозой 10^6 рад, практически полностью восстановились: водород исчез из паровой фазы. В то же время характеристики ТТ с корпусом из сплава АД31 оставались неизменными как через 2 месяца, так и через год после облучения.

Объяснением данного эффекта служит способность водорода к диффузии через кристаллическую решетку некоторых металлов — палладия, тантала и никеля. Нержавеющая сталь 12Х18Н9Т содержит 18 % никеля, чего оказалось достаточно для удаления водорода из ТТ путем диффузии через стенку толщиной 0,5 мм в окружающую атмосферу за счет градиента

концентрации менее чем за 2 месяца. В условиях вакуума этот процесс протекает еще быстрее.

Поскольку большинство теплоносителей при радиолизе образуют водород, был разработан эффективный метод повышения радиационной стойкости ТТ: достаточно изготовить фрагмент корпуса в зоне конденсатора из нержавеющей стали (предпочтительно — из никеля) для обеспечения удаления водорода из контура.

Для КТТ с КПС из мелкодисперсных металлических порошков (никеля, титана, нержавеющей стали) характерен еще один положительный эффект. НГ способны адсорбироваться на поверхности порошков, а водород растворяется в большом количестве в никеле и титане.

Так, например, в обычных ТТ с корпусом и КПС из нержавеющей стали и теплоносителем вода идет постоянная генерация водорода [15]. Для использования данного сочетания материалов и теплоносителя применяют ингибитор коррозии Г2, который хорошо работает до температуры 80 °С. А в КТТ с корпусом из нержавеющей стали и никелевой КПС выделение водорода не замечается даже через 20 лет эксплуатации без применения ингибитора коррозии [16].

Третьим важным фактором при выборе теплоносителя для тепловых труб космического назначения является высокая стойкость к воздействию проникающего ионизирующего космического излучения. При воздействии электронов, нейтронов или γ излучения молекулы теплоносителя распадаются с образованием радикалов и атомов, которые образуют НГ. Данный процесс, называемый радиолизом, зависит от дозы, энергии и вида ионизирующих частиц.

Различные вещества, используемые в качестве теплоносителя будут давать различный выход НГ при воздействии одинакового излучения. Это определяется в первую очередь энергией связи атомов в молекуле. Для разрыва межатомных связей требуется определенная энергия активации. Самая большая энергия активации требуется для воды, затем для аммиака. Углеводороды характеризуются более низкой энергией связи, что обуславливает их низкую радиационную стойкость.

К сожалению, вода не может быть использована в большинстве случаев в качестве теплоносителя для ТТ космического назначения из-за высокой температуры тройной точки – 0 °С.

Аммиак является наиболее распространенным теплоносителями для ТТ космического назначения, но температура замерзания (минус 77 °С) и низкое давление паров при температурах ниже минус 40 °С ограничивают его применение. Достаточно часто встречаются ситуации, когда необходимо применение теплоносителей с более низкой рабочей температурой. Приходится применять углеводороды (пропан, этан, метан) и различные фреоны. Критерий качества этих теплоносителей невысокий. Но с этим можно мириться путем увеличения массогабаритных параметров ТТ с такими теплоносителями. А вот недостаточная радиационная стойкость является серьезным препятствием.

7. Пропилен как радиационно-стойкий теплоноситель

Оригинальное решение проблемы радиационной стойкости было найдено для пропана (C₃H₈). Параметр Дунбара пропана на порядок ниже, чем у аммиака при нормальной температуре, но пропан может работать при температуре минус 90 °С и ниже, в то время как аммиак замерзнет. Низкая радиационная стойкость ограничивает применение пропана в качестве теплоносителя для ТТ космического назначения.

Пропан представляет собой предельный углеводород, его непредельным аналогом является пропилен (C₃H₆), содержащий двойную связь между атомами углерода. Его радиационная стойкость еще ниже, чем у пропана. Двойная связь пропилен обладает меньшей энергией активации и при радиолитическом разложении она разрушается первой, превращая пропилен в радикал пропана. Схема радиолитического разложения пропилен отражена на рисунке 9.

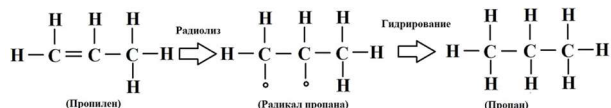


Рис. 9. Механизм радиолитического разложения пропилен

На рисунке 10 представлены зависимости давления насыщенных паров пропана и пропилен от температуры. Как видно из графика, кривые давления паров обоих компонентов практически совпадают (красная линия – пропилен, синяя – пропан), что обеспечивает стабильность испарительно-конденсационного цикла при трансформации пропилен в пропан.

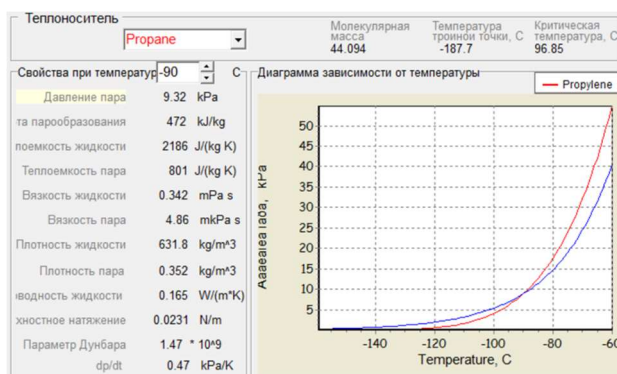


Рис. 10. Давления насыщенных паров пропана и пропилен

При использовании пропилен в качестве теплоносителя в результате радиолитического разложения пропан и продолжает функционировать в испарительно-конденсационном цикле в ТТ, не образуя НГ. Детальные теплофизические свойства пропилен представлены на рисунке 11. Такой бинарный теплоноситель, образующийся в результате радиолитического разложения, может существовать и для других простых веществ.

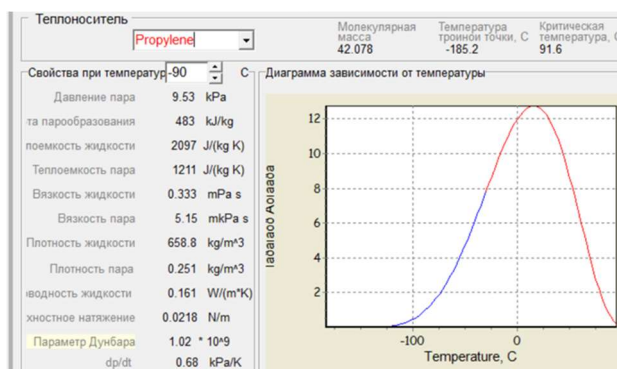


Рис. 11. Детальные свойства пропилен

Кроме того, радикал пропана имеет две активные связи, что позволяет захватывать появляющийся в контуре водород.

Несмотря на то, что теплофизические характеристики пропилен существенно уступают аммиаку, для КТТ это не приводит к критическому увеличению массогабаритных параметров. Детальное сравнение эксплуатационных характеристик пропилен и аммиака для применения в КТТ представлено в работе [17].

Применение пропилен в качестве теплоносителя ТТ позволило не только расширить температурный диапазон работы КТТ, но и на порядок повысить радиационную стойкость ТТ по сравнению с пропаном, что доказано радиационными экспериментами.

онными испытаниями и летной эксплуатацией сотен ТТ в составе Российских КА.

Радиационная стойкость теплоносителей снижается при наличии примесей, которые разлагаются с образованием НГ и приводят к дополнительным нерасчетным радиационно-химическим реакциям. Как и в случае с ресурсом ТТ примеси в теплоносителе многократно ухудшают параметры ТТ.

Предложенная методология выбора теплоносителей реализована при создании более 10 тысяч ТТ компании НПП «ТАИС». Отсутствие отказов ТТ при эксплуатации в течение более 25 лет подтверждает их высокую надежность и справедливость предложенной методологии выбора теплоносителей.

8. Заключение

В работе представлена комплексная методология выбора теплоносителей для контурных тепловых труб, учитывающая теплофизические свойства, химическую совместимость с конструкционными материалами и радиационную стойкость.

Показано, что при выборе теплоносителя для КТТ недостаточно ориентироваться только на максимальное значение параметра Дунбара. Важными являются: достаточное давление паров теплоносителя для обеспечения циркуляции через КПС, минимизация генерации НГ в процессе эксплуатации, и высокая радиационная стойкость для космических применений.

Предложен оригинальный подход к повышению радиационной стойкости низкотемпературных теплоносителей на основе использования непредельных углеводородов. Использование программного комплекса EASY 2.1 в паре с предложенной методологией помогает обеспечить автоматизацию расчетов и сокращение времени проектирования КТТ.

Предложенная методология выбора теплоносителей реализована при создании более 10 тысяч ТТ, отсутствие отказов при эксплуатации более 25 лет в составе КА подтверждает справедливость предложенной методологии.

Дальнейшее совершенствование методологии может включать расширение базы данных теплоносителей (включая бинарные смеси и наножидкости), учет деградации свойств теплоноси-

теля при длительной эксплуатации, разработку методов оптимизации конструкции КПС под выбранный теплоноситель.

Список источников

1. Goncharov K.A., Nikitkin M.N. Loop Heat Pipes and Two-Phase Loops with Capillary Pumps and Working Fluids for Them // Proceedings of the International Workshop on LHP Technology. 1993. pp. 45–57.
2. Maidanik Yu.F., Fershtater Yu.G., Goncharov K.A. Thermoregulation of Loops with Capillary Pumping for Space Use // SAE Technical Paper Series. 1992. pp. 1–8.
3. Гончаров К.А., Николаев Н.Н., Буз В.Н. Моделирование динамических характеристик контурных тепловых труб с регулированием // Тепловые процессы в технике. 2006. № 3. С. 108–115.
4. Nikitkin M.N., Goncharov K.A., Golovin O.A. et al. Loop Heat Pipes in Thermal Control Systems for “OBZOR” Spacecraft. 4th International CPL Workshop. 1994.
5. Goncharov K.A., Kozmin D.E., Nikitkin M.N. et al. Loop Heat Pipes for Space Mission Mars-96. 26th ICES. Monterey. USA. 1996.
6. Orlov A.A., Goncharov K.A., Kotlyarov E.G. et al. The Loop Heat Pipe Experiment on Board the GRANAT Spacecraft. CPL-97 Workshop. 1997.
7. Goncharov K.A., Buz V.N., Elchin A. et al. Development of Loop Heat Pipe for Thermal Control System of Nickel Hydrogen Batteries of «Yamal-200» Satellite. 13th IHPC. Shanghai. China. 2004.
8. Golovin O.A., Goncharov K.A., Balykin M.Yu. 10 Years Experience of Loop Heat Pipes Operation on Board of «Yamal-200» Satellite. 17th IHPC. 2013.
9. Dunbar N., Cadell P. Working fluids and figures of merit for CPL/LHP applications. CPL-98 Workshop. El Segundo. (CA. USA. 2–3 March 1998).
10. Васильев Л.Л., Майданик Ю.Ф. Двухфазные теплопередающие контуры // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 10. С. 434–446. DOI: 10.34759/tpt2022-14-10-434-446/
11. Buz V.N., Goncharov K.A. Modeling of LHP Performances by Means of Specialized EASY Package Program // Proceedings of the 32nd International Conference on Environmental Systems. 2002. № 2002-01-2506. pp. 1–9.
12. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 708 с.
13. Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянов А.В. Холодильная техника. Свойства веществ. Справочник. М.: Агропромиздат, 1985. 208 с.
14. Yaws C.L. Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons. 2nd ed. Norwich. NY: William Andrew, 2014.
15. Шекриладзе И.Г., Авалишвили И.Г., Гогишвили Г.Б. и др. Тепловые трубы для систем термостабилизации. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 114–126.
16. Ингибитор коррозии Г-2 для водяных тепловых труб: технические условия и рекомендации по применению. М.: ВНИИХТ, 1985.

17. Goncharov K.A, Kolesnikov V.A., Buz. V.N. Peculiarities of Development of Propylene LHP for Spacecraft Thermal Control System. 12th IHPC. (Moscow. 2004).

References

1. Goncharov KA, Nikitkin MN. Loop Heat Pipes and Two-Phase Loops with Capillary Pumps and Working Fluids for Them. *Proceedings of the International Workshop on LHP Technology*. 1993:45–57.
2. Maidanik YuF, Fershtater YuG, Goncharov KA. Thermoregulation of Loops with Capillary Pumping for Space Use. *SAE Technical Paper Series*. 1992. pp. 1–8.
3. Goncharov KA, Nikolaev NN, Buz VN. Modeling the dynamic characteristics of loop heat pipes with regulation. *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2006;(3):108–115.
4. Nikitkin MN, Goncharov KA, Golovin OA et al. Loop Heat Pipes in Thermal Control Systems for «OBZOR» Spacecraft. *4th International CPL Workshop*. (1994).
5. Goncharov KA, Kozmin DE, Nikitkin MN et al. Loop Heat Pipes for Space Mission Mars-96. *26th ICES. Monterey. USA*. 1996.
6. Orlov AA, Goncharov KA, Kotlyarov EG et al. The Loop Heat Pipe Experiment on Board the GRANAT Spacecraft. *CPL-97 Workshop*. 1997.
7. Goncharov KA, Buz VN, Elchin A et al. Development of Loop Heat Pipe for Thermal Control System of Nickel Hydrogen Batteries of «Yamal-200» Satellite. *13th IHPC. (Shanghai. China. 2004)*.
8. Golovin OA, Goncharov KA, Balykin MYu. 10 Years Experience of Loop Heat Pipes Operation on Board of «Yamal-200» Satellite. *17th IHPC. (2013)*.
9. Dunbar N, Cadell P. Working fluids and figures of merit for CPL/LHP applications. *CPL-98 Workshop. (El Segundo. CA. USA. 2–3 March 1998)*.
10. Vasil'ev LL, Maidanik YuF. Two-phase heat transfer circuits. *Teplovye protsessy v tekhnike*. 2022;14(10):434–446. DOI: 10.34759/tpt2022-14-10-434-446/
11. Buz VN, Goncharov KA. Modeling of LHP Performances by Means of Specialized EASY Package Program. *Proceedings of the 32nd International Conference on Environmental Systems*. 2002. № 2002-01-2506. pp. 1–9.
12. Vargaftik NB. *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow: Nauka; 1972. 708 p.
13. Bogdanov SN, Ivanov OP, Kupriyanov AV. *Refrigeration Engineering. Properties of Substances. Handbook*. Moscow: Agropromizdat; 1985. 208 p.
14. Yaws CL. *Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons. 2nd ed*. Norwich. NY: William Andrew; 2014.
15. Shekrladze IG, Avalishvili IG, Gogishvili GB et al. *Heat pipes for thermal stabilization systems*. Moscow: Ehnergoatomizdat; 1991. pp. 114–126.
16. *Corrosion inhibitor G-2 for water heat pipes: specifications and recommendations for use*. Moscow: VNIKHT; 1985.
17. Goncharov KA, Kolesnikov VA, Buz VN. Peculiarities of Development of Propylene LHP for Spacecraft Thermal Control System. *12th IHPC. (Moscow. 2004)*.